

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний аграрний університет

Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра машин та обладнання сільськогосподарського виробництва

Допущений до захисту:  
завідувач кафедри  
д.т.н., професор Веселовська Н.Р.

---

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« 12 » листопада 2020 р.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ ОПЕРАЦІЇ  
РОЗТОЧУВАННЯ СТУПІНЧАТИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 71-МАШ  
Дриманов Віктор Анатолійович

---

Керівник: к.т.н., доцент  
Яропуд Віталій Миколайович

---



## Зміст

Анотація.....	5
Вступ.....	7
1. Особливості токарної обробки ступінчатих отворів.....	8
1.1. Оптимізація технологічних процесів.....	8
1.1.1. Критерій максимальної продуктивності і найменшого штучного часу.....	10
1.1.2. Критерій мінімальної собівартості.....	12
1.2. Види оптимізації процесів механічної обробки.....	15
1.2.1. Вибір параметрів оптимізованих процесів обробки.....	16
1.3. Особливості методики виконання структурно-параметричної оптимізації для формування ступінчатих поверхонь деталей.....	18
1.4. Висновки до розділу.....	19
2. Теоретичні особливості структурної оптимізації токарної операції розточування.....	21
2.1. Теоретичні основи структурної оптимізації.....	21
2.2. Перехід від коду припуску до розмірів реальної деталі.....	37
2.3. Моделювання структурної оптимізації розточувальної операції.....	39
2.4. Висновки до розділу.....	45
3. Технологічні особливості сучасних методів отримання ступінчатих отворів.....	46
3.1 Особливості високошвидкісної обробки поверхонь деталей.....	46
3.2 Конструктивні особливості і технологічні можливості сучасних верстатів з ЧПУ, ріжучого і допоміжного інструменту, САМ–систем....	48
3.2.1 Технологічні і конструктивні особливості вертикальних обробних центрів токарно-фрезерно-свердлильної групи.....	48
3.2.2. Ріжучий і допоміжний інструмент.....	52
3.2.3. САМ - системи.....	54
3.3. Сучасні методи отримання отворів.....	55

3.3.1. Гвинтова інтерполяція.....	55
3.3.2. Розфрезерування отвору.....	61
3.4. Умови обробки при ВСО.....	65
3.4.1. Режими різання при ВСО.....	65
3.4.2. Охолодження при ВСО.....	66
3.5. Моделювання структурної оптимізації з використанням ВСО фрезеруванням.....	67
3.6. Висновки до розділу.....	71
Загальні висновки.....	72
Список використаної літератури.....	73

### Анотація

Дриманов Віктор Анатолійович. Підвищення ефективності токарної операції розточування ступінчатих поверхонь деталей.

Магістерська робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 208 «Агроінженерія», Вінницький національний аграрний університет Міністерства утворення і науки України, Вінниця, 2020.

Магістерська робота складається зі вступу, 3 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 35 найменувань. Основна частина роботи викладена на 76 сторінках машинописного тексту, містить 53 рисунків і 7 таблиць.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та технологічне забезпечення точності токарної обробки ступінчатих отворів на основі структурної оптимізації, що дозволяє формувати якісні деталі з мінімальними витратами часу.

Для досягнення поставленої мети розроблено методику структурної оптимізації технологічних переходів формування ступінчатих отворів і створити модель мінімізації часу при токарній обробці таких поверхонь.

Об'єкт дослідження: структурна оптимізація токарної операції розточування, яка є одним з ефективних і перспективних способів забезпечення точності ступінчатих отворів.

Предмет дослідження: структура токарної операції розточування отворів і пов'язані з нею технологічні можливості сучасних металорізальних верстатів та інструментів.

Розроблено теоретичні основи структурної оптимізації токарної обробки ступінчатих отворів, що дозволяють встановити можливі варіанти виконання технологічних переходів.

Створена модель мінімізації трудомісткості формування ступінчатих отворів на токарних операціях.

Ключові слова: ефективність, операція, ступінь, точіння, отвір, поверхня, деталь.

## **Annotation**

Drymanov Victor. Improving the efficiency of the turning operation of boring stepped surfaces of parts.

Master's thesis for the degree of "Master" in specialty 208 "Agroengineering", Vinnytsia National Agrarian University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, 3 chapters, general conclusions, a list of sources used with 35 titles. The main part of the work is set out on 76 pages of typewritten text, contains 53 figures and 7 tables.

The aim of the work is the theoretical substantiation and technological support of the accuracy of turning of stepped holes on the basis of structural optimization, which allows to form high-quality parts with minimal time.

To achieve this goal, a method of structural optimization of technological transitions for the formation of stepped holes has been developed and a model for minimizing time during turning of such surfaces has been created.

Object of research: structural optimization of the turning operation of boring, which is one of the effective and promising ways to ensure the accuracy of stepped holes.

Subject of research: the structure of the turning operation of boring holes and related technological capabilities of modern metal-cutting machines and tools.

Theoretical bases of structural optimization of turning of stepped openings are developed, allowing to establish possible variants of performance of technological transitions.

A model for minimizing the complexity of forming stepped holes in turning operations has been created.

Key words: efficiency, operation, degree, turning, hole, surface, detail.

## Вступ

Основою функціонування виробничого процесу є технологічний процес (ТП) - повна послідовність операцій і технологічних переходів які необхідно виконати в заданих умовах з метою отримання кінцевого продукту в потрібній кількості і необхідній якості. При розробці технологічних процесів прийнято для кожної операції механічної обробки визначати точність, яка виступає в ролі одного з найважливіших показників ефективності процесів формування поверхонь деталей машин [1, 2].

Розрахунок точності обробки, на перший погляд, є не складним завданням [3], якщо не брати до уваги те, що може існувати безліч варіантів виконання однієї і тієї ж операції в поєднанні з можливістю різноманітного призначення режимів різання. Іншими словами, одну і ту ж операцію можна виконати за різними варіантами знімання металу з варіюванням режимами різання в широкому діапазоні. На підставі цієї обставини завдання прогнозування точності обробки на етапі проектування технологічного процесу стає складним комбінаторним завданням, для вирішення якого необхідно знати, які можуть існувати варіанти виконання операції і які режими обробки необхідно застосовувати для того чи іншого варіанту, щоб забезпечити необхідну точність при максимальній продуктивності.

Зазначені обставини і завдання в повній мірі відносяться до формування та остаточної токарної обробки ступінчатих отворів, в деталях машин. Питання структурно-параметричній оптимізації формування ступінчатих валів розглянуті в роботах [4, 5], а проблема побудови оптимального технологічного процесу обробки ступінчатих отворів на даний час глибоко не досліджена.

У даній роботі зроблено спроби структурної оптимізації технологічних переходів для формування і остаточної обробки ступінчатих отворів в корпусних та інших деталях машин.

## 1. Особливості токарної обробки ступінчатих отворів

### 1.1. Оптимізація технологічних процесів

Підвищення ефективності машинобудівних виробництв нерозривно пов'язане з вдосконаленням технології виробництва виробів. Проектування технологічних процесів вимагає врахування великої кількості факторів, що характеризують безліч елементів зі складними і різноманітними зв'язками між ними, що змінюються в часі і просторі. При цьому часто виникає завдання вибору серед безлічі варіантів найбільш раціонального за певним критерієм і забезпечує задані параметри якості виробів [6].

В умовах ручного проектування нових технологічних процесів немає можливості розробляти і аналізувати велику кількість варіантів, оскільки це пов'язано зі значною трудомісткістю. Вирішення подібних завдань стає можливим при створенні систем САПР ТП. Ці системи, поряд із значним скороченням термінів проектування, дозволяють істотно підвищити якість проектних рішень шляхом оптимізації прийнятих рішень на всіх етапах технологічного проектування.

Оптимізація - це процес знаходження екстремального значення деякої кількісної величини проектованого об'єкта, що подається у вигляді функції. Якщо ця функція характеризує позитивні властивості об'єкта, то знаходиться максимальне її значення, якщо негативні - то мінімальне. Зазвичай в інженерній практиці використовується термін «оптимальне рішення», під яким розуміється найкраще з деякого безлічі рішення, яке задовольняє усім вимогам, що пред'являються до проектного об'єкту [7].

Щодо проектування технологічних процесів питання оптимізації технічних рішень ускладнені труднощами побудови математичних моделей аналізованих об'єктів, що пов'язано з низьким рівнем формалізації існуючих методів проектування нових технологічних процесів. При цьому головним недоліком діючих методів оптимізації технологічних процесів є те, що для



функції мети і технічних обмежень не встановлено залежності, які враховували б усі чинники і охоплювали б усі можливі випадки. Навіть з введенням спрощень поки не вдається отримати загальні математичні моделі технологічних процесів виготовлення будь-якого типу деталей для різних виробничих умов.

Основною метою технологічного процесу або його елементу зазвичай є забезпечення заданих характеристик якості виробу найбільш продуктивним шляхом при мінімальних витратах. Звідси випливає необхідність у встановленні двох головних критеріїв оптимальності: максимальної продуктивності і мінімальної собівартості. Залежно від виду та рівня оптимізації технологічних процесів можуть використовуватися й інші критерії, об'єднані в групи економічних, техніко-економічних, технологічних і експлуатаційних критеріїв.

Важливим завданням при побудові математичних моделей технологічних процесів є вибір і опис технічних обмежень, що враховують дії різних факторів описуваного процесу і пов'язаних з впливом на нього різних параметрів виробництва (предмет виробництва, характеристики вихідної заготовки, обладнання, технологічного оснащення та ін.).

При комплексному підході до оптимізації ТП слід розрізняти два види оптимізації: структурну і параметричну, які спрямовані на виконання загального положення.

Чим продуктивніша і економічна операція або ТП в цілому, тим вони ефективніші [8].

Залежно від виду та рівня оптимізації використовувані критерії оптимальності можна об'єднати в такі групи:

1. Економічні: мінімальна собівартість, найменші виробничі витрати, найбільший прибуток, рентабельність.
2. Техніко-економічні: максимальна продуктивність, найменш штучний час, ККД обладнання, надійність роботи технологічної системи, верстатомісткість виробу, стабільність ТП обробки.

3. Технологічні: точність виготовлення, показники якості поверхонь, фізико-хімічні властивості виробу, стійкість інструменту.

4. Експлуатаційні: зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість, корозійна стійкість та ін.

5. Інші: психологічні, естетичні, екологічні.

Основними, при вирішенні задач оптимізації ТП, є економічні та техніко-економічні критерії оптимальності, оскільки в основі розробки конструкції виробу і технології його формування лежать два принципи: технологічний і експлуатаційний.

### 1.1.1. Критерій максимальної продуктивності і найменшого штучного часу.

Продуктивністю технологічного обладнання називається кількість оброблюваного продукту за одиницю часу. Штучна продуктивність  $\Pi$  (шт./хв) на операції може бути визначена величиною, зворотною штучно-калькуляційному часу ( $t_{шт.к}$ ) на цю операцію [9]

$$\Pi = \frac{1}{t_{шт.к.}} \quad (1.1)$$

$$t_{шт.к.} = t_{шт} + \frac{T_{н.з.}}{n}; \quad t_{шт.} = t_o + t_a + t_{обсл.} + t_{отд.}; \quad t_{обсл.} = t'_{обсл.} + t_{зм}.$$

де  $t'_{обсл.}$  - час, який не залежить від режимів різання;

$t_{зм}$  - час, що витрачається на зміну і налаштування інструменту.

Аналіз елементів  $t_{шт}$  показує, що від режимів обробки залежать  $t_o$  (або  $t_m$ ) і частина часу  $t_{обсл.}$ , що витрачається на зміну і налаштування інструменту.

Якщо підставити  $t_{шт.к}$  в (1.1), формула набуде вигляду

$$\Pi = \frac{1}{(t_m + t_{см}) + (t_a + t_{обсл.} + t_{отд.} + \frac{T_{н.з.}}{n})} = \frac{1}{t_{шт.к.р.} + t_{шт.к.н.}}; \quad (1.2)$$

де  $t_{шт.к.р}$  і  $t_{шт.к.н}$  - частини штучно-калькуляційного часу, відповідно залежать і не залежать від режимів різання.

Таким чином, штучна продуктивність, що залежить від режимів різання, визначається величиною  $t_{ум.к.р} = t_m + t_{зм}$ . Машинне час ( $t_m$ ) в загальному вигляді визначається з виразу

$$t_m = t_p + t_x, \quad (1.3)$$

де  $t_p$  і  $t_x$  - частини машинного часу, що витрачаються відповідно на робочий і холостий хід.

Для найбільш поширених методів обробки металів різанням (точіння, свердління, фрезерування)  $t_p$  знаходиться з виразу

$$t_p = \frac{L \cdot i}{n \cdot s} = \frac{L \cdot h}{n \cdot s \cdot t}, \quad (1.4)$$

де  $L$  - довжина оброблюваної поверхні;

$h$  - знімається припуск;

$n$  - частота обертання (деталі або інструменту);

$s$  - подача;

$t$  - глибина різання.

Час зміни і налаштування інструменту, наведене до однієї деталі,

$$t_{зм} = \frac{T_{зм} \cdot t_p}{T}, \quad (1.5)$$

де  $T_{зм}$  - час, що витрачається на кожну зміну інструменту,

$T$  - період стійкості інструменту.

При  $t_x = 0$ ,

$$t_{ум.к.р.} = t_p + \frac{T_{зм} \cdot t_p}{T} = \frac{L \cdot h}{n \cdot s \cdot t} \cdot \left(1 + \frac{T_{зм}}{T}\right). \quad (1.6)$$

Критерії оптимальності, максимальна продуктивність і найменший штучний час виражаються залежністю, в яку керовані змінні  $n$ ,  $s$ ,  $t$  входять в явному вигляді і яка може бути використана при побудові математичної моделі. Недоліком цього критерію є те, що він враховує тільки витрати живої праці і не враховує витрати матеріалізованої (минулої) праці.

### 1.1.2. Критерій мінімальної собівартості.

Цей показник охоплює більш широке коло витрат суспільної праці і, поряд з витратами живої праці, враховує витрати минулої праці, матеріалізованого у засобах виробництва. Цехова собівартість технологічної операції без врахування витрат на заготівлю визначається виразом

$$C_{оп} = C_{з.с} + C_a + C_{рем} + C_{ен} + C_в + C_{пр} + C_{ін} + C_n, \quad (1.7)$$

де  $C_{з.с}$  - заробітна плата верстатників;

$C_a$  - амортизаційні відрахування на заміну обладнання;

$C_{рем}$ ,  $C_{ен}$ ,  $C_в$ ,  $C_{пр}$ ,  $C_{ін}$ ,  $C_n$  - витрати на ремонт верстата, силову електроенергію, допоміжні матеріали, амортизацію і ремонт пристосувань, амортизацію, ремонт і заточування інструментів, експлуатацію приміщення.

Сумарна собівартість обробки (рис. 1.3, крива 4) визначається трьома видами витрат:

1) витрати, які не залежать від режимів різання (пряма 1) при виконанні операції;

2) витрати, що залежать від часу обробки, які зменшуються зі скороченням машинного часу (крива 2; всі витрати, що знижуються зі зменшенням  $t_m$ , за винятком витрат на інструмент);

3) витрати, що збільшуються з ростом продуктивності обробки (крива 3; інструментальні витрати, що залежать від режимів обробки, інструментального та оброблюваного матеріалів).

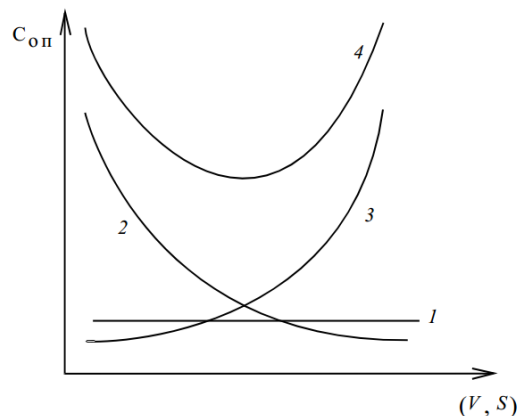


Рисунок 1.1. Залежність собівартості обробки від швидкості різання  $V$  або подачі  $S$ .

Елементи технологічної собівартості можна розділити на дві групи, одна з яких не залежить від режимів різання ( $C_{рем}, C_в$ ), а друга ( $C_{з.с}, C_a, C_{ен}, C_{пр}, C_{ин}, C_n$ ) залежить.

Друга група елементів собівартості пропорційна  $t_{ум}$ , тому її доцільно привести до 1 хв роботи обладнання ( $C'_{з.с}, C'_a, C'_{ен}, C'_{пр}, C'_{ин}, C'_n$ )

Тоді собівартість операції, що залежить від режимів різання, можна знайти з виразу

$$C_{оп.пер} = t_{ум.к.р.} \cdot (C'_{з.с.} + C'_a + C'_{ен.} + C'_{пр.} + C'_n) + C'_{ин.} \quad (1.8)$$

де  $C'_{ин}$  – інструментальні витрати, приведені до однієї деталі.

$$C'_{ин} = \frac{M}{g}. \quad (1.9)$$

$$M = \frac{S_{ин}}{n_T} + C_{пер} + C_{зам.ин}; \quad (1.10)$$

де  $M$  - інструментальні витрати приведені до одного періоду стійкості;

$S_{ин}$  - покупна вартість інструменту;

$n_T$  - кількість періодів стійкості,

$C_{пер}$  - вартість переточування інструменту, наведена до одного періоду стійкості;

$C_{зам.ин}$  - вартість заміни інструменту, наведена до одного періоду стійкості;

$g$  - число деталей, оброблених за період стійкості  $g = T/t_p$ .

Після підстановки (1.8) в (1.9) виходить вираз для визначення критерію оптимальності - мінімальної собівартості.

При вирішенні завдань оптимізації процесів механічної обробки часто виникає необхідність враховувати кілька суперечливих цілей. У цих випадках використовуються узагальнені критерії, які враховують ступінь досягнення всіх цілей в сукупності, відображаючи їх відносну значимість, виходячи із загальних цілей. Ці критерії називають цільовою функцією. Узагальнені критерії оптимізації ТП знаходять застосування при комплексному підході, при

якому поряд з показниками продуктивності і собівартості враховується ряд додаткових показників, які в певних умовах можуть стати основними. Застосовують наступні узагальнені критерії  $F(x)$  [10]:

- адитивний критерій:

$$F(x) = \sum_{j=1}^k \alpha_j \cdot K_j(x); \quad (1.11)$$

де  $x$  - керовані параметри;

$\alpha_j$  - вагові коефіцієнти, що відображають ступінь важливості окремих цілей;

$K_j(x)$  - окремі критерії;

$k$  - число окремих критеріїв;

- мультиплікативний критерій:

$$F(x) = \prod_{j=1}^k (K_j(x))^{\alpha_j}; \quad (1.12)$$

– кон'юнктивний критерій:

$$F(x) = \max_{1 \leq j \leq k} \alpha_j \cdot K_j(x); \quad (1.13)$$

– дизкон'юнктивний критерій:

$$F(x) = \min_{1 \leq j \leq k} \alpha_j \cdot K_j(x). \quad (1.14)$$

При виділенні найважливішим критерієм з набору окремих критеріїв  $K_j(x)$  вибирається один, який приймається за узагальнений. Решта критеріїв з набору розглядаються як критерії допустимості.

При отриманні узагальнених критеріїв важливим є визначення значущості окремих критеріїв  $\alpha_j$  (вагових коефіцієнтів).

При цьому кращому критерію з набору повинен відповідати більший ваговий коефіцієнт, який встановлюється експертним шляхом. Причому

$$\sum_{j=1}^k \alpha_j = 1.$$

Окремі критерії, що мають розмірність, призводять до безрозмірного

вигляду. Це дає можливість об'єднувати неоднорідні величини.

## 1.2. Види оптимізації процесів механічної обробки

При комплексному підході слід розрізняти два види оптимізації ТП, виконуваних на різних етапах технологічного проектування по ГОСТ 14.301-83 (табл. 1.1) [11]: структурну і параметричну оптимізацію.

Таблиця 1.1.

### Види оптимізації на різних етапах проектування ТП

Етап проектування ТП	Вид оптимізації	
	Структурна	Параметрична
1. Аналіз вихідних даних для розробки ТП	-	-
2. Вибір діючого типового, групового ТП або пошук аналогів одиничного ТП	+	-
3. Вибір виду і методів виготовлення вихідної заготовки	+	-
4. Вибір технологічних баз	+	-
5. Складання технологічного маршруту обробки	+	-
6. Розробка технологічних операцій	+	+
7. Нормування ТП	-	+
8. Визначення вимог техніки безпеки	-	-
9. Розрахунок економічної ефективності ТП	+	+
10. Оформлення технологічної документації	-	-

Виділені види оптимізації взаємопов'язані. Так, при параметричній оптимізації необхідно прийняти рішення про вибір структури відповідного рівня. У той же час структурна оптимізація вимагає знання значень параметрів, що входять до відповідної структури [12, 13].

Більшість робіт в області оптимізації ТП зачіпає оптимізацію некерованих і керованих параметрів окремих елементів ТП. При цьому

вважається, що структура ТП, зв'язку та функції окремих елементів, що входять до них, обрані заздалегідь. Вибір структури ТП характеризується низькою формалізацією при досить високій багатоваріантності рішень. Недостатня увага до структурної оптимізації ТП пов'язана з тим, що творчі здібності людини при вирішенні цих завдань перевершують можливості ЕОМ [14, 15]. У той же час значення правильного вибору структури багато в чому перевершує ефект від параметричної оптимізації.

Завдання вибору оптимальної структури полягає в пошуку структури, яка найкращим чином (до обраного критерію) виконувала б деяку задану сукупність функцій при заданих умовах функціонування. Рішення задач структурної оптимізації зазвичай виконується методом перебору. Такий підхід може бути застосований при вирішенні наступних завдань вибору [16]:

- виду заготовки і методів її виготовлення;
- стадій і етапів при проектуванні маршруту обробки;
- маршруту обробки;
- структури операцій;
- оптимальної технологічної операції;
- структури переходу;
- обладнання;
- системи верстатних пристосувань (СП);
- конструкції СП;
- конструкції ріжучого інструменту;
- багатоінструментального налагодження;
- вимірювальної системи та ін.

### **1.2.1. Вибір параметрів оптимізованих процесів обробки.**

Після вибору певної структури маршруту обробки, операції, переходу і різних видів технологічного оснащення повинно ставитися завдання їх параметричної оптимізації.

Параметрична оптимізація зазвичай виконується після вибору структури



переходу і виражається головним чином у визначенні оптимальних режимів різання ( $V, S, t$ ) з позицій деякого критерію [18]. До параметричної оптимізації можуть бути також віднесені:

- 1) розрахунки по вибору оптимальної конструкції і геометрії заточування різального інструменту;
- 2) розрахунки по вибору фізико-механічних властивостей ріжучих пластин інструментів;
- 3) розрахунки по вибору точних, силових і міцнісних параметрів верстатних пристосувань;
- 4) розрахунки з визначення оптимальних значень припусків і допусків на виконуваних розміри.

Основне завдання, яке вирішують при параметричній оптимізації ТП, - це визначення оптимальних режимів обробки, за яких забезпечується необхідна якість виробу при мінімальних затратах суспільної праці.

Режими обробки чинять основний вплив на вартість та продуктивність виконуваної операції, оскільки від них залежить штучний час, а значить, і частка собівартості, пропорційна часу. Значною мірою режими обробки визначають точність і якість оброблених поверхонь.

Режими обробки - це керовані змінні, ступінь впливу яких на основні показники оптимізованого процесу різна. Тому необхідно при виборі і побудові критеріїв оптимальності враховувати найбільш значущі режими обробки [19, 20].

На кафедрі "Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва" нашого університету проведена певна робота по структурно-параметричній оптимізації формування ступінчатих валів [4, 5]. Метою цієї роботи є теоретичні та технологічні особливості структурної оптимізації токарної операції розточування ступінчатих отворів.

Структурна оптимізація токарної операції розточування розглядається як процес, в результаті якого визначається послідовність робочих ходів ріжучого інструменту таким чином, щоб основний час обробки був мінімальним.



### 1.3. Особливості методики виконання структурно-параметричної оптимізації для формування ступінчатих поверхонь деталей

Поверхні одного і того ж ступеневого отвору можна отримати різними варіантами виконання технологічної операції (варіантами обробки). Кожен варіант представляє поєднання елементарних технологічних переходів, які необхідно виконати для здійснення операції.

На рисунку 1.2 показано два варіанти видалення припуску з різними технологічними переходами.

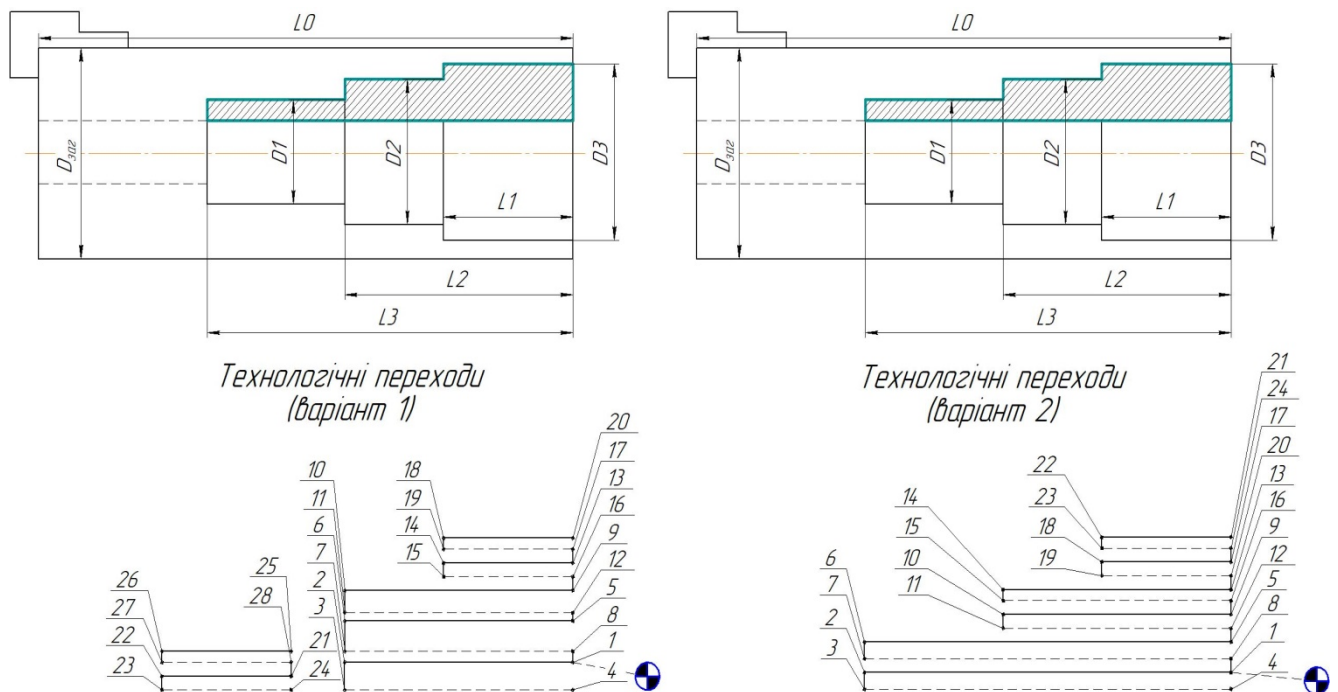


Рисунок 1.2. Приклади виконання технологічних переходів.

Крім того, для виконання кожного елементарного технологічного переходу необхідно встановити режими різання, що забезпечують найбільшу продуктивність при заданих вимогах до точності і якості формованих поверхонь.

Структурна оптимізація технологічних переходів в даній роботі розглядається як процес, в результаті якого визначається послідовність ходів ріжучого інструменту, щоб основний час обробки був мінімальним.

Загальні принципи прийнятої методики запозичені з робіт [4, 5] спрямованих на формування поверхонь ступінчатих валів.

Основою прийнятої методики структурної оптимізації є інформаційне і математичне забезпечення.

Інформаційне забезпечення включає в себе допоміжні дані, необхідні для автоматизації розрахунків, які знаходяться у відповідних базах даних створених на основі довідкової літератури.

Відомостями про оброблювані ступені отвору, крім основних розмірів, є квалітет точності, відхилення від правильної геометричної форми і положення ступенів один відносно одного шорсткість поверхонь.

Математичне забезпечення складається з комплексу аналітичних залежностей і математичних моделей, кожна з яких відповідає певному етапу виконання структурної оптимізації.

1. Поділ операційного припуску на різні припуски ступенів, які необхідно зняти для формування отвору. На цьому етапі реальна деталь представляється в оперативній пам'яті ЕОМ закодованою інформацією.

2. Перехід до реальної деталі, тобто уявлення закодованої інформації у вигляді набору координат, які задають положення кожного ступеня отвору в системі координат верстата з ЧПУ.

3. Рішення переборного завдання пошуку варіанту обробки з мінімальним основним часом, що не представляє особливої складності в реалізації і його можна виключити з подальшого розгляду.

#### **1.4. Висновки до розділу**

На підставі літературних джерел і науково-технічних публікацій, присвячених оптимізації механічної обробки деталей машин, проведено аналіз використання різних видів оптимізації.

Параметрична оптимізація не дивлячись на всі свої переваги вже давно розглядалася в різних роботах і методи підвищення продуктивності обробки з

використанням сучасного обладнання зводяться до збільшення подачі  $S$ , глибини різання  $t$ , і частоти обертання шпинделя  $n$  (швидкості різання  $V$ ). У першому і другому випадках зростають складові сили різання, а якість поверхні знижується. У третьому випадку стійкість інструменту падає швидше, ніж зростає швидкість різання і при якомусь малому її значенні простої верстата для зміни інструменту підвищать виграш в скороченні машинного часу, а продуктивність обробки почне зменшуватися [18]. Сучасна технологія металообробки, крім показників точності виробів і якості їх поверхонь, має на меті мінімізацію трудовитрат на здійснення процесів.

У зв'язку з цим, управління точністю обробки неможливе без оптимізації структури виконання технологічних ходів і переходів послідовності формування ступенів отвору.

Аналіз результатів дослідження в області структурної оптимізації показує на незавершеність даного наукового напрямку.

Таким чином, створення теоретичних і технологічних умов забезпечення точності формованих токарної обробкою поверхонь ступінчатих отворів з мінімальними витратами робочого часу є актуальною комплексною задачею вирішенню якої і присвячена дана робота.

Для поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити методику структурної оптимізації токарної обробки ступінчатих отворів, яка дозволить виявити найбільш прийнятні варіанти технологічних переходів, що забезпечують задану точність і якість формованих поверхонь з умовою мінімальних затрат часу.

2. Створити модель структурної оптимізації формування ступінчатих отворів на токарній операції.

3. Намітити і обґрунтувати шляхи високоефективної обробки отворів на сучасному обладнанні з використанням прогресивних методів обробки та ріжучих інструментів.

## 2. Теоретичні особливості структурної оптимізації токарної операції розточування

### 2.1. Теоретичні основи структурної оптимізації

Як відомо, припуск - це шар матеріалу, що видаляється з поверхні заготовки з метою досягнення заданих розмірів і властивостей оброблюваної поверхні, а операційний припуск - припуск, що видаляється із заготовки при виконанні однієї технологічної операції (рис. 2.1) [1].

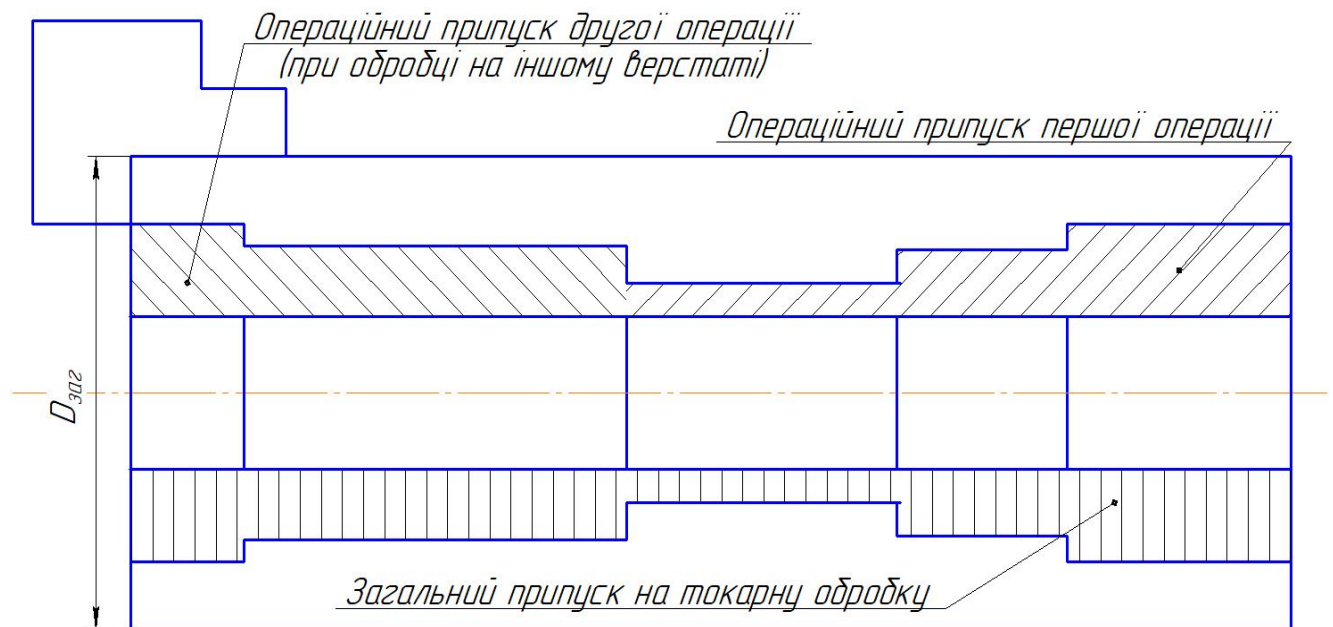


Рисунок 2.1. Схема до визначення операційного припуску.

Залежно від конструктивних особливостей деталі і способу базування заготовки видалення операційного припуску дозволяє обробити певну кількість ступенів отвору. Нехай  $n$  - число ступенів отвору, одержуваних після видалення операційного припуску.

На рисунку 2.2, а заготівля встановлена в патроні, що дозволяє повністю обробити відкриту щабель, в цьому випадку  $n = 3$ , а на рисунку 2.2, б показана та ж заготовка, встановлена в патроні при виконанні другої операції, для

зазначеної схеми закріплення  $n = 2$ . Таку обробку можна виконувати на одній операції за два встановлення. Для зменшення похибки базування обробку краще виконувати на верстаті з протишпінделем, це також скоротить час на переустановлення заготовки, що сприятиме додатковому зменшенню часу обробки.

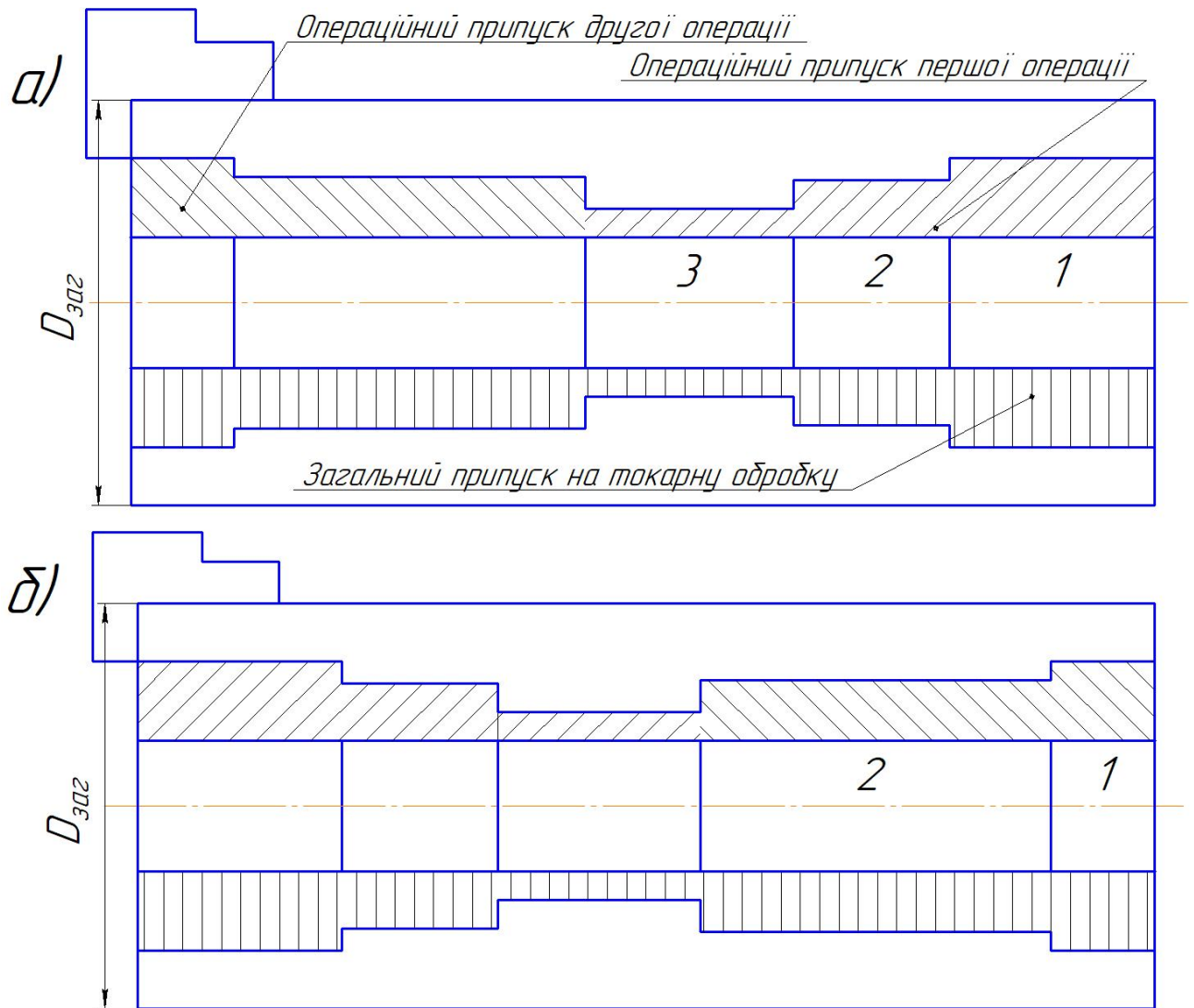


Рисунок 2.2. Варіанти поділу припуску на операційні припуски.

Для визначення кількості варіантів обробки на токарній операції при будь-якому  $n$  операційний припуск можна закодувати у вигляді елементарних частин  $Z_{ij}$ , кожна з яких обмежена утворювальними циліндрів і торцями ступенів отвору (рис. 2.3) [2].

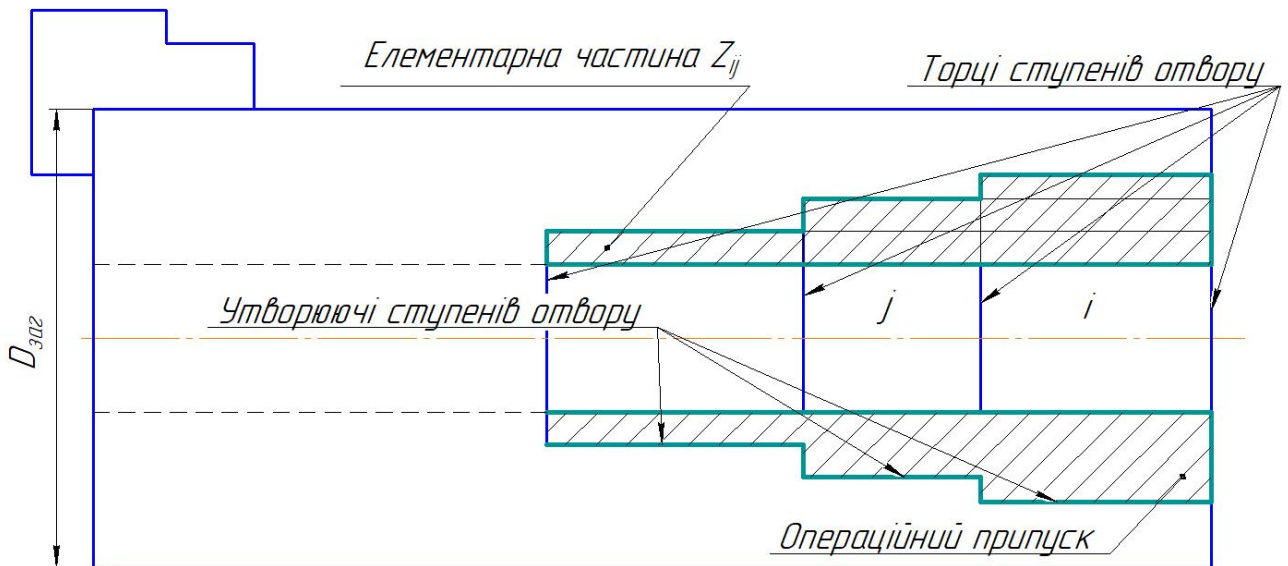


Рисунок 2.3. Схема утворення елементарних частин.

Елементарна частина  $Z_{ij}$  утворюється на перетині областей, обмежених прямими, що проходять через  $i, i + 1, \dots, i + n$ , торці та  $j, j + 1, \dots, j + n$  утворюють ступені отвору (рис. 2.4).

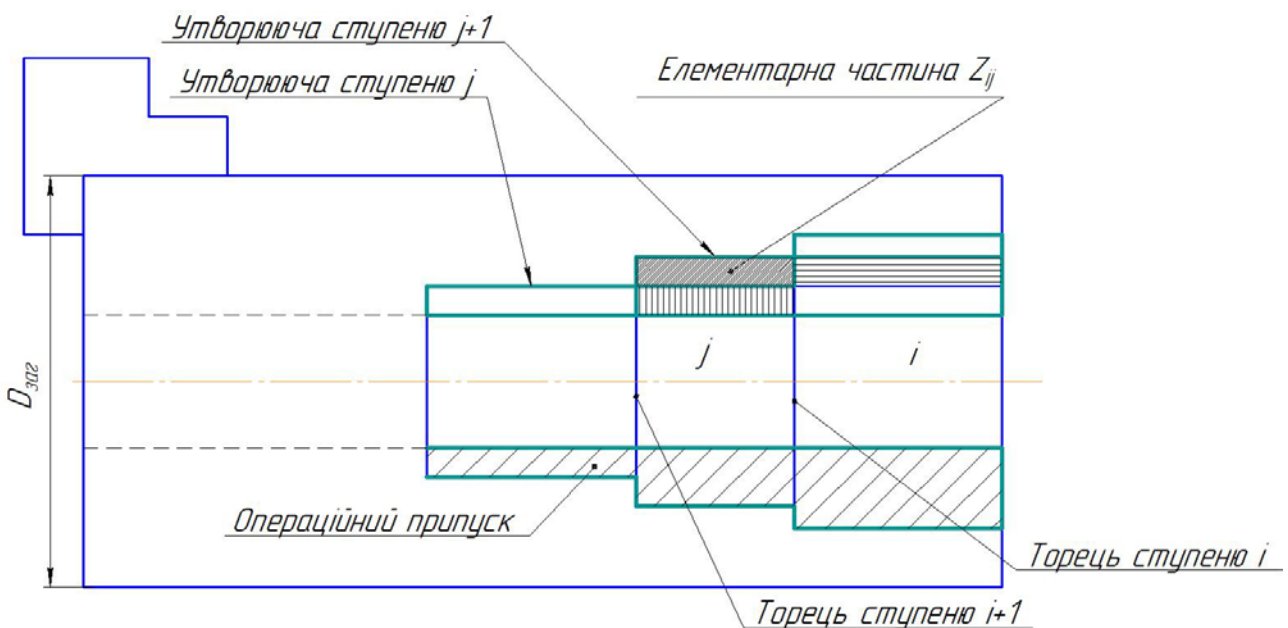


Рисунок 2.4. Схема утворення елементарної частини.

Приклад подання операційного припуску у вигляді елементарних частин  $Z_{ij}$ , при обробці трьох ступенів отвору ( $n = 3$ ) діаметрами  $D_1, D_2, D_3$  із заготовки діаметром  $D_{заг}$ , показано на рисунку 2.5.



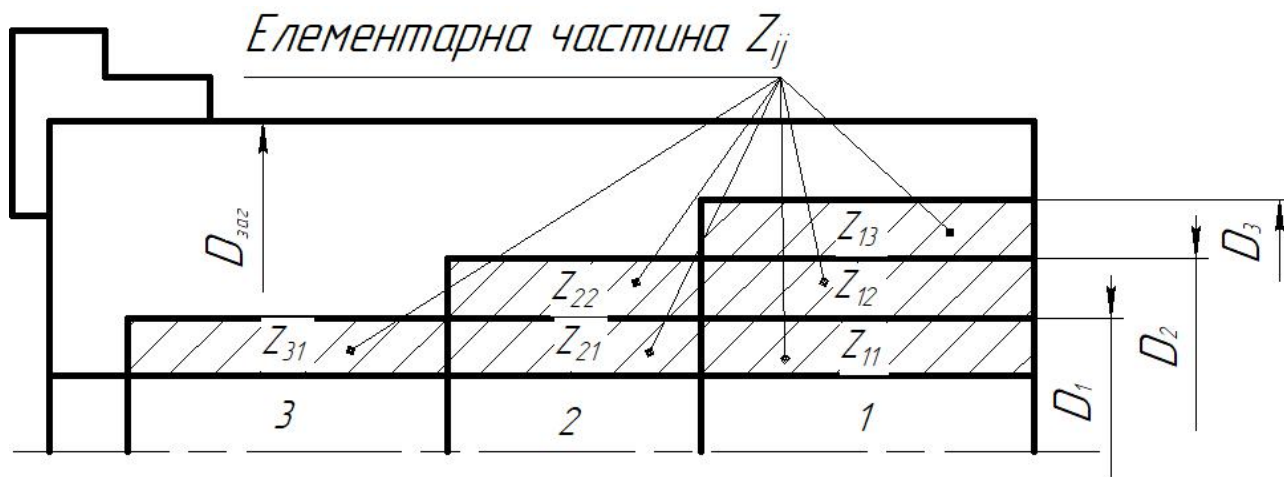


Рисунок 2.5. Схема поділу операційного припуску на елементарні частини ( $n = 3$ ).

Різні варіанти об'єднання елементарних частин  $Z_{ij}$ , в припуск  $k$ -го ступеня ( $1 \leq k \leq n$ ) можуть бути задані рівнянням

$$P_{klm} = \sum_{i=l}^k \sum_{j=k}^m (Z_{ij}), \quad (2.1)$$

де  $k$  - номер ступеня,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;

$l$  - номер крайнього правого ступеня, об'єднаного з  $k$ -им ступенем по довжині,  $l = 1, 2, \dots, k$ ;

$m$  - номер ступеня більшого діаметра із ступенів, об'єднаних припуском по довжині,  $m = k, k + 1, \dots, n$ .

З (2.1) випливає, що ступінь з номером  $k$  (нумерація ступенів виконується справа наліво) утворює  $k(n + 1 - k)$  припусків, кожен з яких назвемо припуском  $k$ -го ступеня (під припуском  $k$ -го ступеня, в цьому підрозділі, слід розуміти абстрактний код виду  $P_{klm}$ , про який згадувалося вище). Наприклад, для рисунка 2.5 щабель з номером 2 ( $k = 2$ ) утворює  $2(3 + 1 - 2) = 4$  припуску (рис. 2.6).

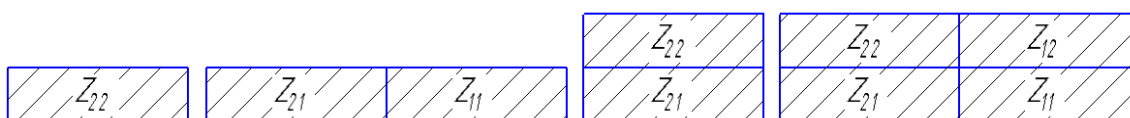


Рисунок 2.6. Різні варіанти зняття припуску при формуванні другого

ступеня отвору при  $n = 3$ .

Таким чином, для  $n = 3$  припуски ступенів мають наступну структуру:

- припуски першого ступеня –

$$P_{111} = \{Z_{11}\}, P_{112} = \{Z_{11}, Z_{12}\}, P_{113} = \{Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}\}, \text{ (рис. 2.7, а);}$$

- припуски другого ступеня –

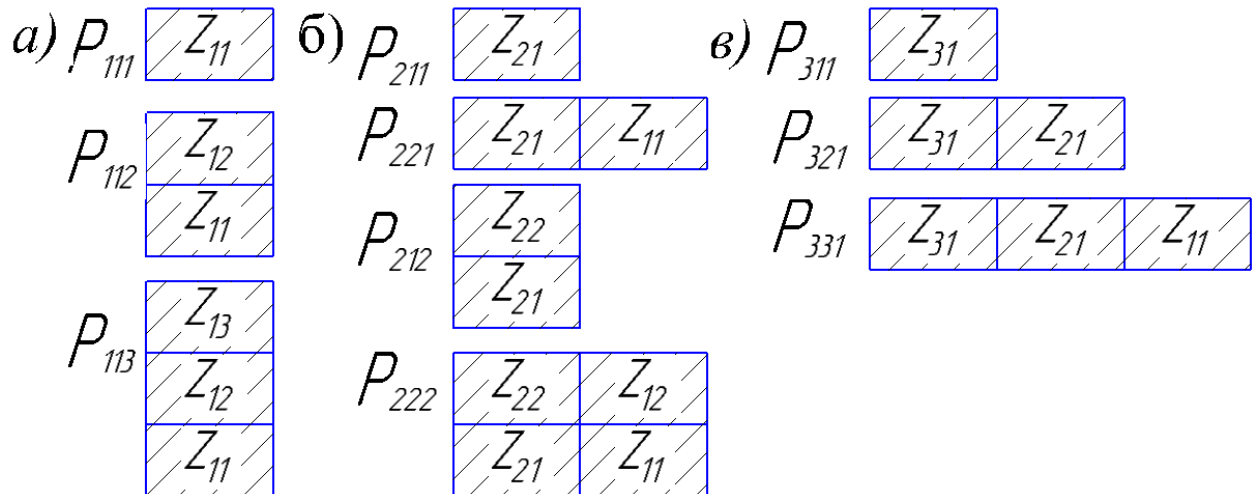
$$P_{111} = \{Z_{21}, Z_{22}\}, P_{222} = \{Z_{12}, Z_{11}, Z_{22}, Z_{21}\}, P_{211} = \{Z_{21}, Z_{12}, Z_{13}\},$$

$$P_{221} = \{Z_{21}, Z_{11}\}, \text{ (рис. 2.7, б);}$$

- припуски третього ступеня –

$$P_{331} = \{Z_{11}, Z_{21}, Z_{31}\}, P_{321} = \{Z_{31}, Z_{21}\}, P_{311} = \{Z_{31}\}, \text{ (рис. 2.7, в).}$$

Рівняння (2.1) кодує склад припусків кожного оброблюваного ступеня, які вона може утворювати, але не описує як ці припуски можуть бути об'єднані в певні варіанти обробки. Надалі варіант обробки представлений як спрощена множина  $\Omega = \{(P_{klm})_i\}$ , в якій знаходиться тільки по одному припуску кожного ступеня.



а - першого ступеня, б - другого ступеня, в - третього ступеня

Рисунок 2.7. Припуски ступенів отвору при  $n = 3$ .

Так, наприклад, з отриманих раніше результатів створені два варіанти обробки. Для цього взяті по одному припуску кожного ступеня (рис. 2.8) і об'єднані у відповідні варіанти обробки  $\Omega_3 = \{P_{212}, P_{113}, P_{311}\}$  і  $\Omega_4 = \{P_{212}, P_{311}, P_{113}\}$  (рис. 2.9).



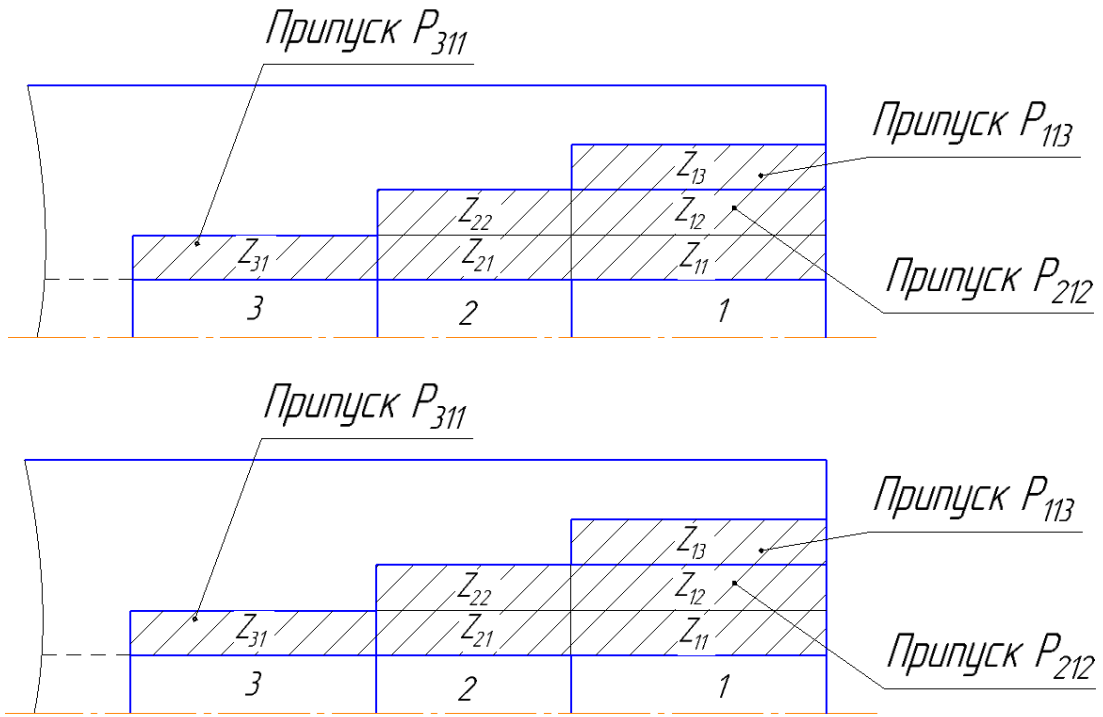


Рисунок 2.8. Приклад двох допустимих варіантів обробки при  $n = 3$ .

Далі розглянуті два інших варіанти обробки:

$\Omega_{16} = \{P_{331}, P_{221}, P_{112}\}$  і  $\Omega_{10} = \{P_{331}, P_{212}, P_{113}\}$  (рис. 2.9).

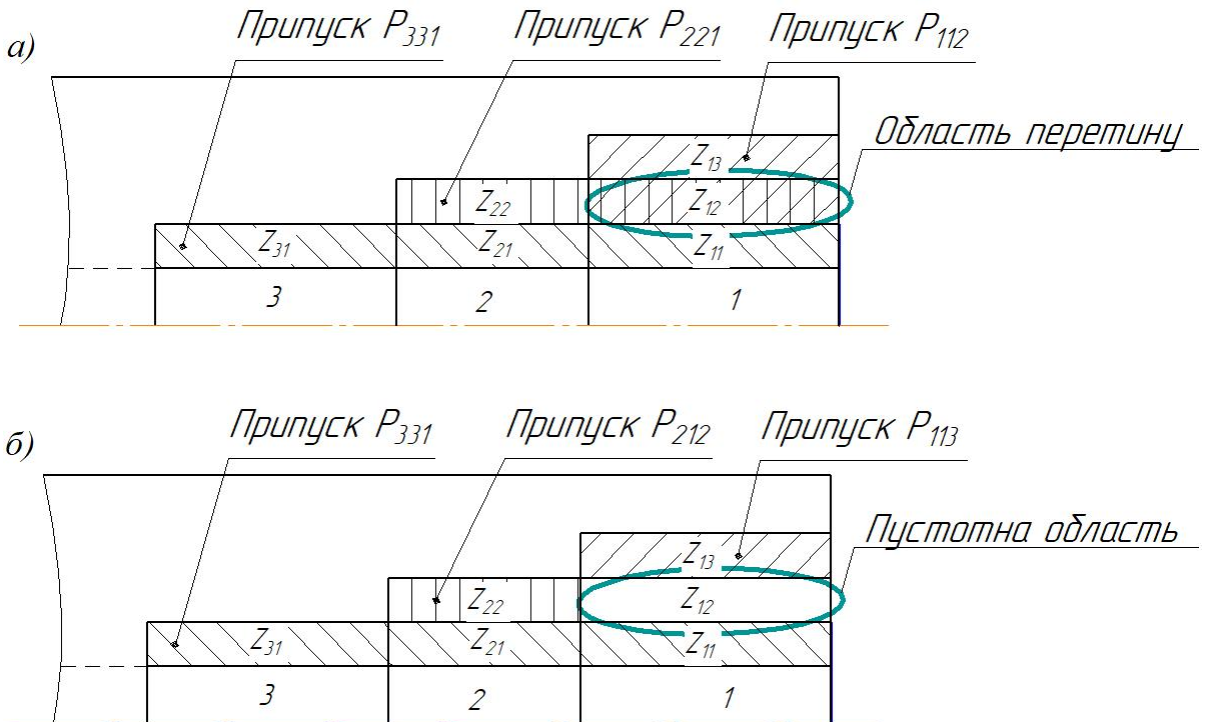


Рисунок 2.9. Приклад двох неприпустимих варіантів обробки.

Як видно з рисунка 2.9 такі варіанти неприпустимі. У першому випадку (рис. 2.9, а) є область перетину. Це означає, що ріжучий інструмент буде здійснювати переміщення на робочій подачі в області, де шар металу видалений на попередніх технологічних переходах. Цей варіант обробки призведе до додаткових витрат основного часу. У другому випадку (рис. 2.9, б) виникає пустотна область. У такій області залишається шар металу, що перешкоджає переміщенням різального інструменту, що може призвести до аварійної ситуації.

Вище, на рисунку 2.7 було зазначено, що для трьох оброблюваних ступенів перший ступінь утворює три припуски, друга - чотири, третя - три. Загальна кількість варіантів дорівнює добутку кількості припусків, які може утворювати кожен із ступенів, тобто  $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$ .

Очевидним є те, що для будь-якого варіанту обробки елементарна частина  $Z$  не може одночасно входити до складу двох і більше припусків ступенів (наприклад, варіант обробки  $\Omega_{16} = \{P_{112}, P_{212}, P_{331}\}$ , що складається з наступних припусків:  $P_{112} = \{Z_{12}, Z_{13}\}$ ;  $P_{211} = \{Z_{21}, Z_{22}\}$ ;  $P_{331} = \{Z_{11}, Z_{21}, Z_{31}\}$ ). В іншому випадку буде виникати ситуація, показана на рисунку 2.9, а. Таким чином, виникає задача визначення всіх допустимих варіантів обробки.

Вирішення цього завдання складається з двох етапів:

- 1) Побудова графа, вершинами якого є припуски ступенів;
- 2) Перевірка можливості утворення допустимого варіанту обробки з елементів множини  $\Omega_x$ , утвореної з кожної гілки графа.

Для першого етапу скористаємося матрицею (рис. 2.10), в якій число стовпців  $k$ -го рядка визначається залежністю  $k \cdot (n + 1 - k)$ , а число рядків дорівнює  $n$ .

Для її заповнення розроблений і застосовується алгоритм (рис. 2.11), заснований на рівнянні (2.1). Елементи матриці формуються з позначень (кодів) припусків ступенів, причому в перший рядок поміщаються припуски першого ступеня, в другий - припуски другого ступеня і т.д.

$P_{111}$	$P_{112}$	$P_{113}$	
$P_{213}$	$P_{212}$	$P_{223}$	$P_{222}$
$P_{313}$	$P_{323}$	$P_{333}$	

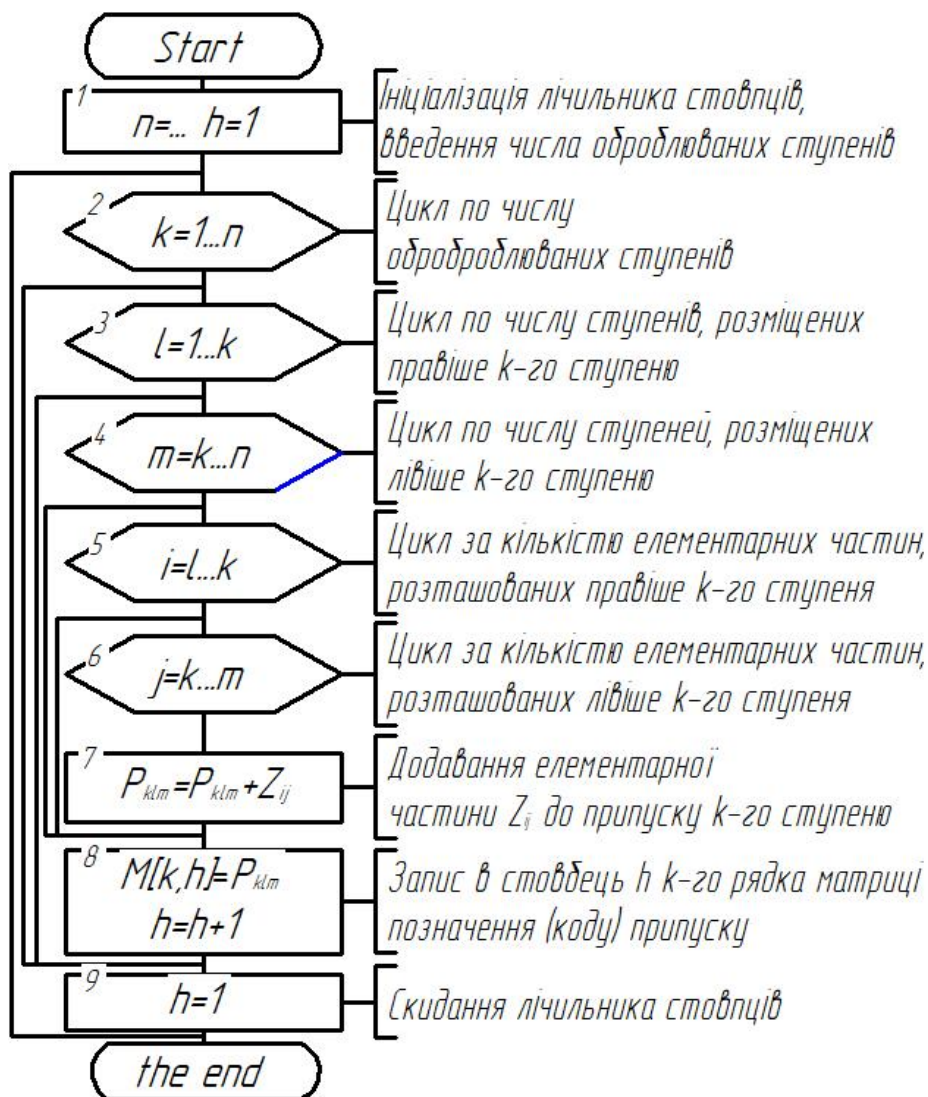
Рисунок 2.10. Приклад побудови графа для  $n = 3$ .

Рисунок 2.11. Блок-схема алгоритму формування матриці позначення (кодів) припусків оброблюваного ступеню.

Для побудови графа з матриці позначень (кодів) припусків послідовно кожен елемент кожного рядка «зв'язується» дугою з усіма елементами нижчого рядка. Таким чином, формуються вихідні дані для перевірки можливості

утворення допустимого варіанту обробки з множини  $\Omega_5$ . Результати побудови графа для трьох оброблюваних ступенів представлені на рисунку 2.12 (для трьох оброблюваних ступенів варіанти обробки представлені множинами  $\Omega_1$ - $\Omega_{36}$ ).

Для перевірки можливості кожної гілки графа утворювати допустимий варіант обробки будується матриця розміром  $(n \times n)$  (рис. 2.13). У цій матриці вище головної діагоналі лежать елементи, що представляють собою елементарні частини  $Z_{ij}$ .

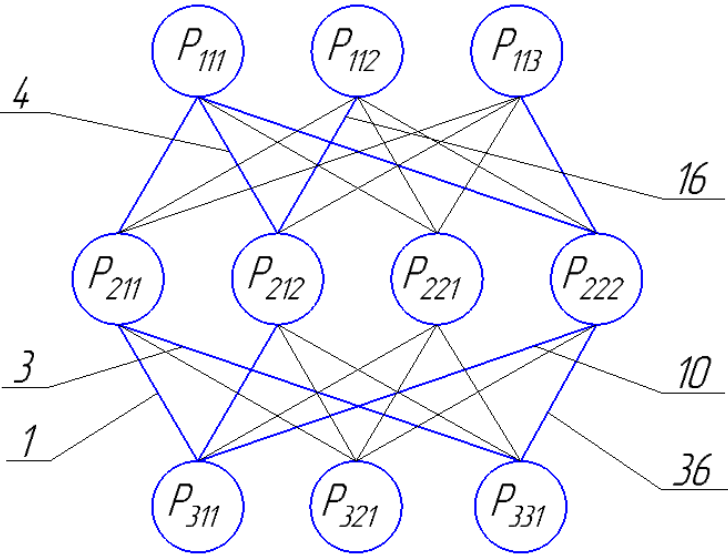


Рисунок 2.12. Граф позначень (кодів) припусків.

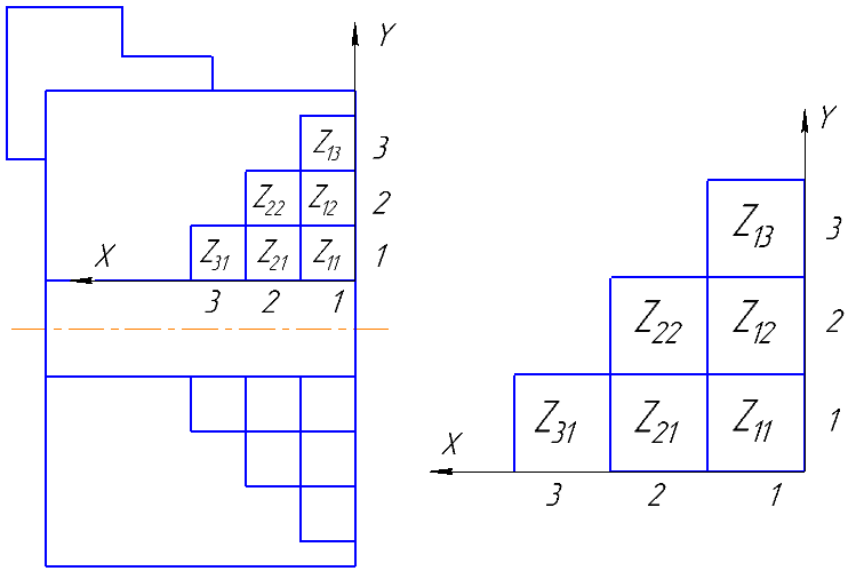


Рисунок 2.13. Матриця одиничних елементів.

Наприклад, елемент матриці  $X = 1$ ,  $Y = 3$  відповідає елементарній частині  $Z_{13}$ .

Тоді припуск  $k$ -го ступеня  $P_{klm}$  буде представляти собою прямокутник, що складається з елементів матриці, верхній лівий кут якого має координати  $X = k$ ,  $Y = k$ , а нижній правий -  $X = 1$ ,  $Y = m$  (рис. 2.14).

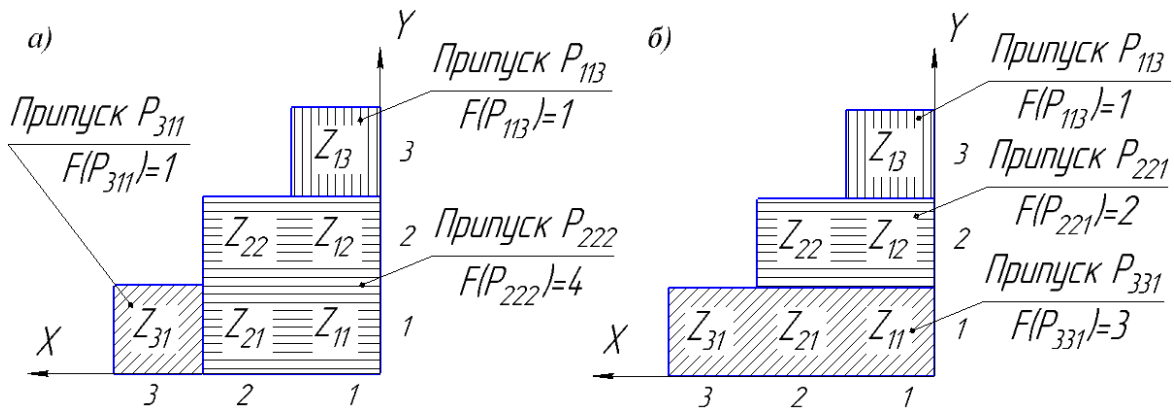


Рисунок 2.14. Представлення припусків ступенів у вигляді елементів матриці.

Оскільки кожна елементарна частина  $Z_{ij}$  займає в матриці (рис. 2.10) одну позицію, то її площа дорівнює одиниці, не залежно від розмірів ступенів отвору. У цьому випадку площа припуску будь-якого ступеня в матриці дорівнює кількості елементарних частин, що входять в даний припуск, а формула для визначення площі припуску ступеню має вигляд:

$$F(P_{klm}) = ((k - l) + 1) \cdot ((m - k) + 1). \quad (2.2)$$

Наприклад, площа припуску  $F(P_{331}) = 3$ , а площа припуску  $F(P_{221}) = 2$  (рис. 2.14).

Загальна площа  $F(n)$  для  $n$  ступенів дорівнює загальній кількості елементарних частин  $Z_{ij}$ :

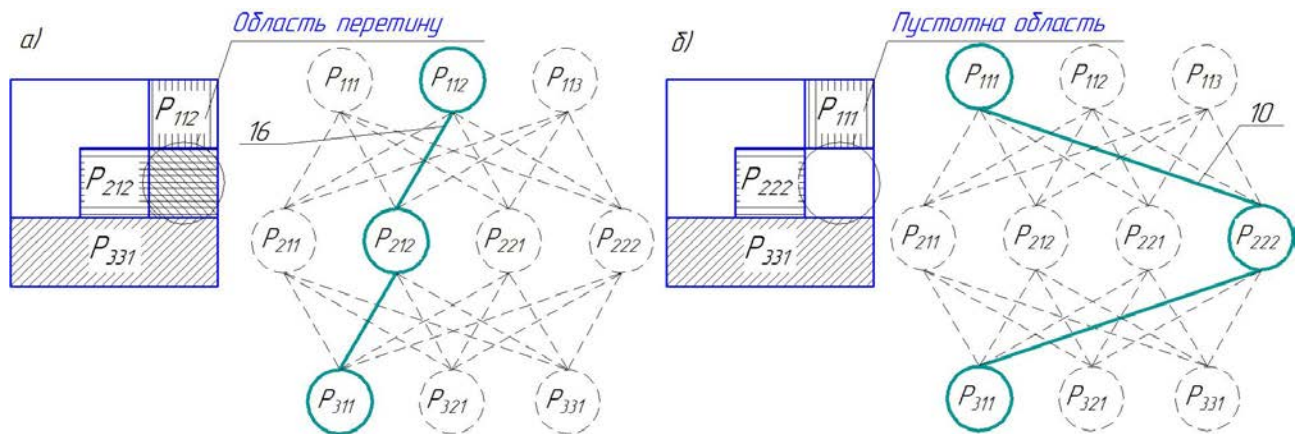
$$F(n) = \sum_{i=1}^n i, \quad (2.3)$$

або



$$F(n) = \frac{n^2 + n}{2}. \quad (2.4)$$

Далі розглянуті неприпустимі варіанти обробки, представлені на рисунку 2.15. Варіант обробки ступенів буде неприпустимим, якщо існує хоча б два пересічних припуски (що містять загальну частину  $Z_{ij}$ , (рис. 2.15, а) або сумарна площа припусків ступенів даного варіанту обробки не відповідає площі загального припуску  $F(n)$ , яка визначається за (2.4) (рис. 2.15, б).



а) утворення області перетину; б) утворення пустотної області

Рисунок 2.15. Приклади неприпустимих варіантів обробки і їх дуг в графі.

Необхідною умовою включення припуску ступеню в допустимий варіант обробки є відсутність у даного припуску елементарних частин, що входять в інші припуски ступенів аналізованого варіанта обробки. Для порівняння кодів двох припусків одного варіанта розроблена логічна функція перевірки на приналежність елементарних частин першого припуску другому. Логічна функція не залежить від умов, які враховують геометричні особливості поверхонь, необхідну точність обробки, якість поверхневого шару деталі, розмір партії, габарити деталі. Якщо припуск  $P_{klm}$  повинен містити фіксований набір елементарних частин ( $\{Z_{ij} \in P_{klm}\}$ ), то в загальному випадку логічна функція підпорядковується нижченаведеним умовам.

Припуск  $P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_s$  (рис. 2.16) не матиме спільного з даним припуском  $P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_s$  елементарних частин  $Z_{ij}$ , якщо він лежить правіше

(рис. 2.16, а) або вище розглянутого припуску  $Pk_r l_r m_r$ , (рис. 2.16, б) при  $k_r < k_w$ .  
 Тобто  $(k_r < k_w) \vee ((l_r > k_w) \wedge (m_w < k_r))$ .

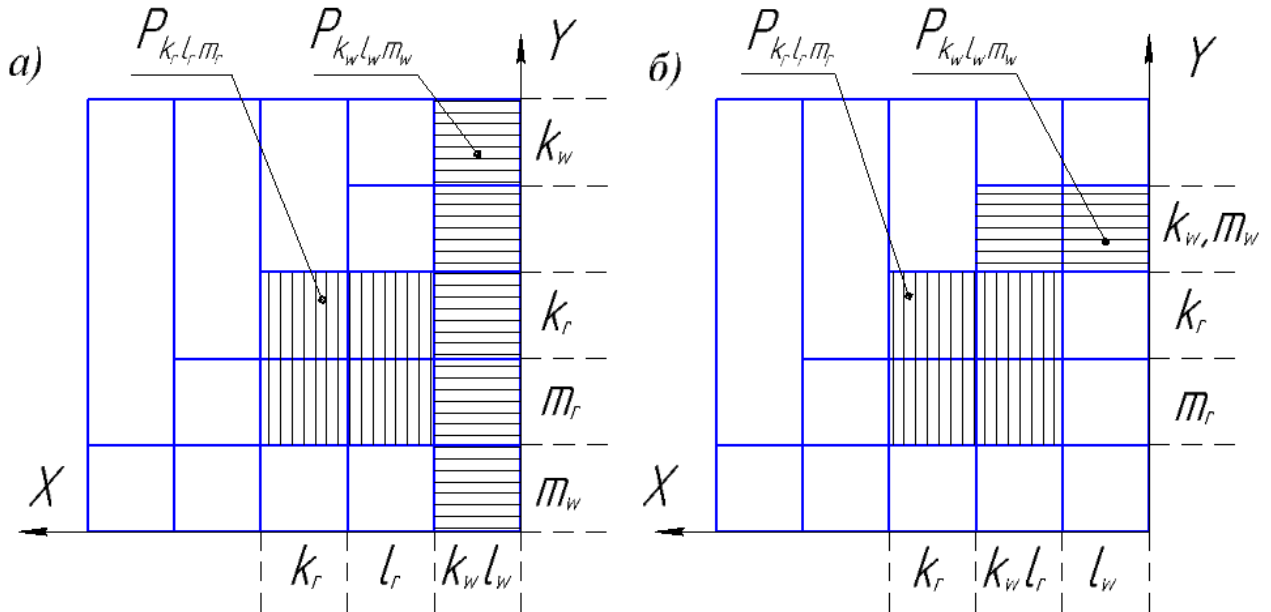


Рисунок 2.16. Схема до визначення логічної функції при  $k_r < k_w$ .

При  $k_r > k_w$ , припуск  $Pk_w l_w m_w \in \Omega_s$  (рис. 2.17) не матиме загальних з даним припуском  $Pk_r l_r m_r \in \Omega_s$  елементарних частин  $Z_{ij}$ , якщо він лежить вище (рис. 2.17, а) або правіше розглянутого (рис. 2.17, б). Тобто  $(k_r > k_w) \vee ((m_r < k_w) \wedge (l_w > k_r))$ .

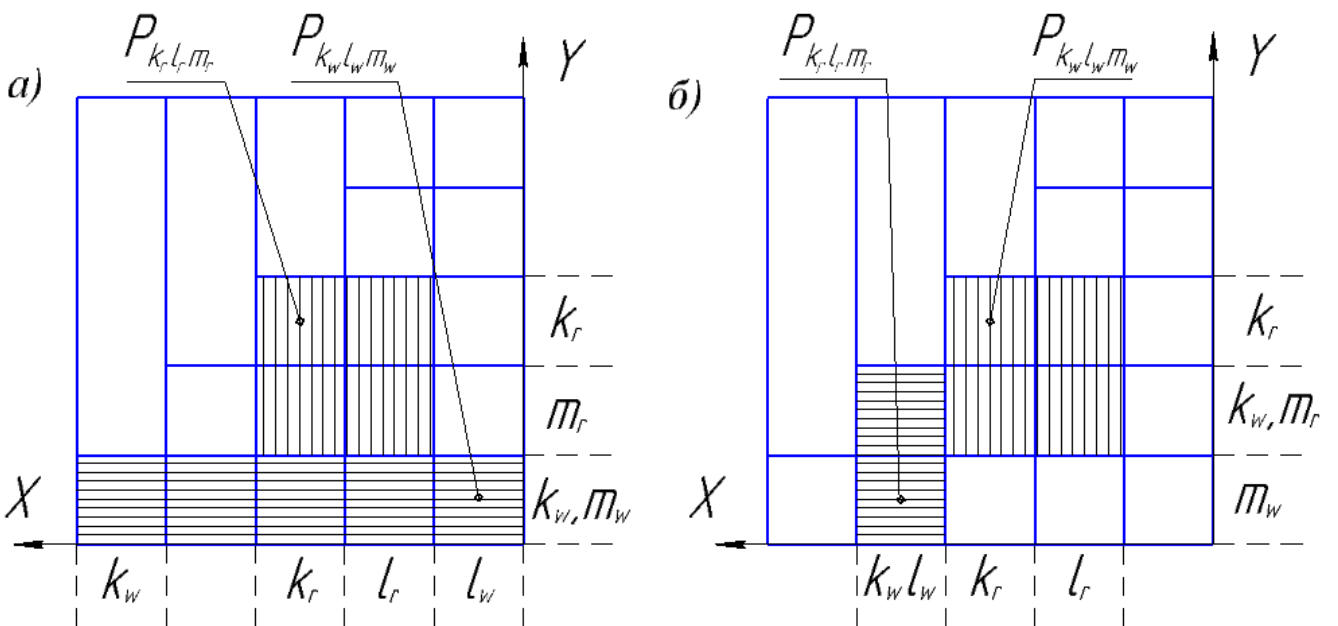


Рисунок 2.17. Схема до визначення логічної функції при  $k_r > k_w$ .



У загальному вигляді функція визначення допустимих варіантів обробки  $\Omega_{s\delta}$  має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{s\delta} = \bigcup_{i=1}^{n-1} \{P_{k_r l_r m_r}\}, \text{ при} \\ (k_r < k_w) \vee ((l_r < k_w) \wedge (m_w > k_r)) \vee \\ \vee (k_r < k_w) \wedge ((m_r > k_w) \vee (l_w < k_r)) = \text{ІСТИНА.} \\ P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_s, P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_s, w = r + 1..n; \\ \sum_{i=1}^n F((P_{klm})_i) = F(n), \text{ де } (P_{klm})_i \in \Omega_{s\delta} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Перевіряючи кожен гілку графа на рисунку 2.12, можна отримати список допустимих варіантів обробки. Однак припуски в цих варіантах обробки розташовуються по зростанню номера ступеню отвору, що не завжди відповідає тій послідовності, в якій вони повинні видалятися. Наприклад, для трьох оброблюваних ступенів один з варіантів обробки має вигляд  $\Omega_4 = \{P_{113}, P_{222}, P_{311}\}$ , що неприпустимо, оскільки припуск з кодом  $P_{113}$  не можна видалити перед припуском з кодом  $P_{222}$ . Крім цього один і той же варіант може бути базою для кількох варіантів обробки  $\Omega_{s,p}$ . Так, для трьох оброблюваних ступенів варіант обробки  $\Omega_3$  може мати два підваріанти обробки:  $\Omega_{3,1} = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$  (рис. 2.18, а) і  $\Omega_{3,2} = \{P_{222}, P_{113}, P_{311}\}$  (рис. 2.18, б).

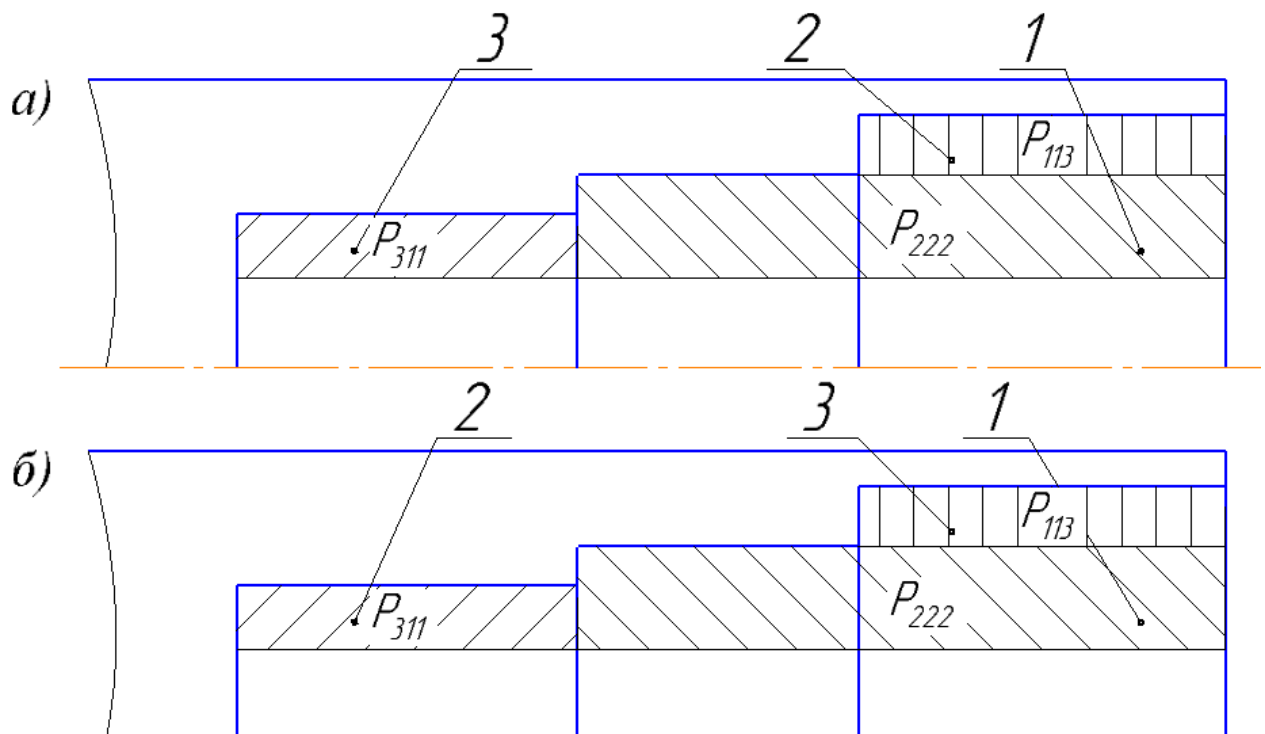


Рисунок 2.18. Визначення послідовності видалення припуску.

Тому, після визначення загального числа і структури варіантів, необхідно встановити послідовність видалення припусків в будь-якому вигляді. Спочатку потрібно визначити припуск, який буде видалений першим.

Першим в даній послідовності обробки, видаляється той припуск, у якого  $l$  має мінімальне значення ( $l = 1$ ), а  $m$  - максимальне значення ( $m = n$ ), де  $l$  - номер крайнього правого ступеню, об'єднаного з  $k$ -им ступенем по довжині,  $m$  - номер ступеню більшого діаметра із ступенів, об'єднаних припуском по довжині,  $m = k, k + 1 \dots, n$ .

Для варіанту обробки  $\Omega_3$  результат виконання цієї операції виглядає наступним чином:  $\Omega_3 = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$ . З решти  $n - 1$  припусків даного варіанту обробки утворюється вектор позначень (кодів) припусків. З елементів отриманого вектора послідовними перестановками будуються різні підваріанти обробки  $\Omega_{s,p}$  (рис. 2.19).

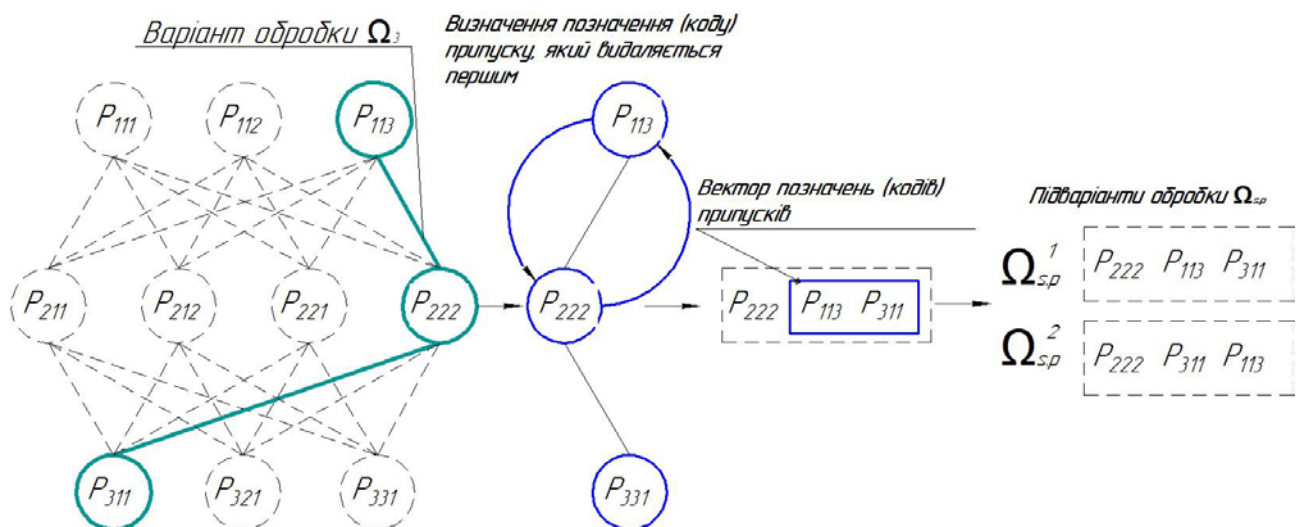


Рисунок 2.19. Схема утворення підваріантів з варіанта обробки.

Після всіх перестановок з варіанта обробки  $\Omega_3$  отримуємо два підваріанти обробки:  $\Omega_{3,1} = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$  і  $\Omega_{3,2} = \{P_{222}, P_{113}, P_{311}\}$ .

Для перевірки можливості вільного видалення припусків в тому порядку, в якому вони представлені множиною  $\Omega_{s,p}$  необхідно, щоб кожен наступний припуск не створював перешкод для видалення попереднього. Якщо

розглянутий припуск  $P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_{s,p}$  лежить нижче (рис. 2.20, а), ніж наступний за ним припуск  $P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_{s,p}$  ( $k_r < k_w$ ), то для вільного видалення розглянутого припуску необхідно, щоб виконувалася умова  $m_w > k_r$ , а якщо вище ( $k_r > k_w$ ) (рис. 2.20, б). У загальному вигляді умова вільного видалення припуску має вигляд:

$$((k_r < k_w) \wedge (m_w > k_r)) \vee ((k_r > k_w) \wedge (l_w > k_r)) = \text{ІСТИНА, при} \quad (2.6)$$

$$P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_{s,p}, P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_{s,p}, r = 1..n, w = r + 1..n$$

Якщо одна з перерахованих умов не виконується, то варіант обробки має неправильну структуру і не враховується в подальших розрахунках.

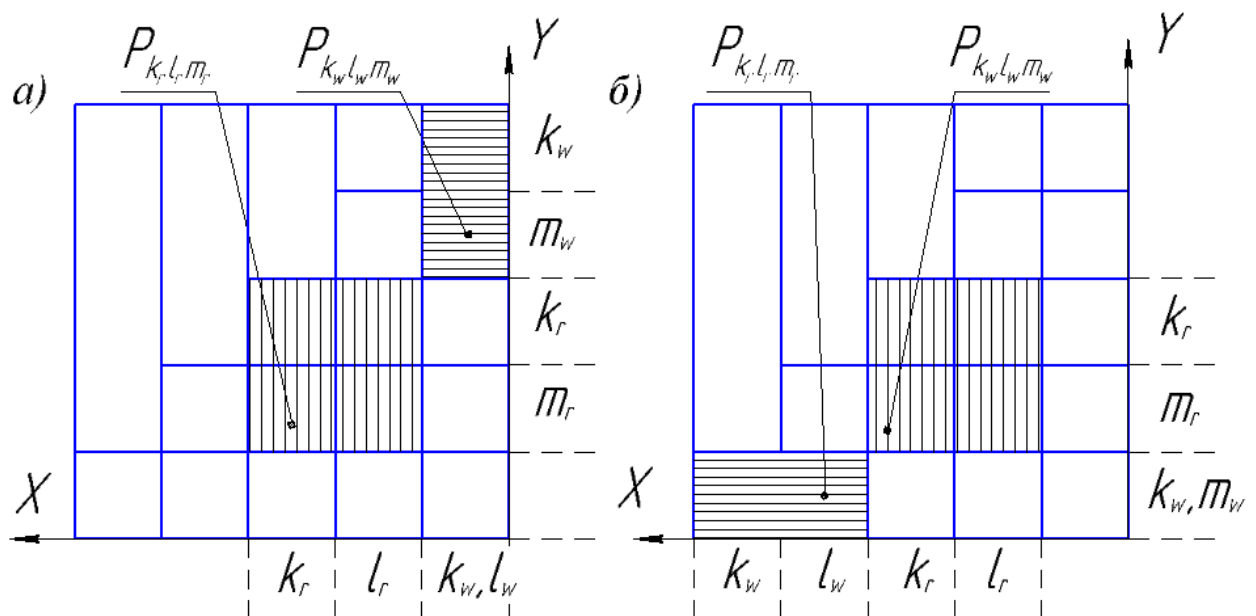


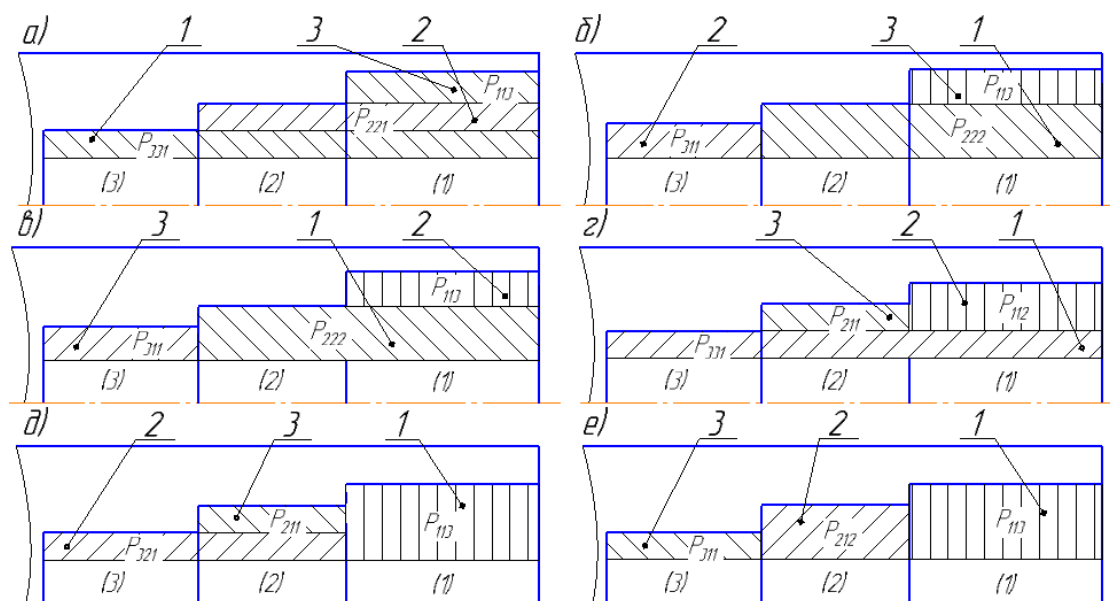
Рисунок 2.20. Схема до визначення вільного видалення припуску.

Функція визначення допустимих варіантів обробки (2.5) і умова вільного видалення припуску (2.6) визначають теоретичні основи структурної оптимізації, які дозволяють виявити допустимі варіанти обробки для будь-якого числа ступенів  $n$ . Залежність числа варіантів обробки від числа оброблюваних ступенів представлена в таблиці.

### Число варіантів обробки

Число ступенів, $n$	Число варіантів	
	Загальне	Допустимих
10	$10 \cdot 18 \cdot 24 \cdot 28 \cdot 30 \cdot 30 \cdot 28 \cdot 24 \cdot 18 \cdot 10 = 1,31682 \cdot 10^{13}$	3628800
9	$9 \cdot 16 \cdot 21 \cdot 24 \cdot 25 \cdot 24 \cdot 21 \cdot 16 \cdot 9 = 131681894400$	362880
8	$8 \cdot 14 \cdot 18 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 18 \cdot 14 \cdot 8 = 1625702400$	40320
7	$7 \cdot 12 \cdot 15 \cdot 16 \cdot 15 \cdot 12 \cdot 7 = 25401600$	5040
6	$6 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 6 = 512400$	720
5	$5 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5 = 14400$	120
4	$4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 4 = 576$	24
3	$3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$	6
2	$2 \cdot 2 = 4$	2

Згідно з отриманими теоретичним результатами для трьох оброблюваних ступенів з тридцяти шести варіантів обробки залишаються тільки шість допустимих (рис. 2.21).



1, 2, 3 - черговість зняття припуску, (1), (2), (3) - ступені

Рисунок 2.21. Варіанти обробки для трьох ступенів отвору.

На рисунку 2.21, а показано послідовність видалення припуску  $\Omega_{3,1} = \{P_{331}, P_{221}, P_{113}\}$ , аналогічно і для інших допустимих варіантів обробки.

Поняття варіанту обробки є абстрактним, оскільки містить коди припусків ступенів отвору і ніяк не пов'язане з реальними параметрами цих ступенів. Отже, виникає необхідність в аналітичних залежностях, що описують зв'язок коду припусків ступенів, варіанти обробки з реальними розмірами цих ступенів і координатною системою токарного верстата з ЧПУ. Такий зв'язок реалізують розглянуті нижче аналітичні залежності при обробці ступінчатих отворів на верстатах з ЧПУ.

## 2.2. Перехід від коду припуску до розмірів реальної деталі

Для того щоб задати положення будь-якого ступеня в системі координат верстата, необхідно ввести такі параметричні функції (рис. 2.22):

$Z_i$  - початкова координата по осі  $Z$ , мм;

$Z_k(P_{klm})$  - кінцева координата по осі  $Z$ , мм;

$L_p(P_{klm})$  - довжина обробки, мм;

$h_p(P_{klm})$  - величина припуску  $P_{klm}$ , мм;

$X_{\min}(P_{klm})$  - діаметр ступеню отвору після зняття припуску  $P_{klm}$ , мм;

$X_{\max}(P_{klm})$  - діаметр ступеню отвору до зняття припуску  $P_{klm}$ , мм.

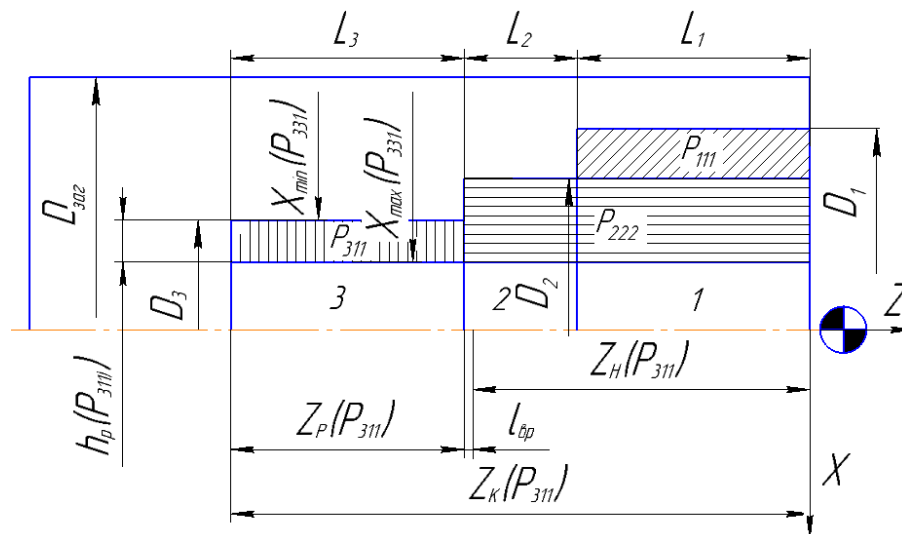


Рисунок 2.22. Параметри припусків ступенів.



Оскільки  $k$  - номер ступеню,  $l$  - номер крайнього правого ступеню, об'єднаного з  $k$ -им ступенем по довжині, а  $m$  - номер ступеню більшого діаметра зі ступенів, об'єднаних припуском по довжині, то справедливі такі залежності:

$$Z_u(P_{klm}) = \begin{cases} -l_{ep}, & \text{при } l = 1; \\ -1 \left( \left( \sum_{i=1}^{l-1} L_i \right) - l_{ep} \right) & \text{при } l > 1, \end{cases} \quad (2.6)$$

де  $l_{ep}$  - довжина врізання, мм;

$L_i$  - довжина  $i$ -го ступеня, мм.

$$Z_k(P_{klm}) = -1 \cdot \sum_{i=1}^{l-1} L_i, \quad \text{при } k \leq n. \quad (2.7)$$

$$h_p(P_{klm}) = \begin{cases} \frac{D_{m+1} - D_k}{2}, & \text{при } m < n; \\ \frac{D_{заг} - D_k}{2}, & \text{при } m = n, \end{cases} \quad (2.8)$$

де  $D_{m+1}$ ,  $D_k$  - діаметр відповідного ступеню отвору, мм;

$D_{заг}$  - діаметр заготовки, мм.

$$X_{\min}(P_{klm}) = D_k. \quad (2.9)$$

$$X_{\max}(P_{klm}) = \begin{cases} D_{m+1}, & \text{при } m < n; \\ D_{заг}, & \text{при } m = n. \end{cases} \quad (2.10)$$

Виходячи з (2.7) - (2.10) зміна координат і величини припусків при обробці  $k$ -го ступеня за допомогою одного з варіантів визначається системою

$$\begin{cases} X_{\min}(P_{klm}) < X \leq X_{\max}(P_{klm}); \\ X = X - 2 \cdot t; \\ Z_{\min}(P_{klm}) < Z \leq Z_k(P_{klm}); \\ 0 \leq h_p \leq h_p(P_{klm}); \\ h_p = h_p - t. \end{cases} \quad (2.11)$$

Система (2.11) описує зміну координат, але не дає уявлення про те, як розподіляється глибина різання  $t$  (мм) на кожен робочий хід. Причому розподіл глибини різання повинний бути таким, щоб основний час обробки мав мінімальне значення. Крім того, від глибини різання залежать такі параметри, як швидкість різання  $V$  (м/хв) і подача  $S_0$  (мм/об), які мають прямий вплив на продуктивність. Оскільки обладнання верстатів з ЧПУ дозволяє виконувати кожен елементарний перехід зі своїми режимами різання, то для визначення поєднання параметрів  $V$ ,  $S_0$ ,  $t$ , що забезпечують мінімальний основний час для кожного робочого ходу, необхідна математична модель параметричної оптимізації.

### 2.3. Моделювання структурної оптимізації розточувальної операції

Розроблена методика дозволила отримати число варіантів обробки і структуру припусків в залежності від числа оброблюваних ступенів (табл. 2.2).

Оптимальною буде та послідовність технологічних переходів, яка забезпечує найменший оперативний час  $T_{on}$ :

$$T_{on} = \sum_{p=1}^I (T_{op} + T_{sp}), \quad (2.12)$$

де  $T_{op}$  - основний час  $p$ -го елементарного переходу;

$I$  - загальне число елементарних переходів.

Основний час  $p$ -го переходу визначається за формулою:

$$T_{op} = \left( \frac{L_p}{S \cdot n} + \frac{L_p}{V_{xx}} \right), \quad (2.13)$$

де  $n$  - частота обертання шпинделя, хв<sup>-1</sup>;

$S$  - поздовжня подача, мм/об;

$V_{xx}$  - швидкість переміщення супорта при виконанні холостого ходу, мм/хв.

Загальна кількість елементарних переходів визначається як сума елементарних переходів необхідних для видалення кожного припуску. Число елементарних переходів припуску визначається як частка висоти припуску і глибини різання (рис. 2.23).

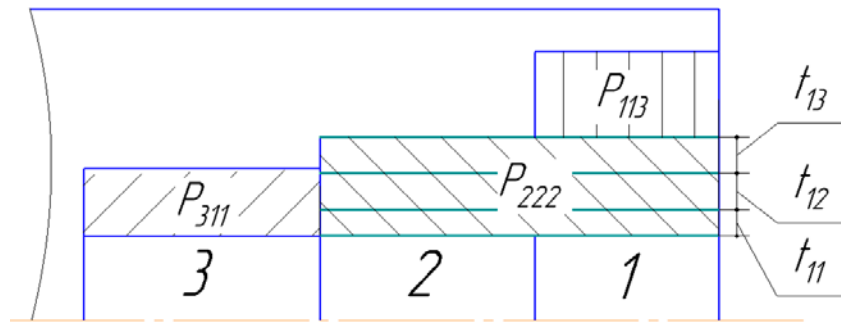


Рисунок 2.23. Поділ припуску ступенів на елементарні переходи.

Таким чином, для знаходження оптимального варіанту необхідно визначити оперативний час технологічної операції для кожної з можливих комбінацій.

На основі розробленої методики було проведено моделювання продуктивності для всіх можливих варіантів обробки трьох ступенів отвору при наступних умовах: матеріал ріжучої частини інструменту - Т15К6; параметри заготовок зразків - довжина обробки  $L = 120$  мм, діаметр -  $D_{заг} = 30$  мм; матеріал деталі - сталь 45; шорсткість  $Ra$  для всіх ступенів 2,5 мкм. Для простоти сприйняття варіанти обробки пронумеровані абстрактними цифрами від 1 до 6 (табл. 2.3).

На прикладі триступінчастого отвору, на рисунку 2.24-2.25 показані варіанти видалення припуску з використанням поперечних і поздовжніх ходів.

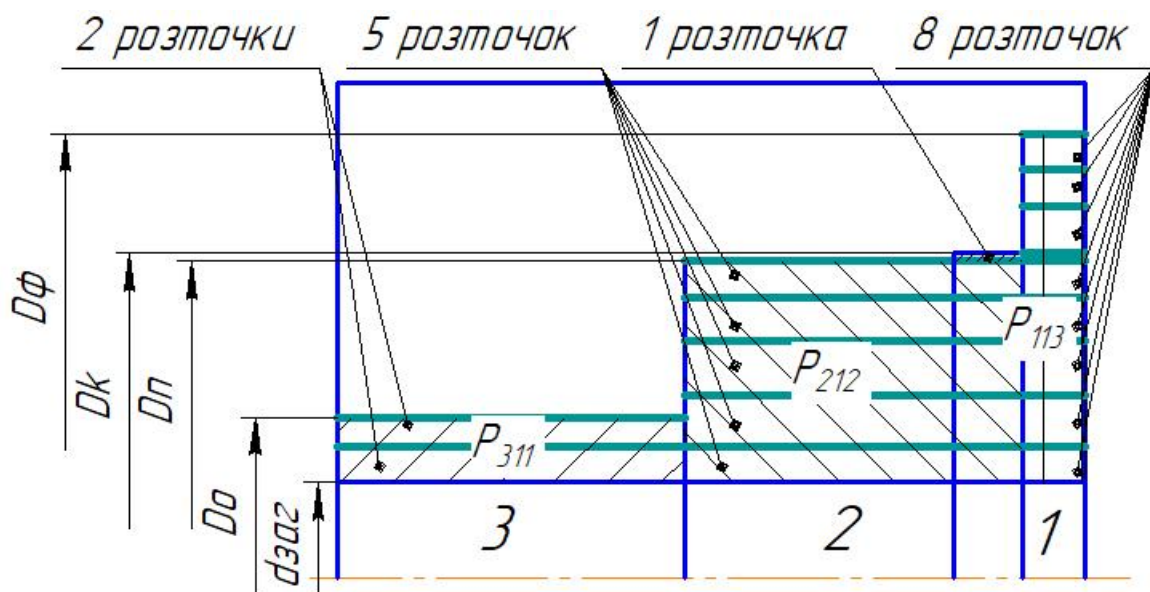


Рисунок 2.24. Варіант обробки при використанні поздовжніх ходів.

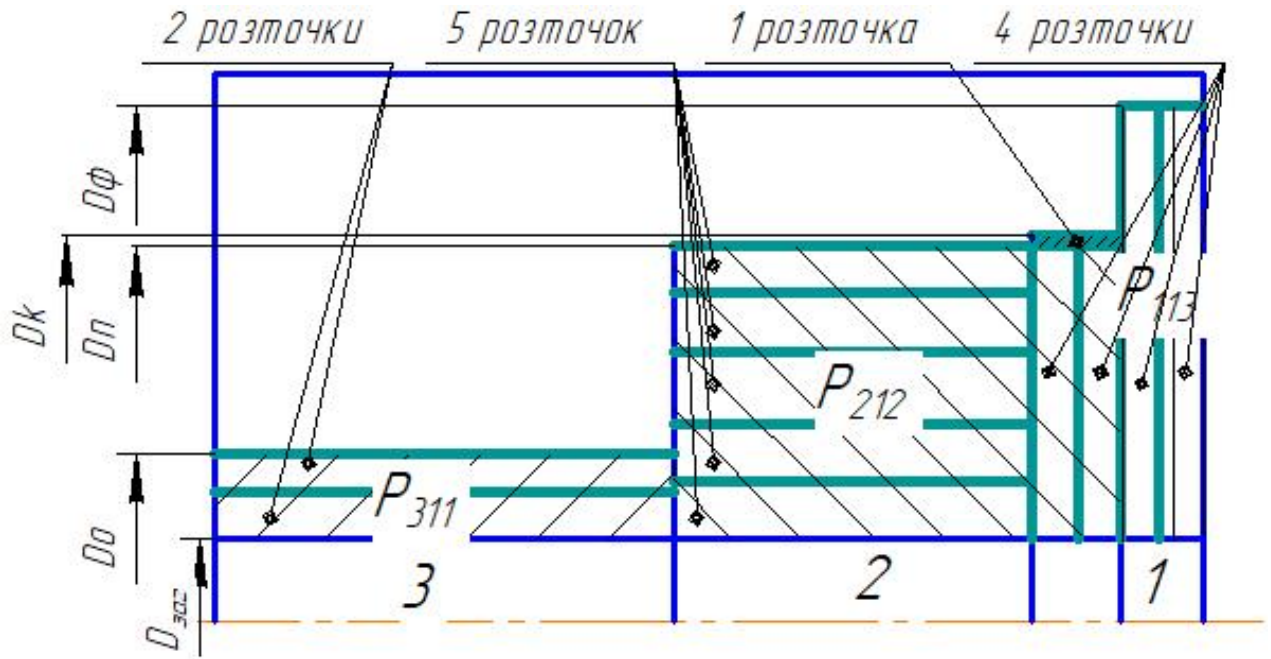


Рисунок 2.25. Варіант обробки з використанням поперечних ходів.

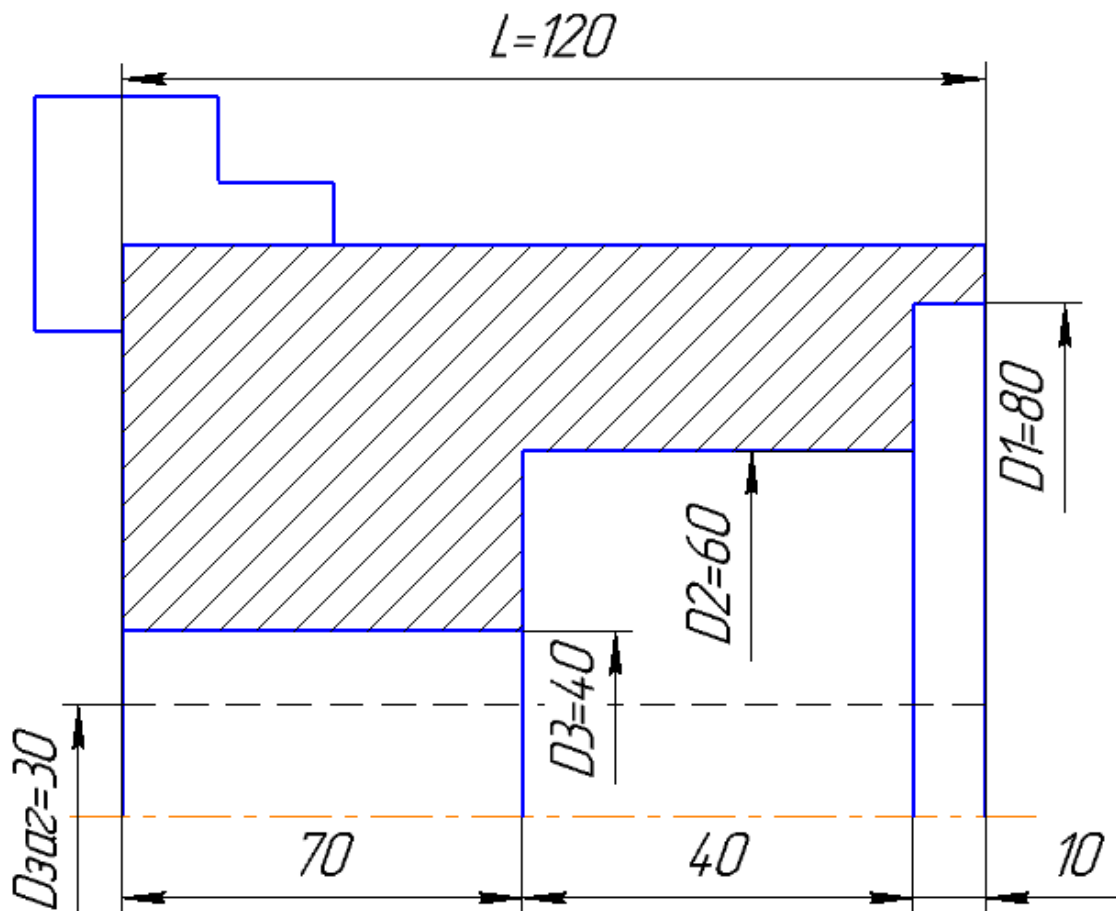


Рисунок 2.26. Приклад триступінчастого отвору.

### Варіанти обробки триступінчастого отвору

Номер варіанту обробки	Графічне представлення варіанту обробки	Коди припусків ступенів отвору
1	рисунок 2.21, а	$(P_{331}, P_{221}, P_{113})$
2	рисунок 2.21, б	$(P_{222}, P_{311}, P_{113})$
3	рисунок 2.21, в	$(P_{222}, P_{113}, P_{311})$
4	рисунок 2.21, г	$(P_{331}, P_{112}, P_{211})$
5	рисунок 2.21, д	$(P_{113}, P_{321}, P_{211})$
6	рисунок 2.21, е	$(P_{113}, P_{212}, P_{311})$

Розрахунок варіантів обробки проводиться за допомогою програми [toolguide.sandvik.coromant](http://toolguide.sandvik.coromant), яка дозволяє задати параметри отвору і отримати на виході параметри різання і відповідний інструмент для отримання отвору (рис. 2.27) [38].

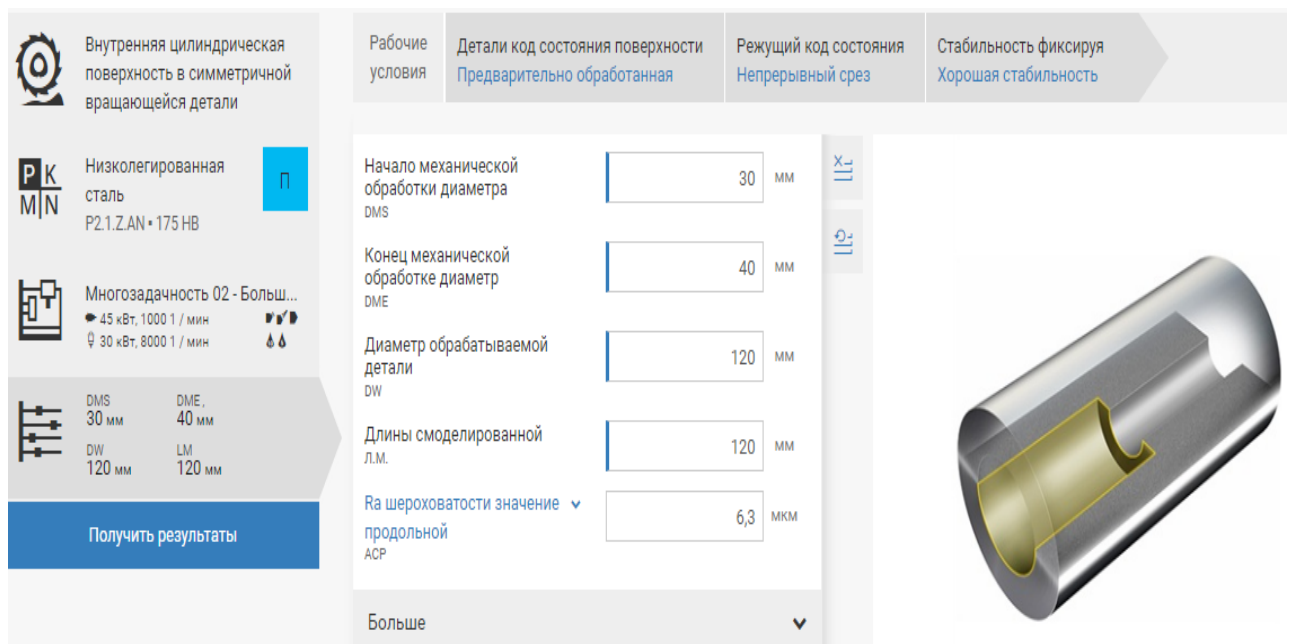


Рисунок 2.27. Пример заполнения параметров обработки.

Програма дозволяє вибрати наступні параметри:

- задання поверхні обробки;
- вибір матеріалу обробки;
- вибір обладнання для обробки;
- параметри оброблюваної поверхні;
- параметри попередньої обробки;
- стабільність різання та ін.

Для першого варіанту обробки  $\Omega_{3,1} = \{P_{331}, P_{221}, P_{113}\}$  (рис. 2.21, а), при видаленні припуску  $P_{331}$  були отримані наступні режими різання і параметри обробки (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

**Параметри обробки першого ступеня  $P_{331}$**

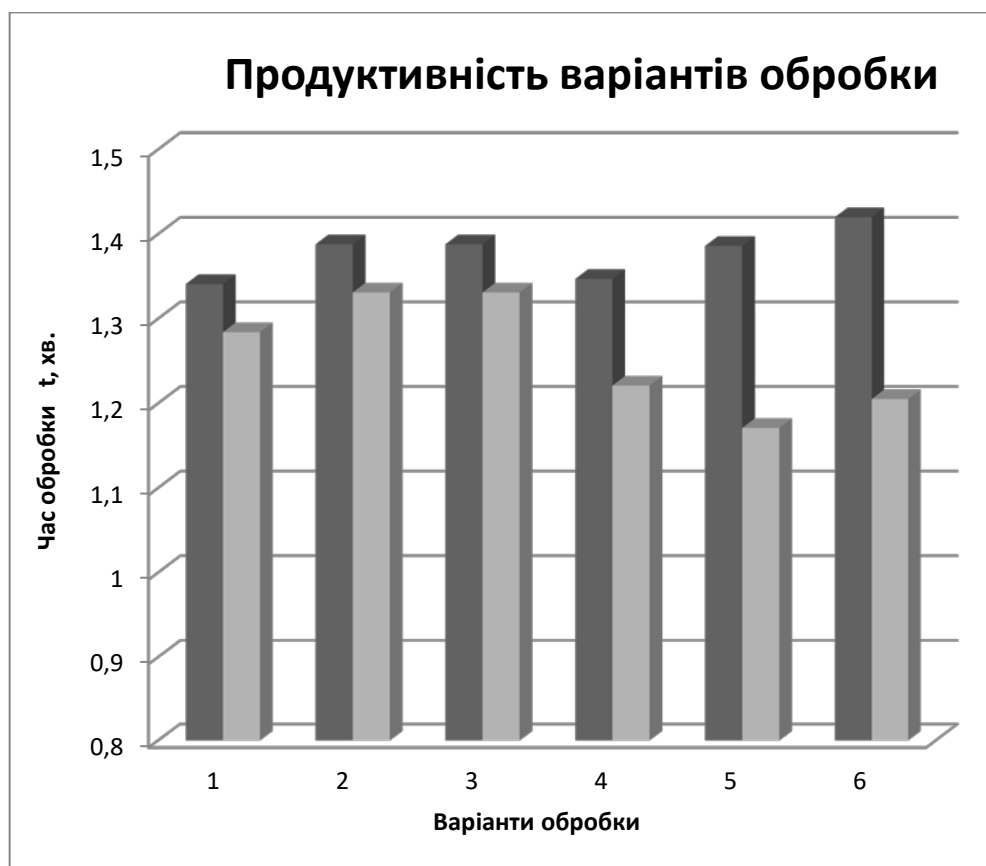
Назва параметра	Чорновий робочий хід	Чистовий робочий хід
Швидкість різання, $V$ (м/хв)	113	126
Подача за оборот, $F$ (мм)	0,3	0,3
Кількість робочих ходів, $i$	1	1
Старт обробленого діаметра, $D_n$	30	36
Кінець обробленого діаметра, $D_k$	36	40
Глибина різання, $t$ (мм)	3	2
Максимальна швидкість обертання, $n_{\max}$ (хв <sup>-1</sup> )	1198	1136
Максимальна потужність різання, $P$ (кВт)	3,46	2,64
Максимальний момент різання, $M$ (Нм)	33,1	25,2
Час обробки, $T$ (хв)	0,335	0,352

Аналогічно розраховуються й інші режими різання для інших ступенів, для кожного варіанта обробки. Основний час обробки для кожного варіанту зняття припуску записано в таблицю 2.5. Застосування поперечних ходів ріжучого інструменту показано на рисунку 2.25.



**Основний час обробки для  
різних варіантів зняття припуску (рис. 2.21)**

Номер варіанту обробки	$T_{oc}$ , при розточуванні поздовжніми ходами, хв.	$T_{oc}$ , при розточуванні поздовжніми і поперечними ходами, хв.
1	1,341	1,284
2	1,388	1,331
3	1,388	1,331
4	1,347	1,221
5	1,386	1,171
6	1,42	1,205



■ - лише поздовжні обробки;

□ - поздовжні і поперечні обробки.

Рисунок 2.30. Продуктивність варіантів обробки.



На рисунку 2.30 по осі  $Y$  відкладено основний час обробки, а по осі  $X$  номери варіантів обробки. З гістограми видно, що для випадку, представленого на рисунку 2.26, продуктивність залежить від варіанту обробки, наведеного на рисунку 2.21. Також відзначимо, що використання поперечних ходів скорочує основний час обробки. Використання поперечних ходів доцільне в тому випадку, коли довжина ступені невелика, а діаметр має істотне значення.

При обробці корпусних деталей, в більшості випадків, деталь залишається нерухомою, і обробка виконується за допомогою розточувальних головок, свердел, борштанг та ін. Корпусні вироби мають велику кількість отворів різних діаметрів, до яких висувають високі вимоги по точності розмірів і геометричній формі. Обробка отворів в таких деталях займає до 85% часу обробки всього корпусу.

Резервом до скорочення часу обробки може бути застосування високошвидкісної обробки фрезеруванням (ВСО). Сучасне обладнання та прогресивні методи обробки дозволяють отримувати отвори високої якості і в необхідній кількості будуть розглянуті в наступному розділі даної роботи.

## **2.4. Висновки до розділу**

1. Розроблено методику структурної оптимізації технологічних переходів розточування ступінчатих отворів.

2. Створено теоретичні основи поділу операційного припуску на всі можливі припуски ступенів, які необхідно зняти для формування отвору, засновані на кодуванні інформації про його ступені.

3. Застосування розробленої структурної оптимізації дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки триступінчастого отвору на 5-15% шляхом зменшення основного часу.

4. Доведено раціональність використання чергування поздовжньої і поперечної подач при формуванні ступінчатих отворів, що мають в наявності ступені невеликої довжини, проте важливих діаметрів.

### 3. Технологічні особливості сучасних методів отримання ступінчатих отворів

#### 3.1 Особливості високошвидкісної обробки поверхонь деталей

Одним із сучасних і важливих напрямків в машинобудуванні є здійснення високошвидкісної обробки (ВСО) - High speed cutting (HSC). Останнім часом інтерес підприємств до даної обробки стрімко збільшується. Впровадження ВСО стає ключовим фактором у досягненні успіху. Основна вигода забезпечується тим, що високі режими різання ВСО скорочують час різання і вартість кінцевого виробу. Час виробничого циклу скорочується до 50% і більше. За допомогою ВСО досягається максимальна продуктивність. Крім того, в деяких випадках використання ВСО є єдиним можливим способом обробки деталей [25].

Теоретичним обґрунтуванням високошвидкісної обробки є так звані криві Соломона, які показують зниження сил різання в деякому діапазоні швидкостей (рис. 3.1).

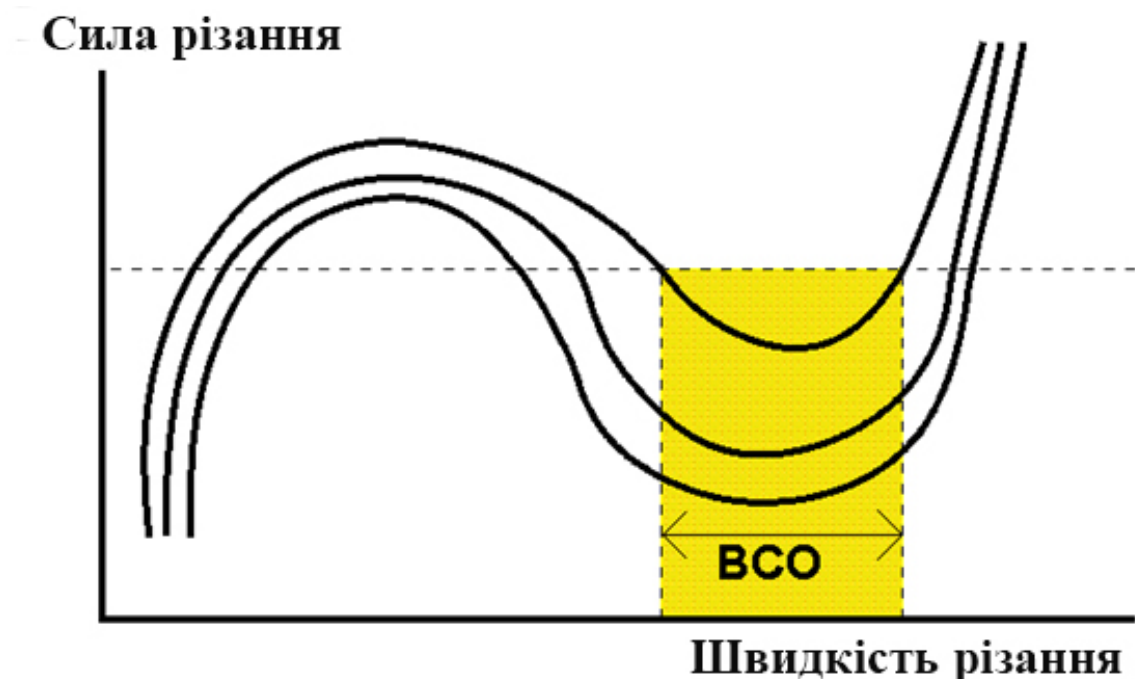


Рисунок 3.1. Криві Соломона.

Раніше дану обробку стримували: ріжучий інструмент, обладнання, системи ЧПУ. На сьогоднішній день ці проблеми цілком вирішені, і тому ВСО швидко розвивається і вже досить широко застосовується.

Основним принципом ВСО є: малий перетин зрізу, що знімається з високою швидкістю різання і високою хвилинною подачею. Швидкість різання і подача в 5-10 разів вище, ніж при звичайній обробці. Рекомендована глибина різання не повинна перевищувати 10% діаметра фрези.

При ВСО, крім зниження величини крутного моменту в зоні високих швидкостей, найбільш важливим фактором є перерозподіл тепла в зоні різання. У даній обробці швидкість подачі перевищує швидкість теплопровідності оброблюваного матеріалу, тому основна маса теплоти концентрується в стружці, не встигаючи переходити в заготовку і інструмент. Таким чином, за допомогою ВСО можна фрезерувати загартовані сталі, не побоюючись відпуску поверхневого шару. Дослідження показали, що 75% теплоти відводиться зі стружкою, 20% - через інструмент і 5% - через оброблювану заготовку. Зважаючи на це ВСО базується на скороченні теплоти, яка зазвичай і є причиною зносу інструменту [27, 28].

У даній роботі зроблена спроба аналізу можливості формування ступінчатих отворів ВСО фрезеруванням. ВСО фрезеруванням має ряд переваг в порівнянні з традиційними методами, застосовуваними в технології формування поверхонь деталей машин, основними з яких є:

- скорочення кількості необхідного інструменту для обробки, що розвантажує інструментальний магазин верстата від великої кількості, наприклад, розточувальних головок, дозволяючи об'єднати значну кількість операцій механічної обробки в одній установці;

- при застосуванні систем активного контролю верстата (контактних датчиків типу Renishaw) з подальшим коригуванням інструменту дозволяє без попередньої перевірки знімати виріб після закінчення циклу обробки, що істотно скорочує час виготовлення;

- вартість фрез для ВСО в рази нижче, ніж вартість розточувальних

головок, борштанг, а при придбанні сучасного загострювального обладнання ще більше знижує витрати на переточування і виготовлення інструменту.

Однак у ВСО існують і недоліки, що стримують можливості його масового застосування, які також необхідно враховувати для способу обробки отворів:

- знос інструменту впливає на відхилення форми отвору, при несвоєчасній заміні кінцевих фрез починають проявлятися відхилення в геометрії оброблених отворів (найчастіше конусність);

- обробка точних отворів швидкісним фрезеруванням вимагає наявності програмного забезпечення для ВСО та відповідного дорогого обробного обладнання з високою точністю позиціонування (в межах 2-4 мкм);

- складність застосування ВСО для деталей з важкооброблюваних матеріалів через низьку стійкість інструменту і складність отримання заданої шорсткості.

З огляду на можливості сучасного, надточного обробного обладнання, відносно гарну оброблюваність корпусних виробів, невеликий розмір партій виробів (5-20 шт.), зазначені недоліки стають несуттєвими [29, 40].

## **3.2 Конструктивні особливості і технологічні можливості сучасних верстатів з ЧПУ, ріжучого і допоміжного інструменту, САМ - систем**

### **3.2.1 Технологічні і конструктивні особливості вертикальних обробних центрів токарно-фрезерно-свердлильної групи.**

Обробний центр з ЧПУ представляє собою багатофункціональний верстатний комплекс з програмним системним управлінням. Центр оснащений рухомим робочим столом (одним або декількома) і системою автоматичної зміни інструменту. Він здатний обробляти заготовки з різних матеріалів. Верстатний комплекс має дуже широкі технологічні можливості, завдяки поворотному столу, великому набору інструментів і значному діапазону змін частот обертання шпинделя і швидкостей подач [37].

Особливості конструкції обробного центру токарно-фрезерно-розточувальної групи представлені на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2. Обробний центр токарно-фрезерно-розточувальної групи.

Основою верстатного комплексу є зварна або лита несуча станина з високоміцної сталі (чавуну), що забезпечує достатній рівень стійкості всієї конструкції. Шляхом особливих рішень, станина відрізняється підвищеною жорсткістю, що позитивно позначається на здатності поглинати вібрації при роботі. Станина є опорою для одного або декількох робочих столів, оснащених механізмом повороту і призначених для розміщення (і закріплення) оброблюваної заготовки.

Паралельно до станини розміщується консоль, яка є основою всього інструментального комплексу обробного центру з ЧПУ. Консоль пересувається над робочим столом в горизонтальному напрямку, а встановлений на консолі супорт може додатково здійснювати поперечні і похилі рухи, забезпечуючи можливість 5-ти координатної обробки заготовок. Потужний шпиндель з високою частотою обертання дозволяє справлятися з будь-якими - навіть надтвердими матеріалами заготовок. Магазин для набору ріжучих інструментів і механізм їх автоматичної зміни додатково розширюють можливості обладнання.

Прецизійна механіка, якісні поздовжні напрямні зі зниженим тертям, потужні і точні виконавчі серводвигуни інструментального порталу, високопродуктивна система ЧПУ - всі ці рішення спрямовані на досягнення високої швидкості і якості обробки.

Обробні центри розраховані на тривалу експлуатацію в напружених умовах промислового виробництва. Застосовувана система розподілу картриджного мастила дозволяє забезпечувати подачу мастила в суворо дозований кількості, в потрібні вузли і пари тертя. Це скорочує витрату мастила, значно знижує трудомісткість обслуговування верстата і в той же час забезпечує тривалу працездатність без втрат вихідних характеристик точності.

В якості додаткового обладнання верстатний комплекс може мати систему МОР високого тиску, що дозволяє, зокрема, проводити високошвидкісну обробку твердих загартованих металів. Завдяки високій продуктивності керуюча система ЧПУ спочатку «заточена» під оптимізацію траєкторії руху інструменту при високошвидкісній обробці деталей.

Технологічні можливості. Обробні центри з ЧПУ поєднують в собі токарний і фрезерний верстати. Це дозволяє вести ефективну 5-ти координатну обробку всіх поверхонь заготовки (торцевих, країв, глухих і відкритих пазів), виконувати свердління отворів, обробляти ребра, припливи і бобишки, знімати фаски, виконувати заокруглення, нарізати різьблення і т.д.

Обробні центри можуть працювати із заготовками з будь-яких матеріалів, в тому числі з деревинною, МДФ, ДВП, ДСП, фанерою, композитними алюмінієвими панелями (типу «Alucobond», «Dibond»), пластиками, органічним склом, штучним і натуральним каменем, кольоровими металами, сталями, алюмінієм і алюмінієвими сплавами, титаном і т.п.

Продумана система кріплення заготовки на робочому столі поєднує переваги вакуумних столів і механічного затиску струбцинами під Т-подібні пази. Великий запас ходу по вертикалі дозволяє встановлювати на робочий стіл спеціалізовані пристосування для спрощення завантаження і розвантаження заготовок.

Незважаючи на складність виконуваних завдань, управління і програмування верстата здійснюється порівняно легко. Цьому сприяє система ЧПУ, що дозволяє задавати програму обробки, в тому числі імпортуючи готові STL-файли. Кожен обробний центр оснащений шафою керування та стійкою ЧПУ. Завдяки окремому розташуванню, керуюча електроніка надійно захищена від вібрацій і нагріву при роботі обладнання. Пульт управління надає доступ до всіх функцій верстата і забезпечує безпеку технологічного процесу - шляхом дистанційного контролю обладнання [26].

Сучасний верстат для ВСО має швидкість обертання шпинделя 12-25000 хв<sup>-1</sup> і оснащений засобами температурної стабілізації шпинделя. Деякі фірми пропонують верстати зі швидкістю обертання до 40000 хв<sup>-1</sup>. Швидкості подач 40-60 м/хв, швидкість швидких переміщень - до 90 м/хв. Верстати відпрацьовують малі переміщення (від 5 до 20 мкм) і мають підвищену жорсткість і температурну компенсацію. Саме прогрес в області верстатобудування дозволив здійснити ВСО. Обмежувачем ВСО може стати система ЧПУ, якщо вона не має високої швидкості відпрацювання кадрів. Для досягнення високої якості поверхні програма для ВСО містить дуже малі переміщення. Так, наприклад, під час відпрацювання технології високошвидкісної обробки на фірмі Delcam був відзначений дефект у вигляді періодичних слідів зупинки фрези на верстаті Matsuura MC-800VF (випуску 90-х років) з системою ЧПУ Yasnac i80M. Аналіз програм показав, що система ЧПУ не встигає відпрацьовувати кадри програми при заданій подачі. Максимальну подачу, яку здатна забезпечити система ЧПУ, можна визначити за формулою:

$$F_{\max} = \frac{L_k}{T_k} \cdot 60, \quad (3.1)$$

де  $L_k$  - довжина переміщення в кадрі;

$T_k$  - час відпрацювання кадру.

З наведеного відношення слідує, що при переміщеннях 0,01 мм і часу обробки кадру 2 мс максимальна подача обмежена значенням 0,3 м/хв.

Переведення обробки на більш сучасний верстат Bridgport зняв цю проблему. Сучасна система ЧПУ повинна «дивитися вперед» зі швидкістю від 100 до 200 кадрів в секунду, щоб встигнути зробити розрахунки для гальмування на підході до кута і розгону після повороту [35].

### **3.2.2. Ріжучий і допоміжний інструмент.**

Виробники ріжучого інструменту не стоять на місці і вже давно випускають твердосплавні ріжучі інструменти, що працюють переважно на великих швидкостях. Для створення подібного інструменту використовуються дрібнодисперсні сплави. Використання великої частоти обертання шпинделя ( $40000 \text{ хв}^{-1}$ ) передбачає застосування інструментів невеликого діаметра 15-20 мм.

Застосування даних інструментів на малих швидкостях може швидко вивести їх з ладу, але варто тільки підвищити швидкість різання - стійкість пластини виростає в рази! Вся справа у виході на особливий режим ВСО, коли опір металу різання різко знижується. Через незнання даних моментів на практиці часто виникають проблеми при роботі з такими інструментами.

Часто для ВСО використовують плунжерні фрези (монолітні і з пластинами), інструменти з кубічним нітридом бору (КНБ), в тому числі отримані на основі нанотехнологій, а також інструмент з полікристалічним алмазом (ПКА) [23].

Через великий обсяг матеріалу, що зрізається при ВСО на великих подачах, бажано використовувати двозубі фрези, щоб стружка могла вільно вміститися в канавці. Досвід показує, що бажано застосовувати спеціальні фрези і ріжучі пластини з великими передніми кутами заточування [31].

Вкрай важливо звернути увагу на системи допоміжного інструмента, які забезпечують кріплення фрез. У зв'язку зі зниженням сил різання в процесі ВСО на перший план виходять інші чинники, такі як величина биття фрези, вібрації. Наприклад, подвоєння швидкості різання збільшує відцентрові сили внаслідок дисбалансу інструменту більш ніж в 4 рази, і ці сили стають порівнянними із силами різання. Биття інструменту сильно впливає на знос. Це



підтверджують дані експериментів (рис. 3.3), де на графіку видно практично лінійна залежність зносу від величини радіального биття при високих швидкостях різання.

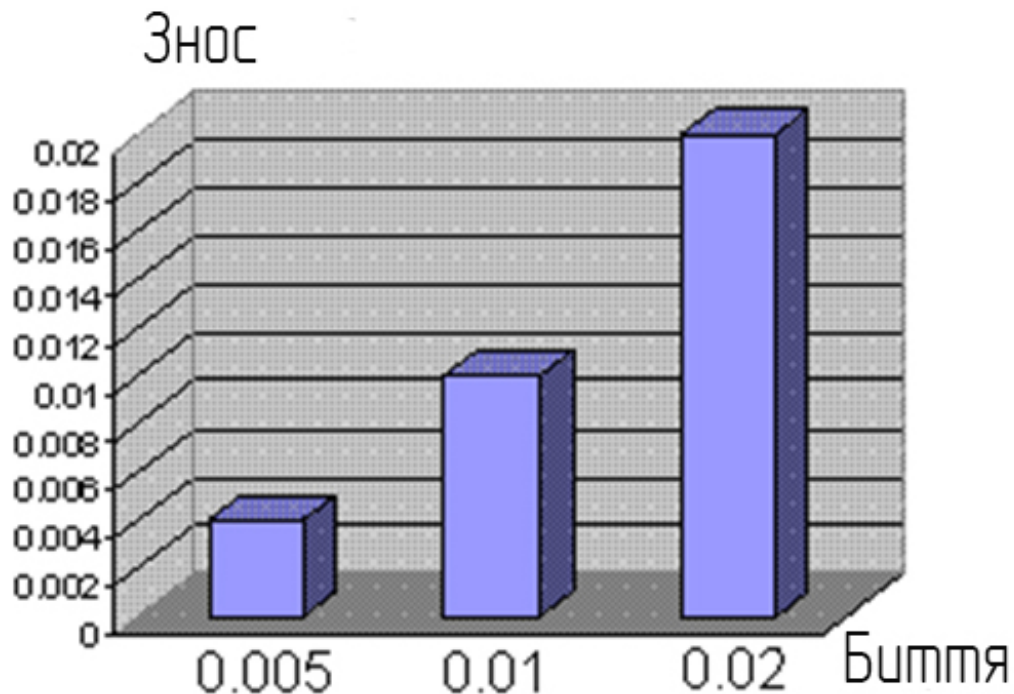


Рисунок 3.3. Вплив биття на знос інструменту.

Наведений рисунок показує, що зменшення биття інструмента з 20 мкм до 10 мкм дозволяє зменшити знос в два рази, а до 5 мкм - в 6 разів, знизивши його в абсолютних величинах до 2-3 мкм.

Допоміжний інструмент для кріплення фрез повинен мати конус HSK (можливо OBT конус), що володіє високою статичною та динамічною стабільністю, високою точністю, можливістю самобалансування на високих швидкостях, а також меншою масою в порівнянні з іншими конусами. Тому при ВСО перевага віддається термозажиму інструменту, тобто термопатронам, термоусадочним цанговим затискним патронам, також використовуються різні гідравлічні патрони, що балансується патрони, що дозволяють працювати з частотою до 100000 хв-1. Повне радіальне биття (TIR), має як правило, не перевищувати 5-10 мкм на ріжучій кромці. Головне завдання допоміжного інструменту - це вибрати всі зазори між інструментом і шпинделем [28].

### 3.2.3. САМ - системи.

Застосування ВСО неможливе без інноваційних САМ-систем, що володіють можливістю програмування даної обробки.

До САМ-системи для ВСО пред'являються безліч вимог, оскільки від якості УП багато в чому залежить знос дорогого верстата і інструменту, а також якість самої обробки.

САМ-система повинна забезпечити рівномірність шару, що знімається і плавність руху інструменту, інакше інструмент зламається. Для цього необхідне застосування вірної стратегії обробки і спеціальної траєкторії руху інструменту [33].

При визначенні стратегії обробки і побудові траєкторії повинна забезпечуватись відсутність різких змін напрямку руху інструменту. САМ-система повинна мати можливість генерації траєкторії, що базується на сплайнах (Nurbs -based machining), трохоїдальної обробки.

До траєкторії інструменту пред'являються безліч вимог: інструмент не повинен довбати деталь; різуче навантаження повинно бути в певних для нього межах; холості ходи повинні бути мінімізовані; час проходження всієї траєкторії має бути зведено до мінімуму, а також безліч інших умов.

УП для ВСО характеризуються високою складністю і мають великі обсяги, тому САМ-система повинна володіти високою швидкістю обчислень, а також зручним інтерфейсом для їх редагування.

Крім того, САМ-система повинна забезпечувати:

- широкий вибір варіантів плавного підведення-відведення та зв'язок між робочими ходами;
- набором стратегій спіральної і еквідистантної обробки як на чистових, так і на чорнових операціях і пошук оптимальної стратегії в різних зонах;
- автоматичне згладжування траєкторій в кутах;
- виключення ходів повною шириною фрези і автоматичне застосування трохоїдального врзання в цих місцях;
- оптимізацію подач для згладжування навантаження на інструмент.

Варто відзначити САМ-систему PowerMill (Delcam). Дана система володіє багатьма і гнучкими можливостями для розробки програм під ВСО. Саме компанія Delcam запатентувала «гоночну стратегію» обробки. Сьогодні PowerMill інтегрований з багатьма відомими системами тривимірного моделювання. І тим самим може бути застосований без покупки додаткових САД-систем [37].

### 3.3. Сучасні методи отримання отворів

#### 3.3.1. Гвинтова інтерполяція.

Кругове врізання під кутом (також називають гвинтовою інтерполяцією, спіральною інтерполяцією, орбітальним свердлінням, і т.п.) є альтернативою свердління (рис. 3.4) [38].



Рисунок 3.4. Гвинтові інтерполяція.

Одночасне переміщення інструменту по круговій траєкторії (координати  $X$  і  $Y$ ) разом з осьовою подачею по осі ( $Z$ ) з певним кроком.

У порівнянні з лінійним, врізання під кутом (обробка в повний паз), гвинтова інтерполяція шляхом зменшення радіальних зусиль різання є більш плавним процесом, і при попутному фрезеруванні забезпечується поліпшена евакуація стружки.

Попутне фрезерування забезпечується обертанням шпинделя у напрямку проти годинникової стрілки.

Існує три основних рекомендації для стратегії кругового врізання під кутом, недотримання яких може призвести до виникнення небажаних явищ:

- вибір діаметра фрези під розмір отвору;
- крок на один оборот інструменту (або заготовки);
- подача інструменту (або заготовки).

#### 1. Вибір діаметра фрези під діаметр отвору (рис. 3.5):

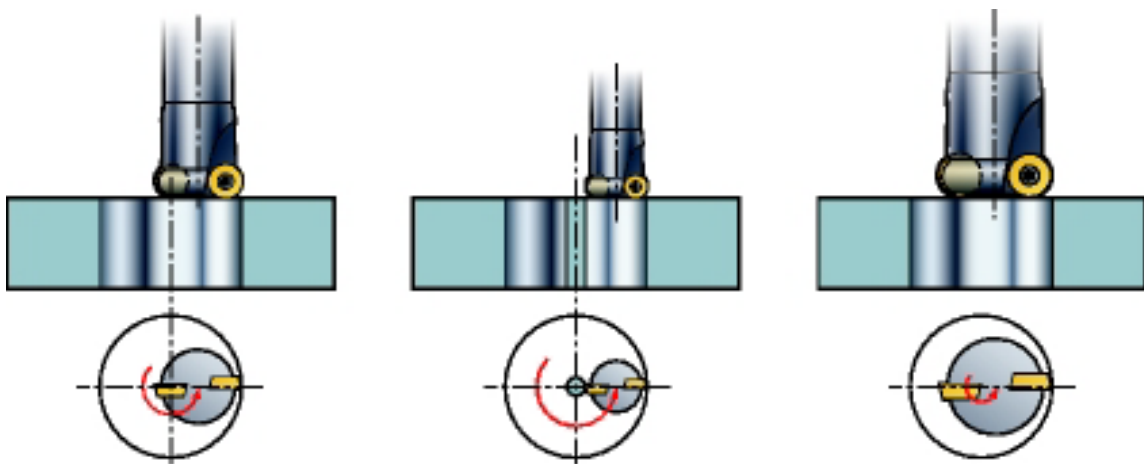


Рисунок 3.5. Вибір діаметра фрези.

При використанні фрез з відсутністю можливості засвердлювання дуже важливий вибір коректного діаметра. Діаметр повинен забезпечувати різання металу пластиною в зоні центру оброблюваного отвору.

При виборі занадто малого діаметра фрези в центрі деталі залишатиметься стрижень як при трепануванні (рис. 3.6). Подібне явище прийнятне для обробки різного роду прорізів, однак існує необхідність підтримки стержня при випаданні.

При виборі занадто великого діаметра фрези пластини не буде зрізати метал в зоні центру отвору, що призведе до утворення бобишки на дні отвору.

Максимальний діаметр отвору:

- максимальний діаметр отвору,  $D_m$ , одержуваного за один спіральний робочий хід, дорівнює  $2D_3$ ;

- така обробка аналогічна роботі в повний паз і неминуче залишає бобишку на дні глухого отвору;
- бобишку рекомендується прибирати переміщенням фрези до центру отвору для отримання отвору з плоским дном.

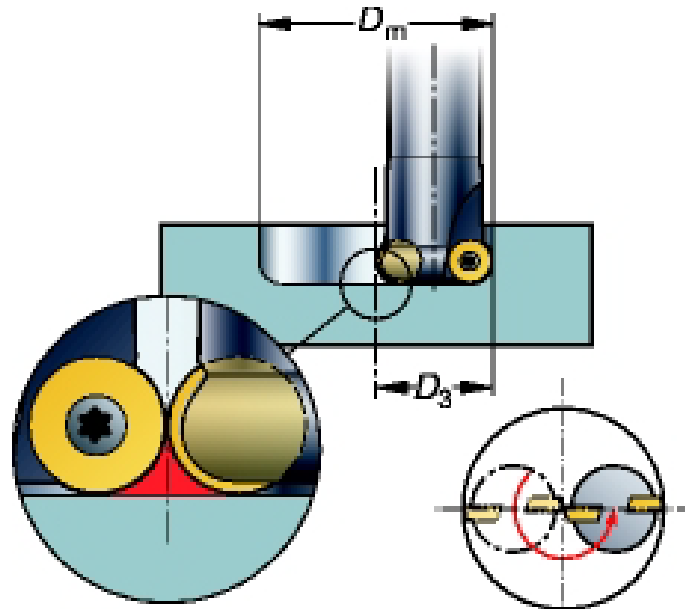


Рисунок 3.6. Мінімальний діаметр фрези.

$$D_m = D_3 \cdot 2, \quad (3.2)$$

$$D_3 = \frac{D_m}{2},$$

де  $D_3$  - діаметр фрези.

Мінімальний діаметр отвору з плоским дном:

- наявність або відсутність бобишки на дні глухого отвору залежить від коректного вибору радіуса при вершині пластини (рис. 3.7);
- при виборі занадто великого діаметра фрези бобишку неможливо прибирати переміщенням фрези до центру отвору;
- для фрези CoroMill 390 також необхідно враховувати довжину зачисної кромки Wiper bs, і додавати її значення до величини радіуса біля вершини пластини (рис. 3.8).

Максимальний і мінімальний діаметр глухого отвору  $D_m$  для фрези CoroMill 390 і CoroMill 300 визначаються по залежностях (3.3) і (3.4).

$$D_3 = \frac{D_m}{2} + (r_\varepsilon + b_s);$$

$$D_m = (D_3 - (r_\varepsilon + b_s)) \cdot 2.$$
(3.2)

$$D_3 = \frac{D_m}{2} + 0,5 \cdot iC;$$

$$D_m = (D_3 - 0,5 \cdot iC) \cdot 2.$$
(3.3)

де  $r_\varepsilon$  - радіус заокруглення при вершині пластини, мм;

$b_s$  - величина уступу при вершині пластини, мм;

$iC$  - діаметр круглої пластини.

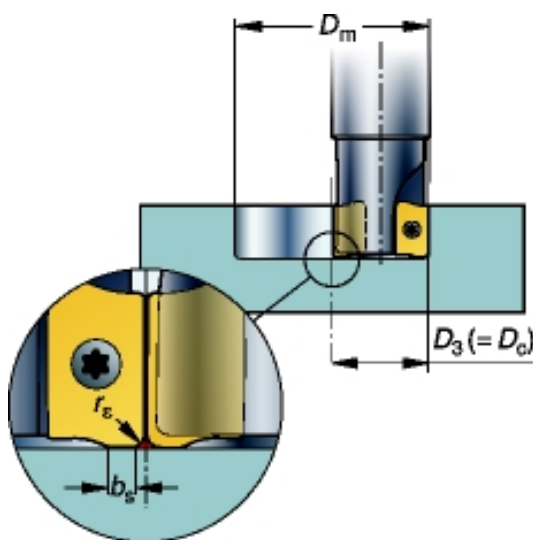


Рисунок 3.7. Величина радіусу при отриманні глухого отвору.

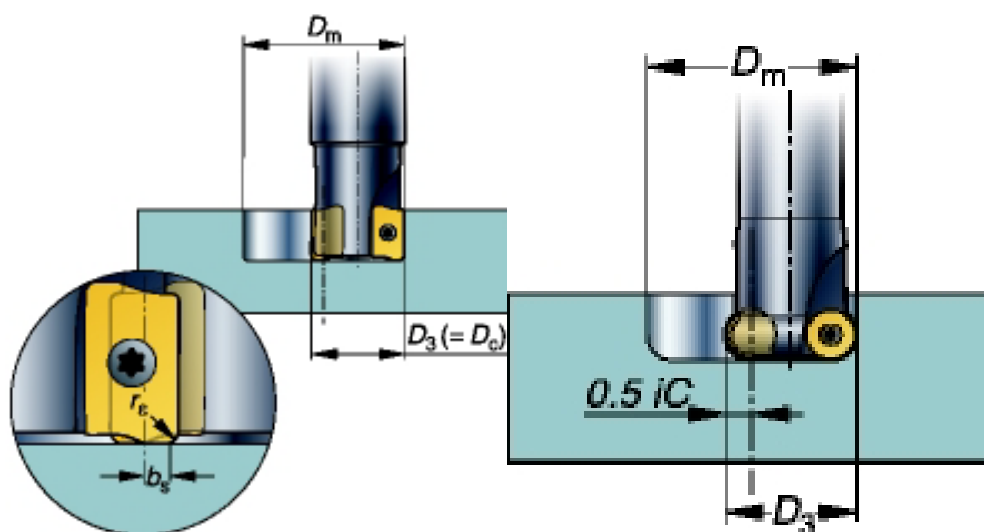


Рисунок 3.8. Величина діаметра глухого отвору для різних пластин.

Мінімальний діаметр наскрізного отвору:

- мінімальний діаметр, що дозволяє уникнути пошкоджень корпусу фрези внаслідок різання периферійною частиною інструменту;

-  $b$  - максимальний крок при плунжерному фрезеруванні і одночасно максимальне перекриття;

Для круглих пластин,  $b$  розраховується як:  $b = 0,8 \text{ і } C$ .

Максимальний і мінімальний діаметр наскрізного отвору  $D_m$  для фрези CoroMill 390 і CoroMill 300 можна визначити по залежностях 3.5 і 3.6 відповідно (рис. 3.9).

$$D_3 = \frac{D_m}{2} + b; \quad (3.4)$$

$$D_m = (D_3 - b) \cdot 2.$$

$$D_3 = \frac{D_m}{2} + 0,8 \cdot iC; \quad (3.5)$$

$$D_m = (D_3 - 0,8 \cdot iC) \cdot 2,$$

де  $b$  – максимальне перекриття, мм.

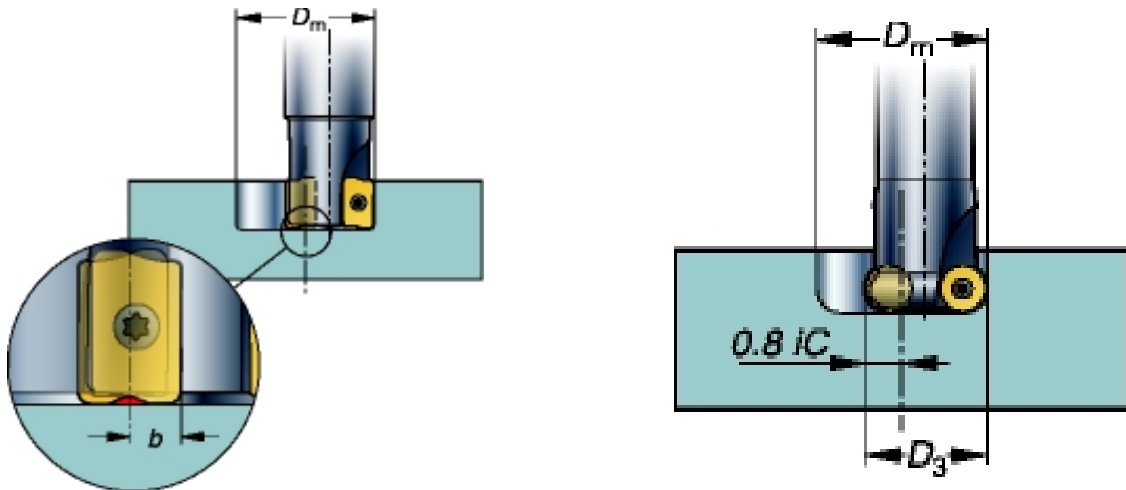


Рисунок 3.9. Величина діаметра наскрізного отвору для різних пластин.

## 2. Вибір кроку переміщення фрези.

Крок не повинен перевищувати максимально рекомендованого значення  $a_p$  для фрези даного виконання, і залежить від діаметра отвору, діаметра фрези і кута врізання (рис. 3.10).

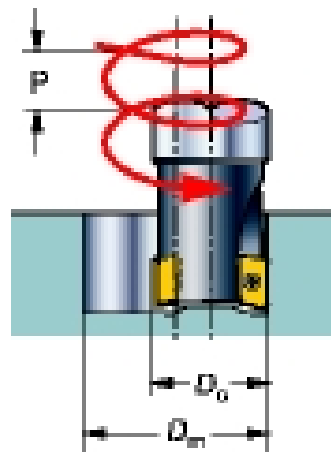


Рисунок 3.10. Крок за вихрової інтерполяції.

### 3. Вибір подачі.

Значення подачі завжди залежить від:  $h_{ex}$  - значення пропорційної хвилинної подачі периферійної частини інструменту,  $v_{fm}$  (рис. 3.11). Для багатьох верстатів задається параметр подачі центру інструменту,  $v_f$ , який відповідно повинен розраховуватися:

$$\begin{aligned} f_3 &= h_{ex}; \\ v_{fm} &= n \cdot f_3 \cdot z_c; \\ v_f &= \frac{D_{vf}}{D_m} \cdot v_{fm}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де  $D_{vf}$  – програмований крок фрези;

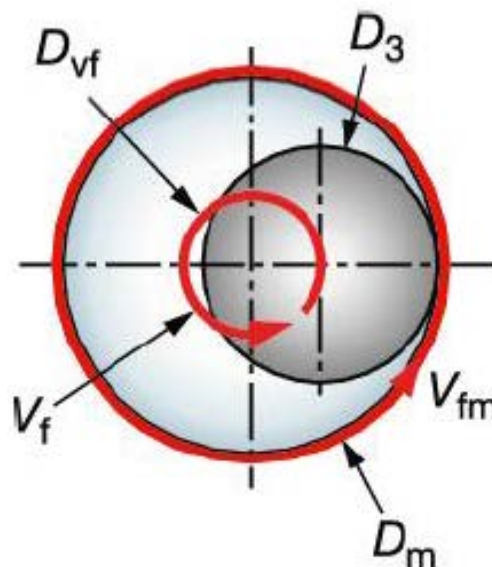


Рисунок 3.11. Подача при вихровій інтерполяції.



Програмована швидкість подачі:

- $v_{fm} = z$  компенсацією величини радіуса при використанні периферії інструменту;
- $v_f =$  при використанні центру інструменту.

### 3.3.2. Розфрезерування отвору.

Збільшення існуючого отвору може здійснюватися як круговою інтерполяцією з врізанням під кутом так і круговим розфрезеруванням [39].

Гвинтова інтерполяція з врізанням по 3 осях (рис. 3.12):

- постійне врізання;
- немає входів і виходів;
- фреза постійно в різанні;
- фрезерування з врізанням - обробка торцевою частиною пластини.

Для гвинтової інтерполяції з врізанням по 3 осях характерна:

- глибина отвору більше максимального значення глибини різання  $a_p$  для інструменту;
- найкраща співвісність і округлість отвору;
- застосування для областей з підвищеним ризиком виникнення вібрацій.

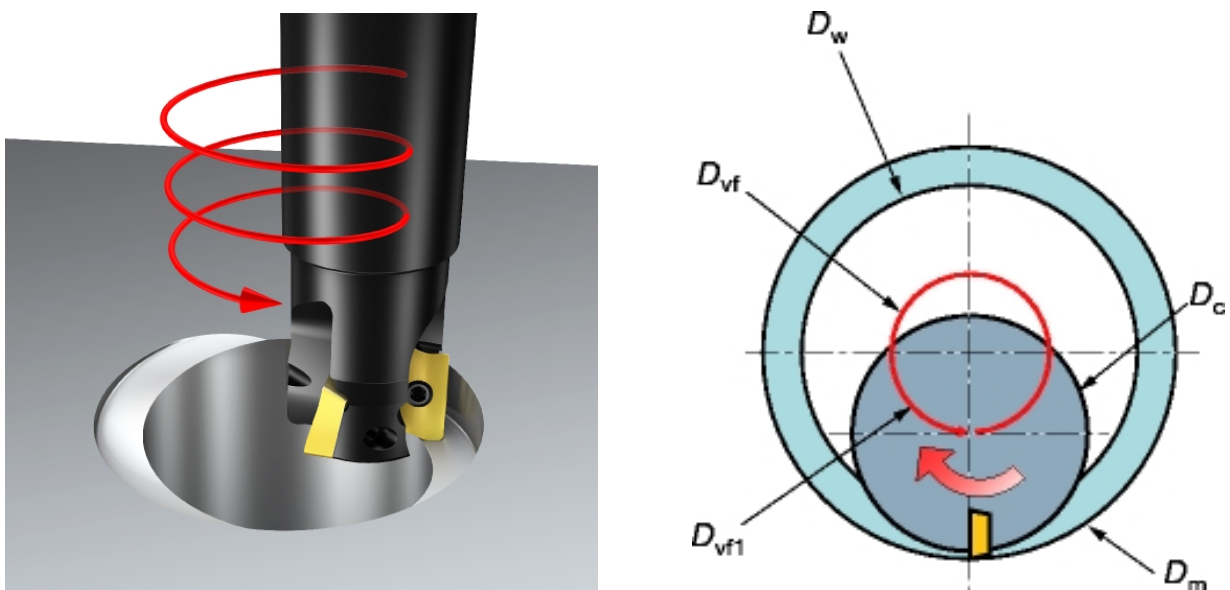


Рисунок 3.12. Розфрезерування отвору.

Траєкторія (діаметр) руху фрези:

$$D_{vf} = D_m - D_c, \quad (3.7)$$

де  $D_m$  - діаметра отвору;

$D_c$  - діаметр фрези.

Кругова інтерполяція з врізанням по 2 осях.

Метод кругової інтерполяції є альтернативою використанню традиційного розточувального інструменту. Кругову інтерполяцію можна застосовувати, використовуючи більшість фрез з кутом в плані 90 градусів, здійснюючи кільцевий робочий хід (рис. 3.13).

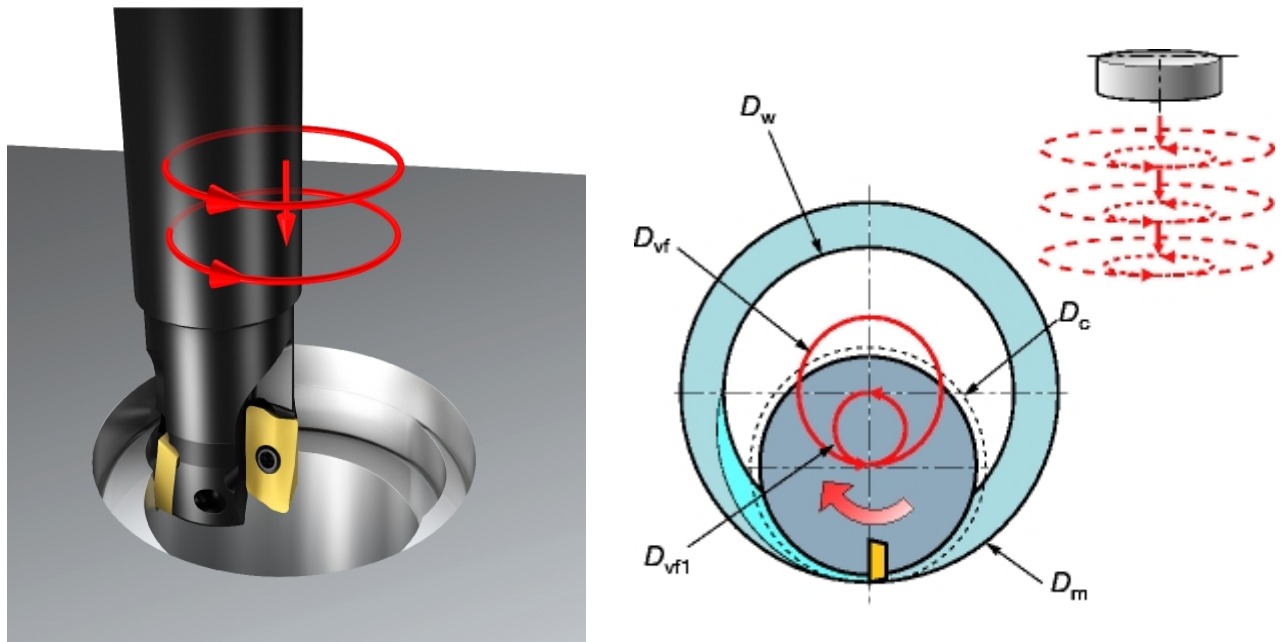


Рисунок 3.13. Кругова інтерполяція з врізанням по 2 осях.

Для здійснення процесу необхідно:

- постійне  $Z$ ;
- вхід і вихід з різання для кожного робочого ходу;
- повинен бути запрограмований вхід фрези в матеріал заготовки по дотичній до діаметра отвору.

До недоліків такої обробки можна віднести:

- точність отвору нижча, ніж при гвинтовій інтерполяції.
- утворення слідів ("рядків") від кожного робочого ходу інструменту.

Для гвинтової інтерполяції з врзанням по 2 осях характерне:

- програмування траєкторії переміщення інструменту більш ніж на 360 градусів для уникнення виникнення слідів від стрічок;
- потрібен тільки один робочий хід.
- фреза з великою величиною  $a_p$  (CoroMill Plura, довгокоромочна фреза CoroMill 390).
- неглибокий отвір.
- можливість застосування для врзання під кутом мінімальна або відсутня - пластина не має ріжучої кромки в осьовому напрямку.

Діаметр руху фрези  $D_{vf}$  і діаметр зміщення відносно центру  $D_{vf1}$ :

$$D_{vf} = D_m - D_c;$$

$$D_{vf1} = \frac{D_{vf}}{2}.$$

(3.8)

Входження фрези в оброблюваний матеріал по дотичній забезпечує потоншення стружки на виході кромки із різання. Менше значення кута врзання забезпечує зниження вібрацій, що призводить до підвищення продуктивності (рис. 3.14).

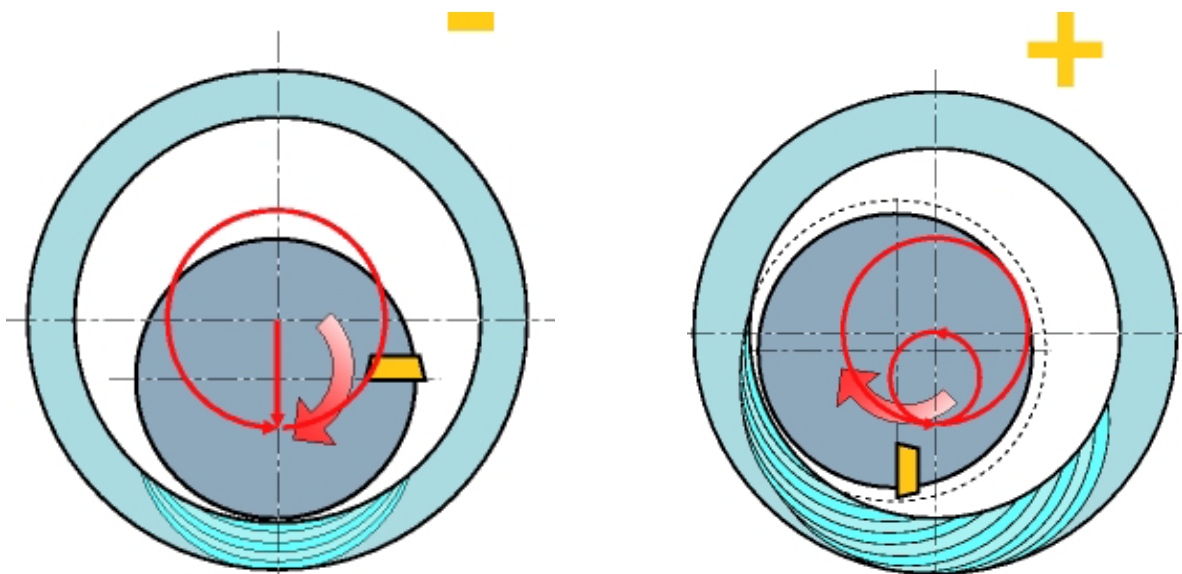


Рисунок 3.14. Входження в деталь по прямій і дотичній.

Знаходження подачі (рис. 3.15).

Подача повинна бути знижена у випадку:

- збільшення глибини різання  $a_e$  відносно різання по прямій, що знижує ефект стоншення стружки;
- подача периферійної частини фрези більша, ніж подача центру інструменту;
- розрахункове значення подачі базується на величині  $D_{vf}$ .

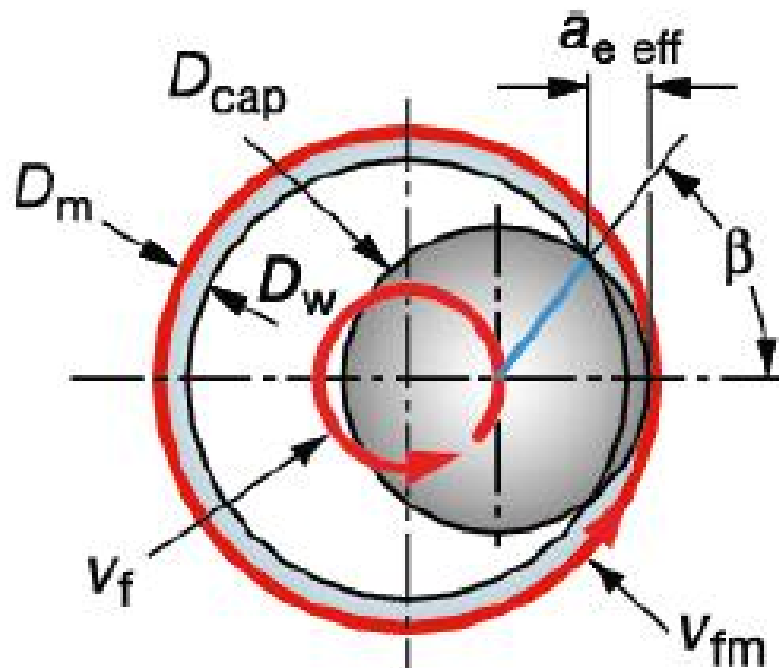


Рисунок 3.15. Розрахунок подачі.

Подача та її швидкість визначаються за формулою:

$$f_z = \frac{h_{ex}}{\sin \beta};$$

$$v_{fm} = n \cdot f_z \cdot z_c; \quad (3.9)$$

$$v_f = \frac{D_{vf}}{D_m} \cdot v_{fm}.$$

### 3.4. Умови обробки при ВСО

#### 3.4.1. Режими різання при ВСО.

ВСО проводиться в надкритичному для коливань діапазоні, тому що всюди при таких високих швидкостях обертання, значно підвищуються частоти резонансу деталі, інструменту та компонентів верстата. З урахуванням того, що ВСО ставить за мету забезпечення високої якості оброблюваної поверхні, додаткову увагу слід приділити підбору режимів різання з точки зору знаходження зон, де відсутні вібрації. Наприклад, на рис. 3.16 показані зони вібрації з різним числом хвиль  $N$  між зубами фрези в залежності від глибини і швидкості [34].

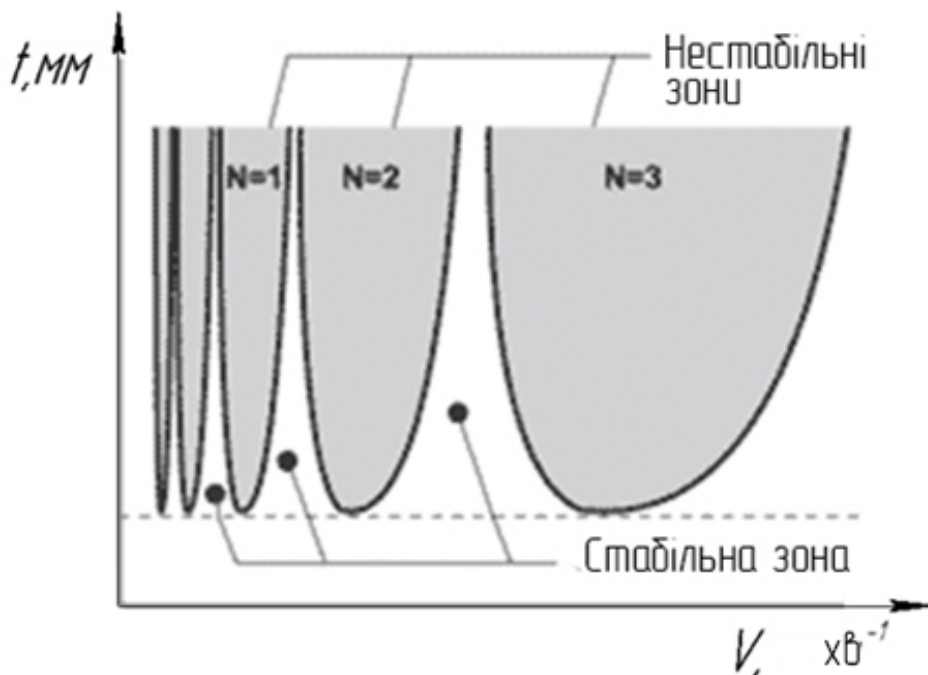


Рисунок 3.16. Зони вібрацій при фрезеруванні в залежності від глибини різання і швидкості різання.

Призначення режимів різання викликає деякі труднощі. Хоча вони вказані в каталогах застосовуваного інструмента, тим не менш, мають попередній характер, остаточне ж призначення режимів різання виконується виходячи з досвіду і експериментів для конкретного оброблюваного матеріалу.

Для самих важкооброблюваних матеріалів величину подачі на зуб можна визначити за формулою  $f_z = 0,01D$ , при цьому рекомендується, щоб  $f_z$  задовольняло наступній умові  $0,005D < f_z < 0,02D$ , де  $D$  - номінальний діаметр фрези. Так, наприклад для фрези  $D = 40$  мм,  $0,2 < f_z < 0,8$  мм/зуб.

Необхідно мати на увазі, що в деяких випадках доводиться занижувати режими різання при обробці окремих ділянок. Наприклад, при фрезеруванні порожнин, коли опускання відбувається по спіралі або зигзагу. Тут можливе опускання і в попередньо засвердлений отвір, але це не завжди буває зручно. Іноді при обробці складних ділянок вигідно фрезерувати з великими зніманнями, але меншою швидкістю, це збільшує час обробки, проте виключає різні поломки.

### 3.4.2. Охолодження при ВСО.

Найбільша стійкість спостерігається при використанні обдування (рис. 3.17).

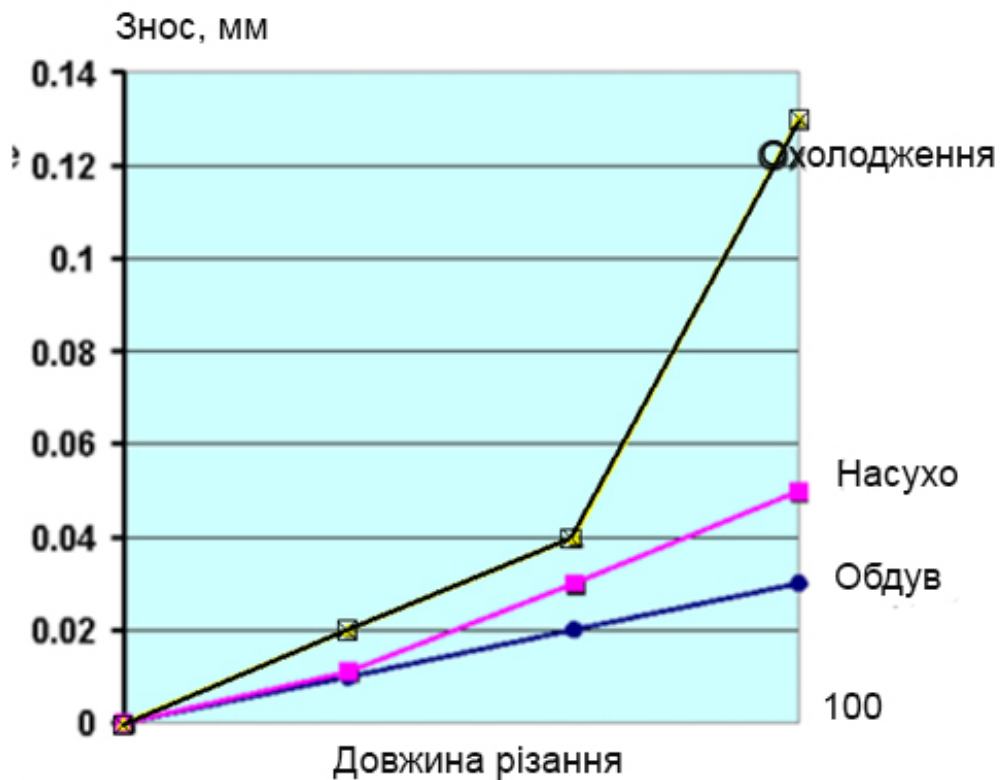


Рисунок 3.17. Вплив методів охолодження на знос інструменту.

Оскільки теплота концентрується в стружці, її треба просто видалити із зони різання, а не охолоджувати заготовку і інструмент як раніше. У випадку застосування MOR інструмент піддається циклічним температурним навантаженням на кромці, що призводить до передчасного викришування. А як відомо для інструменту постійне теплове навантаження, навіть на середніх температурах краща, ніж змінне циклічне навантаження.

Застосування охолоджуючої емульсії іноді має місце при VCO, але не з метою охолодження, а для використання її змащувальних властивостей. Охолоджуюча емульсія допомагає ковзанню стружки по ріжучій кромці без теплообміну.

Найбільш ефективним є застосування масляного туману з обдувом повітряним струменем під великим тиском. При цьому мастило повинне мати рослинне походження і бути нешкідливим для здоров'я.

### **3.5. Моделювання структурної оптимізації з використанням VCO фрезеруванням**

Проведено моделювання продуктивності для всіх можливих варіантів обробки трьох ступенів отвору корпусної деталі при наступних умовах: матеріал ріжучої частини інструменту - T15K6; параметри заготовки - довжина обробки  $L = 65$  мм, діаметр -  $D_{заг} = 30$  мм; діаметри ступенів  $D_1 = 40$  мм,  $D_2 = 60$  мм,  $D_3 = 80$  мм, матеріал деталі - СЧ20; шорсткість  $R_a$  для всіх ступенів 2,5 мкм. Для простоти сприйняття варіанти обробки пронумеровані абстрактними цифрами від 1 до 6 (табл. 3.1).

Розрахунок режимів різання і основного часу обробки проводиться в додатку [toolguide.sandvik.coromant](http://toolguide.sandvik.coromant), порівнюється продуктивність отримання ступінчатих отворів за допомогою розточувальних головок, борштанг з продуктивністю VCO фрезеруванням на основі структурної оптимізації зняття припусків. Основний час обробки і варіанти обробки наведені в таблиці 3.1.

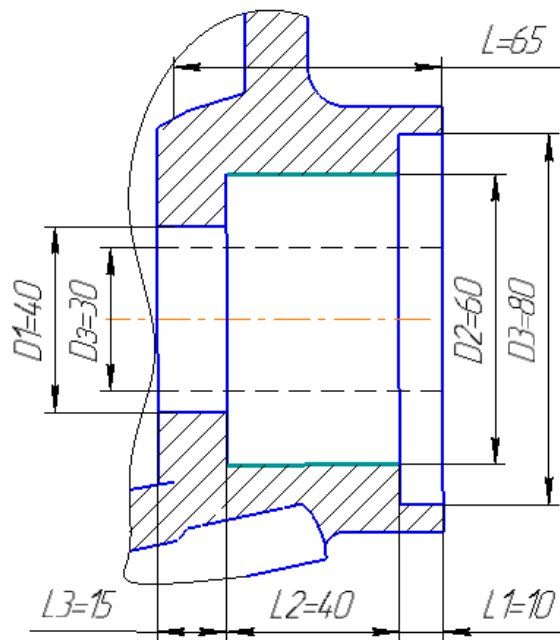


Рисунок 3.18. Приклад триступінчастого отвору корпусної деталі.

Таблиця 3.1.

**Приклад параметрів обробки ВСО фрезеруванням отвору  
при видаленні припуску першого ступеня**

Назва параметра	Чорновий робочий хід	Чистовий робочий хід
Швидкість різання, $V$ (м/хв)	246	324
Подача за зуб, $F_z$ (мм)	0,261	0,227
Швидкість обертання шпинделя, $n_{\max}$ (хв <sup>-1</sup> )	3920	5150
Швидкість подачі при механічній обробці діаметра, $V_{fm}$ (мм/хв)	4090	4670
Робоча взаємодія, $t_e$ (мм)	1,53	0,4
Глибина різання, $t_p$ (мм)	65	65
Число робочих ходів в напрямку $t_e$ , $N_e$	3	1
Число робочих ходів в напрямку $t_p$ , $N_p$	1	1
Швидкість видалення матеріалу, $Q$ (см <sup>3</sup> /хв)	408	121
Потужність різання, $P$ (кВт)	20,7	7,91
Час обробки, $T$ (хв)	0,075	0,032



На рисунках 3.19 - 3.20 показані варіанти зняття припуску за допомогою борштанг і розточувальних головок, а також зняття припуску за допомогою ВСО фрезеруванням (розфрезерування отвору).

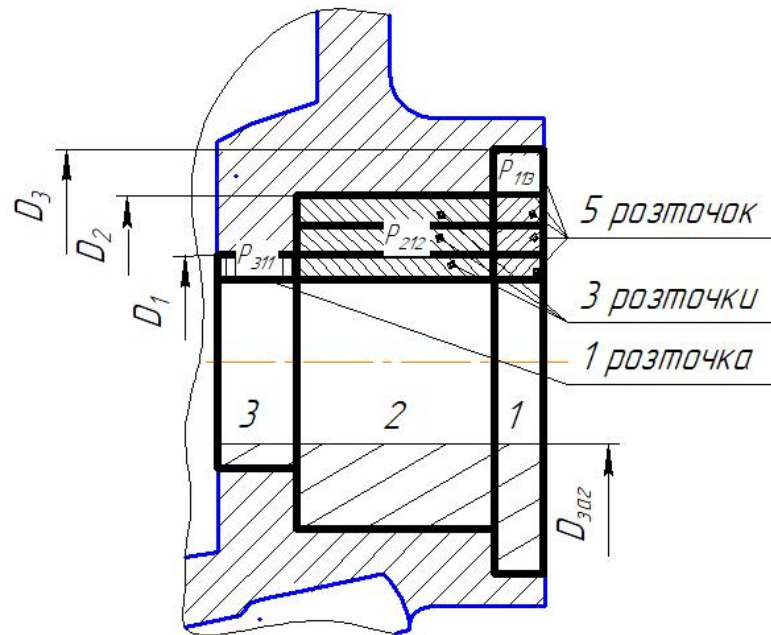


Рисунок 3.19. Приклад видалення припуску за допомогою борштанг або розточувальних головок.

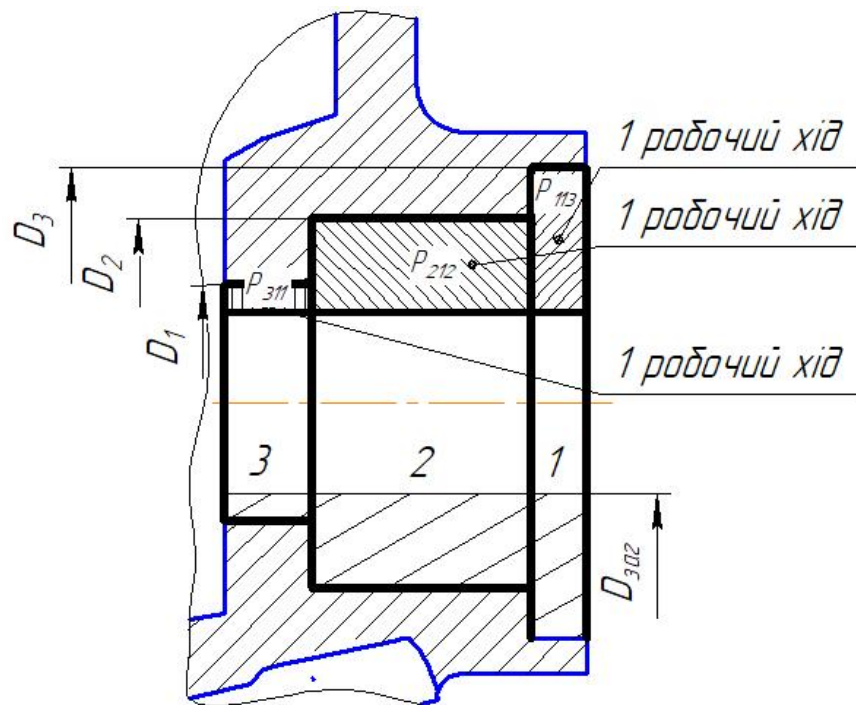
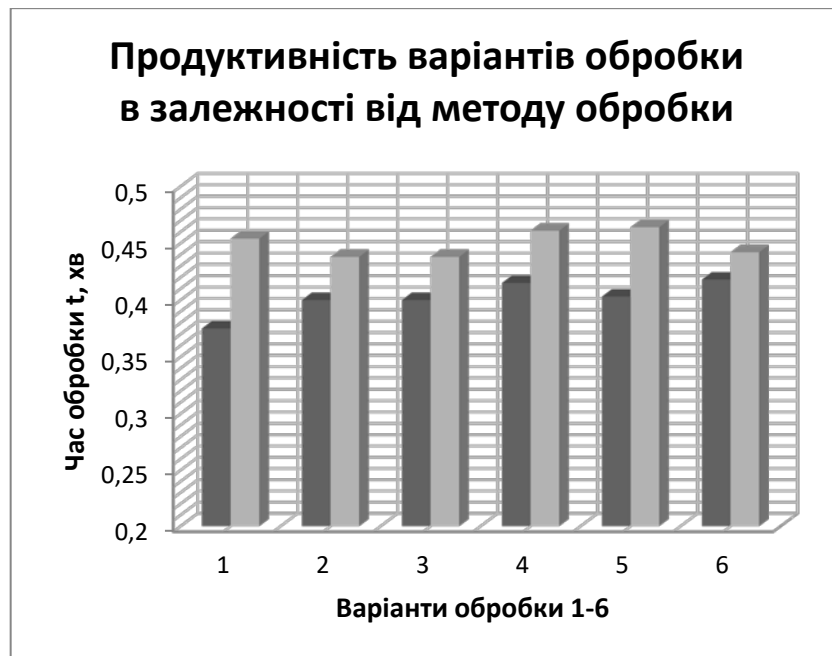


Рисунок 3.20. Приклад видалення припуску за допомогою ВСО фрезеруванням (розфрезерування отвору).

### Основний час обробки корпусу для різних варіантів зняття припуску

Номер варіанта обробки	Коди припусків ступенів отвору	$T_{oc}$ , при розточуванні борштангами і розточувальними головками, хв	$T_{oc}$ , при застосуванні ВСО фрезеруванням, хв
1	$(P_{331}, P_{221}, P_{113})$	0,537	0,463
2	$(P_{222}, P_{311}, P_{113})$	0,6502	0,541
3	$(P_{222}, P_{113}, P_{311})$	0,6502	0,541
4	$(P_{331}, P_{112}, P_{211})$	0,568	0,542
5	$(P_{113}, P_{321}, P_{211})$	0,602	0,567
6	$(P_{113}, P_{212}, P_{311})$	0,6322	0,5911

З таблиці 3.2 і рисунка 3.20 видно, що час обробки залежить від варіантів зняття припуску. Застосування ВСО фрезеруванням допомагає отримати отвір досить хорошої якості, витративши на обробку менше часу. Цей метод допомагає зменшити основний час обробки, а також заощадити допоміжний час, що витрачається на зміну інструменту



■ - високошвидкісна обробка фрезеруванням;

□ - обробка борштангами і розточувальними головками.

Рисунок 3.21. Продуктивність варіантів обробки триступінчастого отвору корпусу.

На рисунку 3.21 по осі *X* відкладено номери варіантів обробки, а по осі *Y* час обробки. Гістограма показує зміну часу обробки в залежності від варіантів зняття припуску за допомогою високошвидкісної обробки фрезеруванням і час обробки при розточуванні борштангами і розточувальними головками.

### **3.6. Висновки до розділу**

1. Розглянуто та проаналізовано сучасні способи високошвидкісної обробки отворів (ВСО), конструктивні особливості і технологічні можливості обладнання, інструментів і оснащення для здійснення процесів.

2. Встановлено, що в правильно організованому технологічному процесі ВСО шляхом скорочення основного і допоміжного часу можна істотно підвищити продуктивність операції механічної обробки.

3. Проведено порівняльний аналіз продуктивності операції розточування ступінчатих отворів та їх ВСО фрезеруванням, встановлено, що в цьому випадку ВСО підвищує продуктивність формування ступінчатих отворів на 10-20%.

## Загальні висновки

1. Розглянуто та проаналізовано методи оптимізації механічної обробки, їх особливості, переваги та недоліки, на основі аналізу були сформовані цілі роботи і завдання дослідження.

2. Розроблено методику структурної оптимізації технологічних переходів розточування ступінчатих отворів.

3. Розроблено теоретичні основи поділу операційного припуску на всі можливі припуски ступенів, які необхідно зняти для формування отвору, засновані на кодуванні інформації, про його ступені. Доведено раціональність використання чергування поздовжньої і поперечної подач при формуванні ступінчатих отворів, що мають в наявності ступені невеликої довжини, але важливих діаметрів.

4. Розглянуто та проаналізовано сучасні способи високошвидкісної обробки отворів (ВСО), конструктивні особливості і технологічні можливості обладнання, інструментів і оснащення для здійснення процесів. Встановлено, що в правильно організованому технологічному процесі ВСО шляхом скорочення основного і допоміжного часу можна істотно підвищити продуктивність операції механічної обробки.

5. Застосування розробленої структурної оптимізації дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки триступінчастого отвору на 5-15% шляхом зменшення основного часу. Проведено порівняльний аналіз продуктивності операції розточування ступінчатих отворів і їх ВСО фрезеруванням, доведено, що ВСО підвищує продуктивність формування ступінчатих отворів на 10-20%.

## Список використаних джерел

1. Справочник технолога – машиностроителя: Справ. Т.1/Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.: ил.
2. Справочник технолога – машиностроителя: Справ. Т.2/Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.: ил.
3. Сикора В. Оптимизация процесса обработки резанием с применением вычислительных машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 226с. 4. ГОСТ 3.1109 – 82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий
4. Жолобов, А.А. Технологическое обеспечение качества ступенчатых валов и шлицевых соединений: моногр./А.А. Жолобов, К.А. Шалыжин, А.В. Казаков, Е.Ю. Демиденко; под общ. ред. А.А. Жолобов. – Смоленск: Принт-экспресс, 2014. – 204с.
5. Казаков, А.В. Теоретическое обоснование и теоретическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации: диссертация/Казаков, А.В. – Могилев: Бел. - Рос. ун-т, 2016. – 226с.
6. Иванов М.І., Гунько І.В., Ковальова І.М., Худолій О.І. Аналіз технологічних систем. Навчальний посібник. Частина 1. Вінниця.2010. – 113с.
7. Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов в САПР ТП/В.И. Аверченков; Брянск. ин-т трансп. машиностр. – Брянск, 1987. – 108 с.
8. Свирщёв, В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие/В.И. Свирщёв. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 116 с.
9. Маталин А.А. Технология механической обработки/А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 462 с.

10. Солоня О.В. Технічна механіка. Методичні рекомендації для виконання практичних робіт / О.В. Солоня, І.М. Купчук – Вінниця: ВНАУ, 2017. – 84 с.
11. ГОСТ 14.301–83 Общие правила разработки технологических процессов. 1983. – 7с.
12. Леонов С.Л. Структурная оптимизация процессов механической обработки / Известия ТАП. Барнаул, 1997. Вып. 1. С. 48-50.
13. Рязанцев, А.Н. Автоматизация проектирования технологических процессов/А.Н. Рязанцев, А.А. Жолобов: Сб. задач: Учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов. – Мн.: ММИ, 1997. - 126 с.
14. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість [Текст] : підручник / Г. М. Калетнік, М. Г. Чаусов, В. М. Швайко \*[та ін.] ... М-во аграр. політики України , Вінниц. держ. аграр. ун-т; . - Київ : Хай-Тек Прес, 2011. - 616 с.
15. Веселовська Н.Р. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування: Навчальний посібник / Веселовська Н.Р., Руткевич В.С., Шаргородський С.А. – Вінниця: 2019. – 234 с.
16. Аверченков, В.И. САПР технологических процессов, приспособлений и инструментов: Учеб. пособие/В.И. Аверченков, И.А. Каштальян, А.П. Пархутик. - Мн.: Выш. шк., 1993. - 288 с
17. Анферов М.А. Метод структурной оптимизации технологических операций на многопозиционных станках/Оптимизация процессов обработки конструкционных материалов: Межвуз. тематич. науч. сб. Уфа, 1996. С. 73-79.
18. Яковс, Г. Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации./Яковс Г. Ю., Яков Э., Кохан Д. – М: Машиностроение 1981.–279с, ил.
19. Веселовська Н.Р. Методи дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів: Навчальний посібник / Веселовська Н. Р., Посвятенко І.К., Солоня О.В., Будяк Р. В. - Вінниця 2018. - 150 с

20. Ящерицын, П. И., Еременко М. Л., Жигалко Н. И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Минск, «Вышэйш. школа», 1975. 528 с.
21. Программа выбора режущего инструмента и режимов обработки [Электронный ресурс]. 2016. - Режим доступа к статье: <http://toolguide.sandvik.coromant.com>
22. Жолобов А.А. Структурная оптимизация токарной операции растачивания при формировании ступенчатых отверстий/А.А. Жолобов, А.В. Казаков, Д.В. Боярко // Вестник Белорус-Рос. ун-та. – 2017. №3 (принято к печати).
23. Калетнік Г.М. Технічна механіка. Підручник. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є., Солоня О.В., Цуркан О.В. – К.: «Хай-Тек-Прес», 2011. – 340 с.
24. Сивак Р.І. Короткий курс теоретичної механіки / Р.І. Сивак, І.А. Деревенько. – Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. – 200 с.
25. Боярко Д.В. К вопросу высокоскоростной обработки поверхностей деталей машин/Д.В. Боярко, А.И. Латыпов, Д.В. Слуцкая; науч.рук. А.А. Жолобов // 53 – я студ.науч.тех.конф. Белорус-Рос.ун-та: материалы конф. – Могилев, 2017. (принято к печати).
26. Виттингтон, К. Высокоскоростная механообработка,/ К. Виттингтон, В. Власов/САПР и графика. - 2002.- №11. - с.43-51.
27. Segerlin, C. High Speed Cutting /C. Segertin // Cutting Tool Engineering. - 2006. - Vol. 58, №.12.- С. 36-39
28. Болотов М.А. Высокоскоростная и высокопроизводительная обработка (режимы, характеристика станков, инструмент)/Дмитриев В.Н., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Сурков О.С. // Электронные методические указания/Самара. – 2010. 88с.
29. Соловов А. Некоторые секреты высокоскоростной обработки металлов [Электронный ресурс] - Режим доступа к статье: <http://www.obo-rt.ru/arhiv/>.
30. Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. МирПром, 2010. - Режим доступа к статье: <http://www.mirprom.ru/>

31. Солтус Н. В. Высокоскоростная обработка HSC (High speed cutting): современное состояние вопроса/Индустриально-педагогический колледж ОГУ, Оренбург, 2010. 8 с.

32. Веселовська Н.Р., Худолій О.І. Надійність технологічних систем та обґрунтування інженерних рішень. Навчальний посібник. Вінниця. 2014. – 115 с.

33. Винтовая интерполяция [Электронный ресурс]. 2016. - Режим доступа к статье: <http://www.sandvik.coromant.com/ru/knowledge/pages/default>.

34. Веселовська Н.Р. Теорія різання та інструмент: Навчальний посібник / Веселовська Н.Р., Іскович-Лотоцький Р.Д., Ковальова І.М. – Вінниця: 2018. – 297 с.

35. Веселовська Н.Р., Іскович-Лотоцький Р.Д., Ковальова І.М. Металообробне обладнання: Навчальний посібник. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2015. – 47 с.