

# ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

## МОНОГРАФІЯ

$$I_{II} = \frac{\Pi_D - \Pi_3 - \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{P_j} \frac{(\Pi_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{VB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3P_j + C_{Ej} \right)}{\sum_{j=1}^m T_{IIIkj}}$$

$$W_H = \sum_{j=1}^{P_j} W_{Tij} \frac{t_{Oij}}{T_{IIIij} + T_{II3j} / N_D + \tau_{II3j}}$$

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Сумський державний університет

# **Інтенсифікація процесів механічної обробки**

Монографія

За редакцією В.Є. Карпуся

Суми  
Сумський державний університет  
2012

УДК 621.9  
ББК 347.722.53  
I-57

Авторський колектив:

*В. Є. Карпусь* – доктор технічних наук, професор;  
*В. О. Іванов* – кандидат технічних наук, старший викладач;  
*О. В. Котляр* – кандидат технічних наук, старший викладач;  
*Д. О. Міненко* – кандидат технічних наук, асистент;  
*М. С. Іванова* – асистент

Рецензенти:

*Б. М. Гевко* – доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України, завідувач кафедри «Технологія машинобудування та автомобілів» Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя;  
*О. А. Пермяков* – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;  
*В. Б. Тарельник* – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технічний сервіс» Сумського національного аграрного університету

*Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету  
(протокол № 5 від 22.12.2011 р.)*

**Інтенсифікація** процесів механічної обробки : монографія /  
I-57 В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред.  
В. Є. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет,  
2012. – 436 с.  
ISBN 978-966-657-418-6

У монографії виконано комплексний і фундаментальний аналіз інтенсивності технологічних процесів обробки типових деталей машин та обґрунтовані рекомендації щодо підвищення їх ефективності. Детально розглядається багатокритеріальна оптимізація технологічних процесів обробки деталей типу тіл обертання. Важливим напрямком інтенсифікації процесів механообробки є застосування комбінованих осьових інструментів. Значна увага приділяється питанням конструктивно-технологічного забезпечення системи універсально-збірних переналаджуваних пристроїв.

Для викладачів, науковців, аспірантів, студентів машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 621.9**  
**ББК 34.722.53**

© Карпусь В. Є., Іванов В. О., Котляр О. В.,  
Міненко Д. О., Іванова М. С., 2012  
ISBN 978-966-657-418-6 © Сумський державний університет, 2012

## Зміст

Список скорочень .....	6
Вступ.....	7
<b>1. Основи теорії інтенсивності формоутворення технологічних систем механічної обробки .....</b>	<b>12</b>
1.1. Інтенсивність формоутворення як критерій ефективності технологічних систем .....	12
1.2. Структура показника інтенсивності формоутворення.....	16
1.3. Методика дослідження інтенсивності формоутворення діючих технологічних систем.....	26
1.4. Порівняльний аналіз інтенсивності формоутворення металорізальних верстатів для обробки корпусних деталей.....	28
1.5. Аналіз інтенсивності формоутворення на агрегатних верстатних системах .....	38
1.6. Підвищення продуктивності та інтенсивності формоутворення діючих технологічних систем.....	45
<b>2. Багатокритеріальна оптимізація технологічних систем.....</b>	<b>54</b>
2.1. Основні положення системного підходу до аналізу технологічних систем .....	54
2.2. Системні принципи структурно-параметричної оптимізації технологічних систем механообробки.....	61
2.3. Система критеріїв оптимальності .....	73
2.4. Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів.....	82
2.5. Дослідження впливу характеру виробничого процесу на результати оптимізації.....	86
2.6. Автоматизоване визначення трудомісткості обробки деталі.....	110
<b>3. Конструктивно-технологічні основи ефективного застосування комбінованих осьових інструментів.....</b>	<b>123</b>
3.1. Аналіз конструкцій комбінованих осьових інструментів .....	123



3.2. Точність обробки двоступінчастими свердлами ....	137
3.3. Визначення режимів різання комбінованими осьовими інструментами.....	142
3.4. Аналіз інтенсивності формоутворення отворів комбінованим осьовим інструментом .....	152
<b>4. Підвищення ефективності обробки отворів на багатоцільових верстатах .....</b>	<b>160</b>
4.1. Аналіз технологічних можливостей сучасних багатоцільових верстатів.....	160
4.2. Оправки для свердління отворів на верстатах із ЧПК .....	178
4.3. Вибір режимів максимальної продуктивності свердління отворів на багатоцільових верстатах.....	183
4.4. Дворіздева розточувальна оправка для обробки основних отворів.....	209
4.5. Експериментальні дослідження процесу обробки дворізцевою оправкою .....	214
<b>5. Синтез технологічних компонувань багатоменклатурного агрегатного металорізального обладнання.....</b>	<b>222</b>
5.1. Структура гнучкості багатоменклатурного агрегатного металорізального обладнання .....	222
5.2. Система структурно-параметричного синтезу технологічних компонувань багатоменклатурного агрегатного металорізального обладнання .....	228
5.3. Визначення оптимальних вихідних режимів багатоінструментної обробки комплектом різальних інструментів .....	232
5.4. Формування варіантів структури багатоінструментної та багатопозиційної обробки.....	239
5.5. Методика багатокритеріальної оптимізації технологічних компонувань багатоменклатурного агрегатного металорізального обладнання .....	245
5.6. Проект технологічного компонування багатоменклатурної агрегатної верстатної системи.....	250

<b>6. Вибір оптимальних компонувань верстатних пристроїв для верстатів із ЧПК</b> .....	260
6.1. Системи верстатних пристроїв для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів з ЧПК.....	260
6.2. Математична модель вибору оптимальних компонувань верстатних пристроїв .....	275
6.3. Синтез компонувань верстатних пристроїв .....	281
<b>7. Конструктивно-технологічне забезпечення системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв</b> .....	296
7.1. Призначення і структура системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв.....	296
7.2. Вибір функціональних елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв при складанні компонувань ВП .....	302
7.3. Конструкції елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв.....	326
7.4. Порівняльний аналіз технічних характеристик верстатних пристроїв для встановлення ступінчастих валів ...	331
<b>8. Аналітичні дослідження точності універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв</b> .....	342
8.1. Верстатні пристрої для встановлення корпусних деталей .....	342
8.2. Верстатні пристрої для встановлення валів .....	354
<b>9. Експериментальне дослідження точності установлювальних елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв</b> .....	402
9.1. Конструкція базуючої призми .....	402
9.2. Дослідження похибки обробки валів на горизонтально-фрезерному верстаті.....	406
9.3. Дослідження похибки обробки валів на вертикально-фрезерному верстаті.....	410
<b>Список джерел інформації</b> .....	414
<b>Додатки</b> .....	422

## Список скорочень

AB	– агрегатний верстат
ABC	– агрегатна верстатна система
АПП	– автоматично переналагоджуваний пристрій
БВ	– багатоцільовий верстат
ВП	– верстатний пристрій
ЗЕ	– затискний елемент
ЗРП	– збірно-розбірний пристрій
ЗШК	– змінна шпindelьна коробка
КВ	– кондукторна втулка
КД	– корпусна деталь
КОІ	– комбінований осьовий інструмент
РІ	– різальний інструмент
СБП	– спеціалізований безналагоджуваний пристрій
СВП	– спеціальний верстатний пристрій
СНП	– спеціалізований налагоджуваний пристрій
ТО	– технологічна оснастка
ТС	– технологічна система
УБП	– універсально-безналагоджуваний пристрій
УЕ	– установлювальний елемент
УЗП	– універсально-збірний пристрій
УЗПМ	– універсально-збірний пристрій механізований
УЗПО	– універсально-збірна переналагоджувана оснастка
УЗПП	– універсально-збірний переналагоджуваний пристрій
УЗП-ЧПК	– універсально-збірний пристрій для верстатів із ЧПК
УНП	– універсально-налагоджуваний пристрій
ЧПК	– числове програмне керування

## Вступ

Технологічна система (ТС) – це сукупність функціонально пов'язаних засобів оснащення, предметів виробництва та працівників, призначених для виконання у регламентованих виробничих умовах заданих технологічних процесів або технологічних операцій відповідно до вимог нормативно-технологічної документації.

Сучасні ТС механічної обробки характеризуються складною ієрархічною структурою, значною кількістю обладнання та виконуваних технологічних переходів.

В умовах розвитку ринкових відносин важливою особливістю існування ТС є їх відкритість та зміна стану і параметрів функціонування протягом часу роботи, тобто динамічність. Такі зміни відбуваються внаслідок взаємодії у зовнішньому середовищі і необхідності відповідних реакцій на дії зовнішніх факторів.

Цей підхід принципово відмітний від того, що існував у період централізовано-планової економіки, коли виробниче підприємство розглядалось як закрита система, що знаходиться у стійкій рівновазі та підтримує свої показники тривалий час сталими, тобто зберігалися структура, характер функціонування, характеристики входів та виходів ТС. Разом з тим ефективний розвиток можливий лише на основі уявлень про підприємство як відкриту систему. Тобто формування структури ТС та оптимізація її параметрів повинні здійснюватися з урахуванням ринкових факторів та взаємодії з відповідними економічними системами.

Ієрархічна система – це принципово багатокритеріальна система, оскільки вона складається з окремих підсистем, які мають самостійні можливості оброблення інформації та прийняття рішень на основі власних критеріїв. Критерій оптимальності – це один із показників ТС, який найбільшою мірою характеризує її відповідність заданому цільовому призначенню. Значущість критерію визначається ступенем впливу зміни його величини на загальну якість об'єкта. Помилки, допущені на етапі вибору критеріїв, неминуче

призводять до створення неоптимальних, навіть збиткових ТС. Синтез складних ТС із використанням одного критерію найчастіше неможливий, адже може статися так, що дерево цілей ТС на нижньому рівні ієрархії містить не одну, а набір кількісно вимірюваних цілей, що не зводяться одна до одної, і тому описується різними критеріями. Крім того, кожна ціль не обов'язково характеризується одним критерієм. Найчастіше існує множина критеріїв, кожен з яких характеризує той або інший аспект функціонування системи. Об'єктивно не існує розв'язання багатокритеріальної задачі, яке переводить в екстремум усі локальні критерії, але існують область Парето (область компромісів) у просторі критеріїв і так звані Парето-оптимальні рішення.

Аналіз закономірностей технологічного процесу, розвитку засобів виробництва і технологічних процесів, а також виявлення відповідних причинно-наслідкових зв'язків і закономірностей, кількісне їх описання здійснюється на основі кількісних показників, які характеризують продуктивність, надійність та гнучкість ТС.

Інтегральним системним критерієм, що комплексно характеризує ці показники ТС, а також у явному вигляді враховує інформацію про параметри обробки і структуру системи, є «інтенсивність формоутворення». Маючи загальний характер, критерій інтенсивності формоутворення є абсолютним, тобто забезпечує зіставність оцінок для різних видів ТС, відзначається наочністю та простотою у практичному використанні.

Ієрархічна структура критерію інтенсивності формоутворення, що відповідає структурі ТС, дозволяє використовувати його як критерій оптимальності на всіх або більшості етапів синтезу ТС, поступово розширюючи обсяг використаної інформації і забезпечуючи тим самим максимальну достовірність структурно-технологічних рішень.

Критерій інтенсивності формоутворення успішно застосовується для аналізу діючих ТС і процесів з метою зіставлення проектних та фактичних показників, а також для

визначення шляхів удосконалення та підвищення їх ефективності.

Найважливішим показником економічної ефективності виробництва продукції є її собівартість, на основі якої визначається більшість основних показників економічної ефективності (прибуток, рентабельність та ін.).

У зарубіжній практиці врахування економічних витрат теоретичною базою оптимізації прибутку і витрат вважається метод прямих витрат Direct Costing, основні особливості якого такі:

а) продукція промислового підприємства враховується і планується лише в частині перемінних витрат, а постійні витрати не включаються у розрахунок собівартості виробів, а як витрати списуються з отриманого прибутку протягом того періоду, за який вони були вироблені;

б) постійні витрати всією сумою відносяться на фінансовий результат і не розносяться за видами продукції.

У системі Direct Costing собівартість промислової продукції враховується лише за перемінними витратами. Ця система дає можливість установити зв'язки та пропорції між витратами і обсягами виробництва, отримати інформацію про прибутковість та збитковість виробництва залежно від його обсягу, прогнозувати поведінку собівартості залежно від його обсягу виробництва або потужностей.

Основним оцінним показником під час проведення сумісного аналізу витрат, обсягу діяльності та прибутку є маржинальний прибуток (profit margin), що становить різницю між виручкою від реалізації продукції та перемінними витратами (собівартістю).

Вибираючи економічні критерії оптимальності ТС, потрібно мати на увазі, що у сучасних умовах господарювання найбільш значущими для підприємств є фінансові цілі, а саме прибуток та показники дохідності.

Прибуток – це показник, який найповніше відображає ефективність виробництва, обсяг та якість виготовленої продукції, стан продуктивності праці, рівень собівартості та ін.



Висока продуктивність та інтенсивність формоутворення є визначальним фактором високої економічної ефективності ТС, що забезпечує високоприбуткове використання дорогого обладнання. Наприклад, одним із компонентів собівартості виготовлення виробу є витрати на різальний інструмент. За даними шведської фірми SANDVIK COROMANT при зменшенні інструментальних витрат на 30% або збільшенні стійкості інструменту на 50% собівартість виготовлення деталі знижується всього на 1%, а при підвищенні швидкості різання сучасним твердосплавним інструментом на 20% собівартість обробки деталі зменшується на 15%.

Принципово можливі два шляхи підвищення продуктивності та інтенсивності формоутворення ТС зменшення тривалості робочого циклу та скорочення позациклових витрат часу. В другому випадку можливе підвищення продуктивності на 8–10%. Більші можливості забезпечує перший напрямок, пов'язаний з інтенсифікацією процесу обробки.

Найефективнішим шляхом удосконалення засобів автоматизації технологічних процесів, що гарантує випереджувальне зростання продуктивності обробки порівняно зі збільшенням економічних витрат на автоматизацію, є підвищення ступеня концентрації технологічних переходів.

Як відомо, розрізняють такі способи концентрації обробки: послідовна, паралельна і паралельно-послідовна, які здійснюються за допомогою комбінованого різального інструменту для обробки кількох поверхонь або послідовно однієї і тієї самої поверхні, а також багатоінструментну і багатопозиційну обробку. Стосовно металорізального обладнання із ЧПК послідовна концентрація технологічних переходів реалізується на токарних верстатах ЧПК, багатоцільових верстатах, а також на агрегатних верстатах із ЧПК, які, по суті, є багатошпindelними багатоцільовими верстатами. Паралельна концентрація технологічних переходів здійснюється, наприклад, за допомогою багатошпindelних головок, серед яких найефективнішими в умовах багатоменклатурного виробництва є переналагоджувані.

Інтенсифікація процесів механічної обробки на верстатах із ЧПК та підвищення їх продуктивності в умовах багатомоделного виробництва можлива шляхом удосконалення конструкцій верстатних пристроїв, оскільки найбільші витрати допоміжного часу при обробці на верстатах із ЧПК пов'язані з установленням-зняттям деталей, а також у зв'язку з переходом на обробку деталей іншого типорозміру.

# 1. Основи теорії інтенсивності формоутворення технологічних систем механічної обробки

## 1.1. Інтенсивність формоутворення як критерій ефективності технологічних систем

Відповідно до теорії продуктивності машин і праці розрізняють такі рівні продуктивності робочої машини: технологічну продуктивність  $K$ , циклову продуктивність  $Q_{\text{ц}}$ , фактичну продуктивність  $Q$ . У роботі вводиться поняття технічної продуктивності  $Q_{\text{тех}}$ .

Технологічна продуктивність  $K$  – це фіктивна продуктивність робочої машини, визначена без урахування витрат часу на допоміжні ходи, тобто

$$K = 1/t_p,$$

де  $t_p$  – час, що витрачається на робочі ходи, хв.

Циклова продуктивність розраховується з урахуванням часу  $t_e$ , що витрачається на допоміжні ходи під час виконання циклу обробки деталі.

$$Q_{\text{ц}} = 1/(t_p + t_e) = 1/t_{\text{ц}} = K \cdot t_p / t_{\text{ц}} = K \cdot \eta_{\text{np}},$$

де  $t_{\text{ц}}$  – період робочого циклу машини, хв;

$\eta_{\text{np}}$  – коефіцієнт продуктивності, що характеризує безперервність процесу формоутворення у межах робочого циклу.

Фактична продуктивність машини визначається з урахуванням позациклових витрат часу  $t_{\text{п}}$ , віднесених до періоду робочого циклу:

$$Q_{\text{ц}} = 1/(t_p + t_e + t_{\text{п}}) = Q_{\text{ц}} \cdot \eta_e = Q_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{м.с}} \cdot \eta_3,$$

де  $\eta_e$  – коефіцієнт використання робочої машини;

$\eta_{m.g}$  – коефіцієнт технічного використання, що враховує лише власні витрати часу;

$\eta_3$  – коефіцієнт завантаження обладнання.

Технічна продуктивність робочої машини розраховується за формулою

$$Q_{mex} = Q_{Ц} \cdot \eta_{m.g}.$$

Таким чином, усі позациклові витрати часу можна розділити на дві категорії:

1) витрати, викликані технічними причинами, які прямо або побічно пов'язані з конструкцією та режимом роботи машини, тобто власні витрати, які враховуються коефіцієнтом

$\eta_{m.g}$ ;

2) витрати, викликані зовнішніми організаційно-технічними причинами, до яких насамперед відносять витрати з організаційних причин (відсутність заготовок, несвоєчасний прихід та залишення робочого місця працівниками, брак попередніх операцій та ін.); вони враховуються коефіцієнтом  $\eta_3$ .

За своєю природою позациклові простої, а отже й значення  $Q$ ,  $\eta_g$ ,  $\eta_{m.g}$ ,  $\eta_3$ , є випадковими величинами, аналіз яких здійснюється з використанням математичного апарату теорії ймовірності, математичної статистики та масового обслуговування.

Час, що витрачається на робочі ходи (основний, або технологічний час), визначається з урахуванням кінематики різання. Так, під час обробки осьовими різальними інструментами (РІ) (свердла, зенкери, розвертки тощо) наскрізних отворів, різцями тощо основний час розраховується за формулою

$$t_p = (L_{gp} + L_o + L_{nep}) / n \cdot S_o = L_p / S_{xg},$$

де  $L_{gp}$  – довжина підведення та врізання РІ, мм;

$L_o$  – довжина оброблюваної поверхні, мм;

$L_{пер}$  – довжина перебігу ПІ, м;

$L_p$  – довжина робочого ходу ПІ, мм;

$n, S_o$  – параметри режиму різання;

$S_{хв}$  – хвилинна подача, мм/хв.

Після відповідних підстановок та перетворень отримуємо залежність для визначення продуктивності обробки  $Q$ , шт./год:

$$\begin{aligned} Q &= n \cdot S_o \cdot \eta_{np} \cdot \eta_{m.с} \cdot \eta_z / 60 \cdot L_p = \\ &= S_{хв} \cdot \eta_{np} \cdot \eta_{m.с} / 60 \cdot L_p = W / 60 \cdot L_p. \end{aligned}$$

Показник  $W$  враховує параметри процесу обробки та експлуатації, що впливають на продуктивність, а отже, характеризує інтенсивність формоутворення.

Керувати розрахунковою продуктивністю робочої машини можна шляхом зміни величини  $L_p$  або показника  $W$ . Зміна  $L_p$  пов'язана з диференціацією обробки, тобто послідовною обробкою поверхні за два-три переходи при зменшенні довжини робочих ходів за рахунок збільшення числа ПІ, що складають технологічний комплект ПІ, необхідний для виконання заданої технологічної задачі з обробки деталі. Можливості диференціації обробки часто обмежені технологічними або конструктивними умовами.

Більш перспективним є другий шлях, пов'язаний зі змінами режимів різання та структури ТС. Параметри режиму різання  $n, S_o$  залежать від умов процесу різання (властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів, виду і геометрії ПІ, числа взаємозв'язаних кінематично або структурно ПІ та ін.).

Коефіцієнт продуктивності  $\eta_{np}$  враховує технічні характеристики технологічного та допоміжного обладнання (швидкість прискорених переміщень виконавчих механізмів та вузлів, швидкодію механізмів фіксації та затиску заготовок та ін.). Дискретний характер процесу механічної обробки суттєво

впливає на продуктивність та інтенсивність формоутворення. Зміна інтенсивності формоутворення залежить при цьому від складу та ступеня автоматизації технологічного обладнання, на базі якого формується ТС, структури багатоінструментних наладок; виду і структури міжпозиційних зв'язків тощо.

Коефіцієнт технічного використання  $\eta_{т.в}$  враховує вплив позациклових витрат часу, пов'язаних з відновленням працездатності ТС після планових та випадкових простоїв з технічних причин, на інтенсивність формоутворення та продуктивність обробки. Керувати цим параметром можна шляхом варіювання структурою та складом обладнання ТС, а також режимами обробки.

Коефіцієнт завантаження  $\eta_z$  може бути збільшений шляхом наукової організації праці та організаційних заходів, які підвищують ритмічність та дисципліну праці.

Таким чином, показник «інтенсивність формоутворення», який визначає величину продуктивності обробки, у явному вигляді враховує параметри ТС, що дозволяє встановити вплив різних факторів та умов обробки на його величину, а також виявляти за рахунок чого змінюється продуктивність. Ці переваги, а також можливість керувати переліченими параметрами як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації шляхом цілеспрямованої зміни структури багатоінструментної та багатопозиційної обробки дозволяє використовувати інтенсивність формоутворення як критерій оптимальності ТС під час проектування та аналізу ефективності діючого обладнання.

Інтенсивність формоутворення – це фіктивна швидкість розосередженого технологічного впливу на об'єкти обробки, який здійснюється кінематично або структурно пов'язаними РІ ТС, визначена з урахуванням технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів [1–2].



## 1.2. Структура показника інтенсивності формоутворення

Інтенсивність формоутворення є системним показником, який має ієрархічну структуру, що відповідає структурі ТС, а також структурі показника «штучна продуктивність».

Проаналізуємо структуру інтенсивності формоутворення різних видів металорізального обладнання та ТС.

При одноінструментній обробці на одношпindelних верстатах з ручним керуванням та верстатах із ЧПК з ручною зміною РІ ієрархічна структура інтенсивності формоутворення складається з таких рівнів: технологічної інтенсивності формоутворення; циклової інтенсивності формоутворення; нормативної інтенсивності формоутворення; інтенсивності формоутворення верстата.

Технологічна інтенсивність формоутворення визначає величину технологічної продуктивності ТС.

Залежно від виду обробки та поставлених вимог інтенсивність формоутворення ТС механічної обробки може оцінюватися за допомогою показників лінійної інтенсивності формоутворення поверхні  $W^{\prime}$ , мм/хв; інтенсивності формоутворення поверхні  $W^{\prime\prime}$ , мм<sup>2</sup>/хв та об'ємної інтенсивності формоутворення  $W^{\circ}$ , мм<sup>3</sup>/хв.

Лінійна технологічна інтенсивність формоутворення є дійсною швидкістю поступального руху РІ в напрямку робочої подачі (хвилинною подачею):

$$W_T^{\prime} = n \cdot S_o.$$

Інтенсивність формоутворення поверхні – це площа поверхні заготовки, яка обробляється за одиницю часу. Величину технологічної інтенсивності формоутворення елементарної циліндричної поверхні деталі можна визначити за формулою

$$W_T^{\prime\prime} = \pi \cdot d \cdot L_o / (L_o / n \cdot S_o) = \pi \cdot d \cdot W_T^{\prime} = 1000 \cdot V \cdot S_o,$$

де  $d$  – діаметр оброблюваної поверхні, мм;

$V$  – швидкість різання ПІ, м/хв.

Технологічна інтенсивність формоутворення площини

$$W_T^{\Pi} = b \cdot L_o / (L/n \cdot S_o) = b \cdot n \cdot S_o = b \cdot W_T^a,$$

де  $b$  – ширина оброблюваної площини, мм.

Об'ємна інтенсивність формоутворення – це об'єм припуску, який видаляється за одиницю часу.

Об'ємна технологічна інтенсивність формоутворення циліндричної поверхні

$$\begin{aligned} W_T^o &= \pi \cdot L_o \cdot (R^2 - r^2) / (L/n \cdot S_o) = \pi \cdot n \cdot S_o \cdot t \cdot (2R - t) = \\ &= \pi \cdot W_T^a \cdot t \cdot (2R - t), \end{aligned}$$

де  $t$  – глибина різання, мм;

$R$  – радіус поперечного перерізу заготовки, мм;

$r$  – радіус поперечного перерізу деталі, мм.

Об'ємна технологічна інтенсивність формоутворення площини

$$W_T^o = b \cdot L_o \cdot t / (L/n \cdot S_o) = b \cdot t \cdot n \cdot S_o = b \cdot t \cdot W_T^a.$$

Показники лінійної інтенсивності формоутворення потрібно використовувати для аналізу та синтезу технологічних процесів обробки осьовими ПІ, точінням, струганням, довбанням та ін. З використанням показника інтенсивності формоутворення поверхні оцінюється ефективність чистової та оздоблювальної обробки поверхонь деталі. Показники об'ємної інтенсивності формоутворення доцільно застосовувати для оцінки процесів обробки поверхонь складної форми з різною величиною глибини різання та інших параметрів режиму різання.

Подальший розгляд теоретичних основ інтенсивності формоутворення виконуватимемо на прикладі обробки отворів осьовими ПІ, тобто використовуючи показник лінійної інтенсивності формоутворення.

Циклову інтенсивність формоутворення  $W_{ци}$  одиночним ПІ, що визначає величину циклової продуктивності обробки,

знаходимо з урахуванням допоміжного часу  $t_{\partial}$  у циклі роботи верстата, який витрачається на керування верстатом, переміщення РІ, установлення, закріплення і зняття деталі та РІ, вимірювання деталі:

$$W_{\text{ци}} = W_{Ti} \cdot \eta_{\text{нpi}} = W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{oni},$$

де  $t_{pi}$  – основний (технологічний) час обробки  $i$ -м РІ, хв;

$t_{oni}$  – оперативний час обробки  $i$ -м РІ, хв.

Для універсальних верстатів з ручним керуванням  $t_{on} = t_p + t_{\partial}$ , а для верстатів з ЧПК  $t_{on} = t_{\text{ца}} + t_{\text{с}} \cdot K_{\text{тс}}$  ( $t_{\text{ца}}$  – час циклу автоматичної роботи верстата за програмою, хв;  $K_{\text{тс}}$  – поправковий коефіцієнт на час виконання ручної допоміжної роботи залежно від партії оброблюваних деталей). У свою чергу,

$$t_{\text{ца}} = t_p + t_{\text{мд}},$$

де  $t_{\text{мд}}$  – машинно-допоміжний час роботи верстата за програмою (на підведення заготовки або РІ від вихідних положень у зону обробки і відведення назад; час установлення РІ на розмір, зміну РІ, зміну величини та напрямку подачі; час технологічних зупинок та ін.), хв.

$$t_{\partial} = t_{\partial.y} + t_{\partial.on} + t_{\partial.вим},$$

де  $t_{\partial.y}$  – час на установлення та зняття деталі вручну або підйомником, хв;

$t_{\partial.on}$  – допоміжний час, пов'язаний з операцією, що не увійшов до керуючої програми, хв;

$t_{\partial.вим}$  – допоміжний час, що не перекривається, на вимірювання, хв.

Нормативну інтенсивність формоутворення  $W_{\text{Hi}}$  одиничним РІ визначаємо з урахуванням норм часу  $H_{\text{чи}}$  на виконання операції за формулою

$$W_{Hi} = W_{Ti} \cdot t_{pi} / H_{чи}.$$

У свою чергу,

$$H_{чи} = T_{ui} + T_{нзи} / N_n$$

$$T_{ui} = t_{oni} \cdot [1 + 0,01 / a_{mex} + a_{opz} + a_{вон}]$$

де  $N_n$  – число деталей у партії, шт.;

$a_{mex}$ ,  $a_{opz}$ ,  $a_{вон}$  – час на технічне й організаційне обслуговування робочого місця, на відпочинок та особисті потреби при одноверстатному обслуговуванні, % від  $t_{on}$ .

При одноінструментній обробці на спеціальних верстатах у великосерійному та масовому виробництві підготовчо-заклучний час відсутній, тобто  $H_{чи} = T_{ui}$ . Інтенсивність формоутворення  $W_{Bi}$  верстата при обробці одиночним РІ визначається з урахуванням позациклових витрат часу, які оцінюються за допомогою коефіцієнта технічного використання:

$$W_{Bi} = W_{Li} \cdot \eta_{m.e}.$$

При одноінструментній послідовній обробці одного або кількох отворів в одній і тій самій заготовці на верстатах з ручною або автоматичною зміною РІ технологічна інтенсивність формоутворення  $W_T$  комплектом РІ визначається за формулою

$$W_T = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} = \sum_{i=1}^{N_k} \eta_i \cdot S_{oi},$$

де  $N_k$  – число РІ у технологічному комплекті, необхідному для обробки даної деталі, шт.

Під технологічним комплектом розуміємо сукупність РІ, достатню за складом і чисельністю для реалізації технологічних завдань з виготовлення деталі, пов'язаних між собою кінематично або структурно.

Циклова інтенсивність формоутворення  $W_{Ц}$  технологічним комплектом РІ визначається за формулою

$$W_{Ц} = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot \eta_{npi} = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{on},$$

де  $t_{on}$  – оперативний час верстата, що враховує сумарні витрати основного і допоміжного часу, пов’язані з виконанням  $N_k$  технологічних переходів, хв.

Нормативна інтенсивність формоутворення  $W_H$  технологічним комплектом РІ визначається за формулою

$$W_H = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot t_{pi} / H_{ч}.$$

Інтенсивність формоутворення  $W_B$  верстата при обробці технологічним комплектом РІ визначається за формулою

$$W_B = W_H \cdot \eta_{m.e}.$$

При багатоінструментній обробці з використанням багатошпindelних головок, шпindelних насадок і коробок параметри багатоінструментної наладки визначаються на основі вихідних режимів різання, розрахованих для РІ даної наладки без урахування обмежень, пов’язаних з наявністю між ними кінематичних зв’язків. Хвилинну подачу наладки  $S_M^H$  беруть звичайно такою, що дорівнює мінімальній величині хвилинної подачі серед РІ, що входять до цієї наладки, тобто

$$S_M^H = \min\{S_{oi}\},$$

а довжина робочого ходу налагодження

$$L_p^H = \max\{L_{pi}\}.$$

Тоді час переміщення наладки на робочій подачі буде

$$t_p^H = L_p^H / S_M^H.$$

Час робочого циклу наладки визначається за формулою

$$t_{Ц}^H = t_p^H + t_{ин}^H + t_{жу},$$

де  $t_{ин}^H$  – час швидких переміщень (швидке підведення та відведення) силового агрегата, хв.

$t_{жу}$  – час витримки на жорсткому упорі, хв.

При обробці на однопозиційному верстаті однією багатоінструментною наладкою розрізняють такі ієрархічні рівні інтенсивності формоутворення: технологічну інтенсивність формоутворення, інтенсивність багатоінструментної обробки, циклову інтенсивність формоутворення, нормативну інтенсивність формоутворення, інтенсивність формоутворення верстата.

Інтенсивність багатоінструментної обробки розраховується за формулою

$$W_{BI} = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{Ц}^H.$$

Тут і надалі  $t_{pi}$  розраховується, як і під час одноінструментної обробки кожним із РІ наладки.

Величина інтенсивності формоутворення на інших вказаних рівнях визначається за вищенаведеними формулами.

Однопозиційна обробка заготовки кількома багатоінструментними налагодженнями може здійснюватися за такими структурно-технологічними схемами:

1) одночасна багатостороння обробка багатоінструментними налагодженнями нерухомої заготовки, закріпленої у пристрої, розташованому в центрі агрегатного верстата (АВ);

2) послідовна одно- або багатостороння обробка заготовки, закріпленої у пристрої, який встановлено на станині або поворотному столі, багатоінструментними налагодженнями на АВ зі змінними шпіндельними коробками (ЗШК);



3) послідовна одно- або багатостороння обробка заготовки, закріпленої у пристрої, установленому на робочому столі або безпосередньо на ньому, багатошпindelними головками на багатоцільовому верстаті.

Інтенсивність багатоінструментної обробки в таких випадках знаходимо за формулою

$$W_{BI} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_{ij}} W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{Цj}^n;$$

$$N_{\kappa} = \sum_{j=1}^m N_{\kappa j},$$

де  $N_{\kappa j}$  – число РІ в  $j$ -й багатоінструментній налазці, шт.;

$m$  – число багатоінструментних наладок, що застосовуються для обробки заготовок, шт.

Циклова інтенсивність формоутворення

$$W_{Ц} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_{ij}} W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{on},$$

де  $t_{on}$  – оперативний час верстата, який враховує сумарні витрати основного і допоміжного часу, пов'язані з обробкою заготовки  $m$  багатоінструментними налагодженнями.

Багатопозиційна обробка на АВ здійснюється за двома структурно-технологічними схемами:

1) силові агрегати нерухомі, а заготовки закріплені у пристроях, установлених на транспортно-базуючих вузлах (поздовжньо або поворотно-дільному столі, поворотному барабані), отримують періодичні міжпозиційні переміщення;

2) силові агрегати нерухомі, а заготовка, закріплена у пристрої, установленому на поворотному столі в центрі верстата, періодично повертається навколо осі стола разом із пристроєм.

Структура показника інтенсивності формоутворення стосовно багатопозиційних АВ така: технологічна інтенсивність формоутворення; інтенсивність багатоінструментної обробки;

інтенсивність  $W_{БП}$  багатопозиційної обробки; нормативна інтенсивність формоутворення; інтенсивність формоутворення АВ.

Система залежностей для розрахунків інтенсивності формоутворення АВ на різних ієрархічних рівнях наведена нижче:

$$W_T = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} = \sum_{i=1}^{N_k} n_i \cdot S_{oi}; W_{БП} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_{nj}} W_{Ti} \cdot t_{pi} / t_{Цj}^H;$$

$$W_{БП} = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot t_{pi} / \tau_{AB}; W_H = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti} \cdot t_{pi} / H_{\alpha};$$

$$W_{AB} = W_{БП} \cdot \eta_{m,\epsilon}.$$

Тут  $\tau_{AB}$  – такт АВ, який визначається за циклограмою роботи верстата шляхом підсумовування тривалості елементів робочого циклу, що не перекриваються, хв. За цими самими залежностями (виключаючи рівень  $W_H$ , який відсутній) визначається інтенсивність формоутворення на однономенклатурних АВС. Для багатоніменклатурних АВ та АВС вводиться ще один рівень інтенсивності формоутворення, а саме інтенсивність багатоніменклатурної обробки  $W_{БН}$ , що визначається з урахуванням коефіцієнта  $g_{\alpha}$  часової гнучкості ТС за формулою

$$W_{БН} = W_{БП} \cdot g_{\alpha}; g_{\alpha} = 1 / \left( 1 + \sum_{i=1}^{K_T} T_{пер} / \tau_i \cdot N_{ni} \right),$$

де  $T_{пер}$  – час переналагодження верстата або ТС при переході на обробку деталі  $i$ -го типорозміру, хв;

$\tau_i$  – час циклу обробки деталі  $i$ -го типорозміру, хв;

$N_{ni}$  – розмір виробничої партії деталей  $i$ -го типорозміру, шт.;

$K_T$  – число типів деталей, шт.

Графічна інтерпретація структури показника інтенсивності формоутворення багатоменклатурної ТС наведена на рис. 1.1.

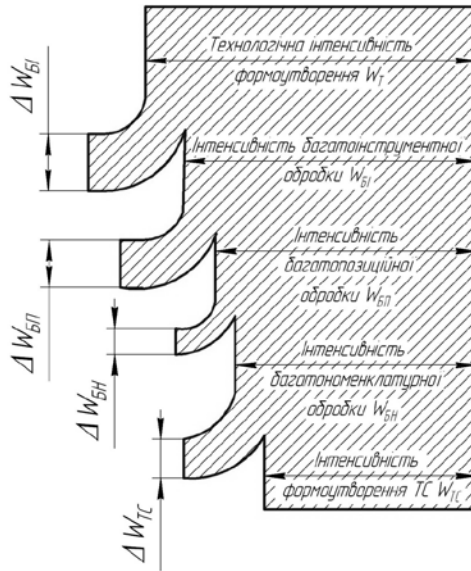


Рис. 1.1. Структура показника інтенсивності формоутворення багатоменклатурної ТС

Технологічна інтенсивність формоутворення ТС є вихідним рівнем, який є максимальним для технологічно мінімального комплексу РІ. Перехід на кожний наступний ієрархічний рівень інтенсивності формоутворення супроводжується втратами інтенсивності, якщо число РІ у комплекті не збільшується, що аналогічно балансу продуктивності ТС. Втрати інтенсивності  $\Delta W_{БІ}$  пов'язані з наявністю лімітування за інтенсивністю та довжиною обробки одиночними РІ у багатоінструментних налагодженнях. При формуванні багатопозиційних ТС виникають втрати інтенсивності  $\Delta W_{БП}$  внаслідок лімітування за тривалістю циклів багатоінструментних налагодок і витрат часу на міжпозиційне транспортування, фіксацію-розфіксацію, закріплення-розкріплення заготовок на робочих позиціях та ін. Втрати

інтенсивності  $\Delta W_{BH}$  пов'язані з витратами часу на виконання робіт з переналагодження ТС при переході на обробку даної деталі. Втрати інтенсивності  $\Delta W_{\eta}$  обумовлені витратами часу на відновлення працездатності ТС після планових та випадкових простоїв з технічних причин.

Динаміку зміни інтенсивності формоутворення можна простежити, аналізуючи коефіцієнти інтенсивності: багатоінструментної  $K_{BI} = W_{BI} / W_T$ ; багатопозиційної  $K_{BPI} = W_{BPI} / W_{BI}$  та багатономенклатурної  $K_{BNI} = W_{BNI} / W_{BPI}$  обробки.

Мінімізувати втрати інтенсивності формоутворення  $\Delta W_{BI}, \Delta W_{BPI}$  можна шляхом оптимізації структури багатоінструментної та багатопозиційної обробки, а  $\Delta W_{BNI}$  – збільшенням частки механізованого та автоматизованого переналагодження в загальному обсязі робіт з переналагодження ТС та підвищенням швидкодії механізмів і пристроїв, які здійснюють переналагодження. Резерв інтенсивності  $\Delta W_{\eta}$ , визначений з урахуванням заданої ймовірності безвідмовного функціонування ТС, дозволяє забезпечити необхідну продуктивність без суттєвого ускладнення структури ТС.

Для порівняльного аналізу ТС і технологічних процесів та оцінки їх ефективності доцільно використовувати питомі показники інтенсивності формоутворення, що припадає на один РІ.

Ієрархічна структура показника інтенсивності формоутворення, що відповідає структурі технологічної системи, дозволяє використовувати цей критерій на всіх етапах аналізу та синтезу технологічних систем, збільшуючи число параметрів, що враховуються, при переході до більш високих ієрархічних рівнів та для уточнення структурно-технологічної схеми.

Використання критерію інтенсивності формоутворення в процесі синтезу ТС спрощує проблему формалізації та автоматизації проектування і оптимальної структури ТС.

### 1.3. Методика дослідження інтенсивності формоутворення діючих технологічних систем

Метою дослідження інтенсивності формоутворення ТС є визначення їх технічної ефективності, а також виявлення резервів та шляхів підвищення інтенсивності та продуктивності обробки.

Вихідними даними для аналізу інтенсивності формоутворення є: робоче креслення оброблюваної деталі; технологічний процес; конструкторсько-технологічний опис досліджуваного металорізального обладнання з наведенням його проектних характеристик; фактичні значення тривалості робочого циклу обладнання та його елементів, а також показників надійності та продуктивності, отриманих у результаті натурних випробувань; нормативи режимів різання та норми часу, які діють у проектній організації-розробнику металорізального обладнання або технологічних процесів.

Під час дослідження багатопозиційних ТС, до складу яких входять багатоінструментні наладки, технологічну інтенсивність формоутворення безпосередньо за допомогою технологічної документації визначити не можна. Вихідні режими різання, які визначають рівень інтенсивності формоутворення для кожного із РІ, що входять до технологічного комплексу для обробки даної деталі, необхідно визначити за нормативами режимів різання, що використовуються в проектній організації.

Питома нормативна технологічна інтенсивність формоутворення  $\overline{W}_T^h$ , що припадає на один РІ, розраховується за формулою

$$\overline{W}_T^h = \sum_{i=1}^{N_k} W_{Ti}^h / N_k = \sum_{i=1}^{N_k} n_{ni} \cdot S_{oi}^h / N_k,$$

де  $n_{ni}$ ,  $S_{oi}^h$  – нормативні значення елементів режиму різання  $i$ -м РІ.

На основі фактичних значень параметрів, отриманих у результаті натурних випробувань, розрахункових питомих величин інтенсивності формоутворення на різних рівнях виконується за такими залежностями:

$$\overline{W}_{BI} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_{ij}} W_{Ti}^H \cdot t_{pi}^H / t_{Цj}^H \cdot N_{\kappa},$$

де  $t_{pi}^H$  – час робочого ходу  $i$ -го РІ, розрахований за нормативним режимом різання, хв.

$$\overline{W}_{BII} = \sum_{i=1}^{N_{\kappa}} W_{Ti}^H \cdot t_{pi}^H / \tau_{\phi} \cdot N_{\kappa},$$

де  $\tau_{\phi}$  – фактична середня величина такту верстата або ТС, встановлена шляхом натурних випробувань, хв.

$$\overline{W}_H = \sum_{i=1}^{N_{\kappa}} W_{Ti}^H \cdot t_{pi}^H / H_{\phi} \cdot N_{\kappa},$$

де  $H_{\phi}$  – фактична середня величина норми часу на технологічну операцію, хв.

$$\overline{W}_{BH} = \overline{W}_{BII} \cdot g_{\phi}^{\phi},$$

де  $g_{\phi}^{\phi}$  – фактичне значення коефіцієнта часової гнучкості багатонаменклатурного верстата або ТС.

$$\overline{W}_B = \overline{W}_{BH} \cdot \eta_{m.с}^{\phi};$$

$$\overline{W}_B^{\phi} = \overline{W}_{BH} \cdot \eta_{\phi}^a,$$

де  $\eta_{m.с}^{\phi}$ ,  $\eta_{\phi}^a$  – фактичні значення відповідно коефіцієнтів технічного використання та використання.

Питома інтенсивність формоутворення – це математичне сподівання інтенсивності формоутворення одиничним РІ, яка є випадковою величиною. Для більш об'єктивного уявлення про характер цієї випадкової величини доцільно також установити



закон її розподілу, що можливо при досить великому обсязі інформації про фактичні величини інтенсивності формоутворення одиничним РІ.

Аналізуючи фактичні питомі показники інтенсивності формоутворення на ієрархічних рівнях, а також фактичні значення коефіцієнтів інтенсивності багатоінструментної  $K_{БІ}^{\phi}$ , багатопозиційної  $K_{БП}^{\phi}$  та багатономенклатурної  $K_{БН}^{\phi}$  обробки та зіставляючи їх з відповідними характеристиками інших видів ТС, можна об'єктивно оцінювати технічну ефективність досліджуваних ТС, а при зіставленні з проектними величинами – ступінь реалізації їх виробничого потенціалу.

#### **1.4. Порівняльний аналіз інтенсивності формоутворення металорізальних верстатів для обробки корпусних деталей**

Корпусні деталі належать до числа найбільш складних і трудомістких у виготовленні, тому як об'єкт аналізу нами обраний блок-картер двигуна СМД-31. Уявлення про трудомісткість виготовлення цієї деталі за видами обробки дають діаграми, наведені на рис. 1.2.

Як бачимо, найбільший обсяг у загальній трудомісткості становить обробка отворів, причому переважає свердління (36,7%), зенкерування (24,8%), різьбонарізання (16,5%). Тому аналіз інтенсивності формоутворення виконуємо для технологічних процесів обробки кріпильних та допоміжних отворів.

Вибір моделей металорізальних верстатів здійснювався з урахуванням конструктивно-технологічних характеристик оброблюваних деталей, потужності привода головного руху та технологічних характеристик обладнання, в першу чергу рівня автоматизації та ступеня гнучкості.

Із числа радіально-свердлильних верстатів з ручним керуванням обраний верстат моделі 2М55. Значну частину робочого циклу при обробці на цьому верстаті становить

допоміжний час, який витрачається на зміну РІ та режимів різання вручну після обробки кожним РІ, а також на позиціонування, тобто переміщення РІ у подальше місце обробки вручну. Зважаючи на те, що позиціонування при цьому найбільш трудомістке, завжди вигідніше переходити до обробки подальшого отвору після виконання усіх переходів з обробки попереднього.

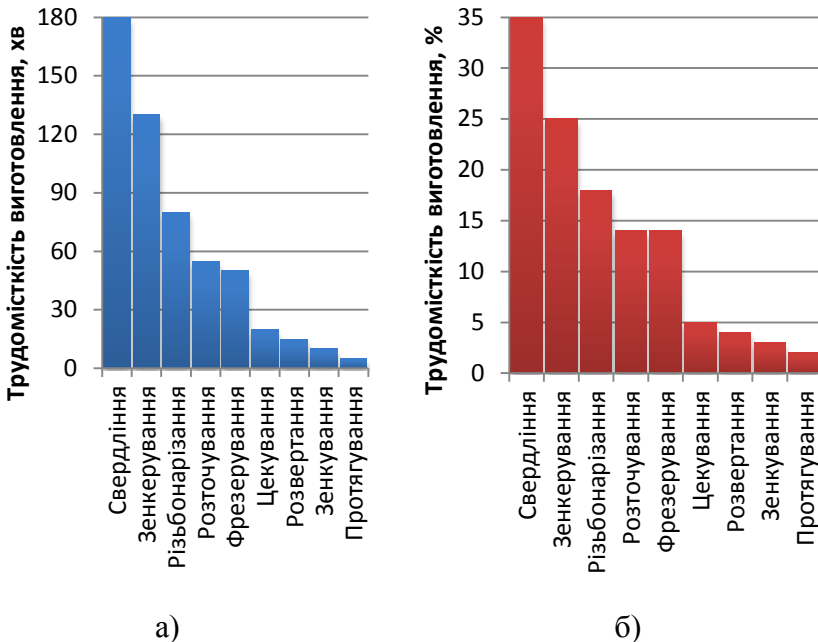


Рис. 1.2. Трудомісткість виготовлення блок-картера двигуна СМД-31 за видами обробки у хвиликах (а) і у % (б) від загальної трудомісткості

Розглядається також координатно-свердлильний верстат із ЧПК моделі 2554Ф2. У зв'язку зі скороченням витрат часу на позиціонування, яке виконується за керуючою програмою автоматично, трудомісткість виготовлення деталі зменшується. Але зміна РІ виконується оператором вручну, тому при обробці групи однакових отворів, розташованих на одній площині заготовки, часто доцільно одним і тим самим РІ послідовно

обробляти всі отвори групи, а вже потім змінювати його. Проектуючи технологічний процес для верстатів із ЧПК, враховували необхідність центрування отворів діаметром до 20 мм.

Із групи багатоцільових верстатів обираємо свердлильно-фрезерно-розточувальний верстат моделі ЛР395ПМФ4.01, місткість інструментального магазину якого дозволяє розмістити повний комплект РІ, необхідний для виконання технологічних переходів з обробки отворів. Перевагами цього верстата порівняно з координатно-свердлильним із ЧПК є автоматична зміна РІ, наявність поворотного робочого стола, що забезпечує обробку заготовки з чотирьох боків, а також значно вищі швидкості прискорених переміщень виконавчих механізмів.

Ураховуючи, що час повороту стола із заготовкою значно менший, ніж час зміни РІ, потрібно обробляти одним РІ всі однакові отвори, розташовані на різних боках заготовки і тільки після цього змінювати його.

Прогресивним видом обладнання в умовах великосерійного виробництва є АВ із ЧПК, які компонуються із уніфікованих елементів. На відміну від традиційних АВ кожний силовий агрегат може переміщуватися за трьома координатами, що забезпечують значне збільшення оперативного поля верстата; силові агрегати оснащені інструментальними магазинами і механізмами автоматичної зміни РІ; керування координатними переміщеннями рухомих органів верстата, роботою шпindelних бабок, зміною РІ, технологічними командами здійснюється від системи ЧПК. За технологічними можливостями АВ із ЧПК можна віднести до багатошпindelних багатоцільових верстатів. Вони оснащені механізмами фіксації та затискання пристроїв супутників (палет) і можуть поставлятися з агрегатами для автоматичного завантаження та розвантаження супутників. На цьому верстаті заготовка обробляється з трьох боків одночасно, а потім, після повороту стола на 180°, обробляється четвертий бік блок-картера. Така структура робочого циклу дозволяє скоротити

основний час на 43% порівняно з обробкою на одношпindelному багатощельовому верстаті.

На основі багатощельових верстатів моделі ЛР395ПМФ4.01 та АВ з ЧПК можуть бути створені ГВС, які забезпечують ефективну роботу при обмеженій кількості виробничого персоналу. Кількість ГВМ у кожній із цих ГВС визначалася, виходячи із заданої продуктивності – 22 дет./год, що відповідає проектній продуктивності АВС моделі 1Л470, в якій оброблявся блок-картер двигуна СМД-31 у період дослідження і яка також розглядається в ході порівняльного аналізу інтенсивності формотворення ТС.

Для цих ГВС характерна розгалужена траса автоматичної транспортної системи, що дозволяє розробити більш компактне планування та місткі автоматизовані склади, які використовуються для зберігання заготовок, установлювально-затискних пристроїв, пристроїв-супутників та оброблених деталей. Переміщення об'єктів зберігання на склад та зі складу на конвеєр налагоджувальної станції виконується автоматизованим краном-штабелером. Конвеєр з'єднує склад із налагоджувальними станціями, на яких оператори завантажують заготовки у пристрої-супутники, які потім повертаються назад до складу. За викликом пристрої-супутники із заготовками транспортуються зі складу на одну з кількох завантажувальних позицій за допомогою конвеєра. На цих позиціях виконується установлення пристроїв-супутників із заготовками на робочару з індуктивним керуванням, яка переміщується до ГВМ.

Кожний ГВМ оснащений пристроєм для автоматичної зміни комплектів РІ, який замінює комплект із затупленими РІ на новий, доставлений робочарою, що входить до системи інструментального забезпечення ГВС. Ці робочари обслуговують ГВМ з тильного боку, тоді як заготовки подаються на верстат спереду. До ГВС входять також системи автоматичного контролю, видалення відходів та ін.

Високий рівень продуктивності забезпечують АВ із ЗПК, які доцільно використовувати у багатоменклатурному виробництві при річній виробничій програмі випуску виробів

кожного найменування близько 50 тис. штук. Запропонована нами схема компонування такого верстата має магазин змінних шпіндельних коробок у вигляді складу вертикального компонування.

Обробка отворів осьовими РІ у виробничих умовах виконувалась у 28 АВ, які входили до складу АВС моделі 1Л470, що мала продуктивність 22 дет./год при проектній величині такту 1,9 хв і розрахунковому коефіцієнті використання  $\eta_s = 0,7$ . Розроблені технологічні процеси обробки блок-картера на досліджуваному металорізальному обладнанні й виконано технічне нормування, результати якого наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні норми часу на технологічні операції обробки  
блок-картера двигуна СМД-31

Модель металорізального верстата	Елементи технічної норми часу, хв			
	$T_o$	$T_d$	$T_u$	$H_c$
Радіально-свердлильний верстат мод. 2М55	184,46	163,12	375,38	375,42
Координатно-свердлильний верстат із ЧПК мод. 2554Ф2	201,03	64,29	289,20	289,69
Багатоцільовий верстат мод. ЛР395ПМФ4.01	181,00	8,38	219,68	220,02
АВ із ЧПК	97,70	8,38	123,05	123,26
АВ із ЗШК	8,05	17,79	25,84	26,07

З використанням отриманих часових характеристик технологічних операцій за вищевикладеною методикою аналізу інтенсивності формоутворення визначені питомі величини інтенсивності формоутворення для всіх досліджуваних металорізальних верстатів. Результати розрахунків наведені у табл. 1.2, а на рис. 1.3 показана діаграма, що характеризує інтенсивність формоутворення при свердлінні отворів блок-картера на різних видах металорізального обладнання.

Таблиця 1.2

Значення питомої інтенсивності формоутворення за видами обробки та типом обладнання

Тип верстата	Вид обробки							
	Свердління	Розсвердлювання	Зенкерування	Розгортання	Центрування	Зенкування	Цекування	Різьбо-нарізання
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Технологічна інтенсивність формоутворення <math>\bar{W}_T</math>, мм/хв</b>								
ABC	58,2	44,0	54,92	51,9	–	39,32	32,73	109,8
AB із ЗШК	115,63	200,3	435,28	133,6	–	170,64	63,71	223,18
ГВС (AB із ЧПК)	172,56	307,02	224,5	44,72	100	64,68	42,52	228,43
AB із ЧПК	172,56	307,02	224,5	44,72	100	64,68	42,52	228,43
ГВС (БВ)	172,56	307,02	224,5	44,72	100	64,68	42,52	228,43
БВ	172,56	307,02	224,5	44,72	100	64,68	42,52	228,43
КСВ із ЧПК	172,56	307,02	224,5	44,72	100	64,68	42,52	228,43
РСВ	122,88	280,74	142,07	41,15	–	52,68	22,61	188,33

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Циклова інтенсивність формоутворення <math>\overline{W}_{Ц}</math>, мм/хв</b>								
ГВС (БВ)	0,343	0,162	0,308	0,352	0,027	0,027	0,096	0,158
БВ	0,335	0,158	0,301	0,343	0,026	0,026	0,035	0,154
КСВ із ЧПК	0,239	0,113	0,215	0,245	0,188	0,189	0,025	0,110
РСВ	0,182	0,086	0,164	0,187	–	0,014	0,019	0,077
<b>Інтенсивність багатоінструментної обробки <math>\overline{W}_{БІ}</math>, мм/хв</b>								
АВС	26,78	22,52	32,08	38,87	–	1,37	5,75	47,69
АВ із ЗШК	56,294	66,328	159,897	89,917	–	7,595	7,121	77,678
ГВС (АВ із ЧПК)	80,02	64,16	99,61	32,87	14,29	13,25	13,57	52,38
АВ із ЧПК	80,02	64,16	99,61	32,87	14,29	13,25	13,57	52,38

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Нормативна інтенсивність формоутворення <math>\overline{W}_H</math>, мм/хв</b>								
ГВС (АВ із ЧПК)	0,562	0,266	0,505	0,578	0,044	0,044	0,058	0,259
АВ із ЧПК	0,514	0,243	0,482	0,528	0,041	0,041	0,053	0,237
ГВС (БВ)	0,305	0,145	0,275	0,313	0,024	0,024	0,032	0,141
БВ	0,288	0,136	0,259	0,296	0,029	0,023	0,030	0,133
КСВ із ЧПК	0,219	0,104	0,197	0,225	0,017	0,017	0,023	0,104
РСВ	0,169	0,08	0,152	0,173	–	0,013	0,017	0,071
<b>Інтенсивність багатопозиційної обробки <math>\overline{W}_{БП}</math>, мм/хв</b>								
АВС	21,78	14,46	23,55	28,07	–	1,04	3,344	13,36
АВ із ЗШК	8,178	4,124	7,887	8,182	–	0,606	0,927	4,309
ГВС (АВ ІЗ ЧПК)	0,627	0,297	0,564	0,643	0,050	0,050	0,065	0,269



Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
АВ із ЧПК	0,595	0,281	0,534	0,609	0,047	0,047	0,062	0,274
<b>Інтенсивність формоутворення верстата / технологічної системи <math>\overline{W}_B / \overline{W}_{TC}</math>, мм/хв</b>								
АВС	15,25	10,12	16,49	19,65	–	0,73	2,34	9,35
АВ із ЗШК	2,725	2,887	5,521	5,727	–	0,424	0,649	9,016
ГВС (АВ із ЧПК)	0,502	0,238	0,451	0,514	0,040	0,040	0,052	0,231
АВ із ЧПК	0,476	0,225	0,427	0,487	0,038	0,038	0,050	0,219
ГВС (БВ)	0,244	0,116	0,220	0,250	0,019	0,019	0,026	0,113
БВ	0,245	0,118	0,220	0,252	0,020	0,020	0,026	0,113
КСВ із ЧПК	0,186	0,088	0,167	0,191	0,014	0,014	0,020	0,086
РСВ	0,11	0,052	0,099	0,112	–	0,009	0,011	0,015

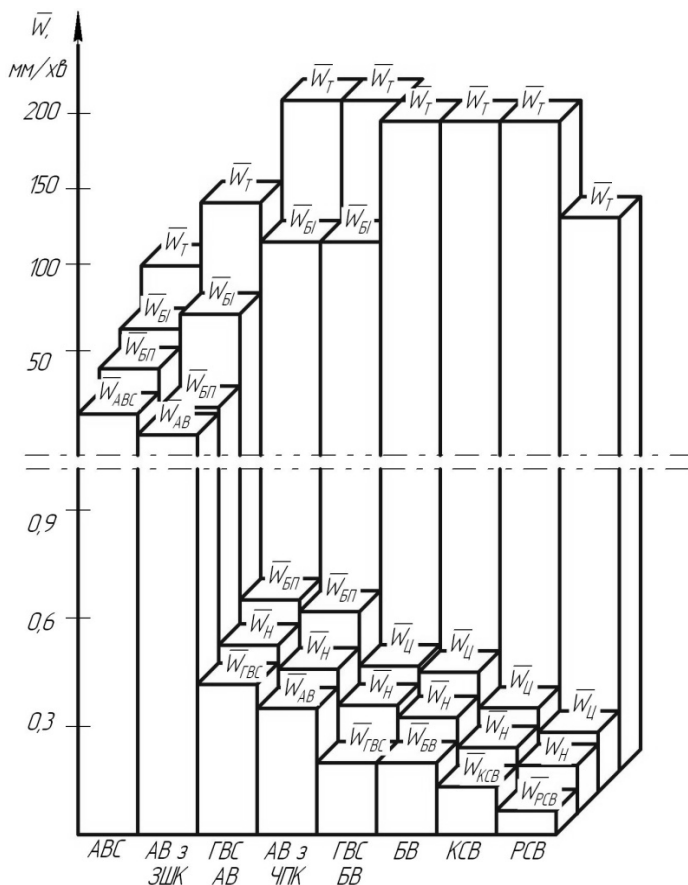


Рис. 1.3. Діаграма питомої інтенсивності формоутворення при свердлінні отворів

Виконаний порівняльний аналіз інтенсивності формоутворення ТС підтверджує, що цей показник дозволяє об'єктивно і достовірно визначити його числові значення на кожному ієрархічному рівні ТС, зіставити їх між собою, а також для різних видів обладнання, що дозволяє оцінити його продуктивність та визначити можливість і шляхи її підвищення на кожному етапі технологічного проектування. Це свідчить про те, що показник інтенсивності формоутворення має загальний характер і є абсолютним.

Як бачимо, найменші втрати інтенсивності формоутворення на кожному ієрархічному рівні ТС, починаючи з технологічної інтенсивності формоутворення, характерні для АВС та АВ, які відзначаються повною автоматизацією робочого циклу та максимальною концентрацією технологічних переходів. Очевидно, що найбільші витрати інтенсивності формоутворення порівняно з вихідним рівнем характерні для тих видів металорізального обладнання, де паралельна концентрація технологічних переходів відсутня або мінімальна. Найменшу інтенсивність формоутворення мають універсальні верстати з ручним керуванням.

### **1.5. Аналіз інтенсивності формоутворення на агрегатних верстатних системах**

Найскладнішими ТС механічної обробки є багатомономенклатурні АВС, призначені, в першу чергу, для обробки складних і трудомістких корпусних деталей. Нами проаналізована інтенсивність формоутворення АВС, які обробляють трудомісткі корпусні деталі двигунів внутрішнього згоряння [3]. Характеристики цих деталей наведені в табл. 1.3, а проектні технічні показники досліджуваних АВС, спроектованих у Московському СКБ АЛ і АВ та виготовлених на Московському верстатному заводі ім. Орджонікідзе, – у табл. 1.4.

Проектні значення коефіцієнта використання для всіх АВС взяті такими, що дорівнюють 0,7.

Результати аналізу конструктивних параметрів оброблюваних отворів, а саме розподіли діаметрів  $D$  і довжин  $L_o$  оброблюваних отворів наведено на рис. 1.4. Як бачимо, математичні сподівання  $\bar{D} \approx 11$  мм;  $\bar{L}_o \approx 24$  мм, а відношення  $L_o/D \leq (3-4)$  у більшості випадків, тобто умови свердління сприятливі.

Таблиця 1.3

## Характеристики корпусних деталей

Найменування деталі	Матеріал	Габаритні розміри, мм	Маса, кг	Модель АВС
Картер шестірень	Сірий чавун СЧ-15, НВ 163-229	587x400x41,5	15,17	1Л404 в
Кришка картера шестірень	Сірий чавун СЧ-15, НВ 170-241	587x400x78	17	1Л458 в
Картер маховика	Сірий чавун СЧ-15, НВ 163-229	588x520x164	43,8	1Л398 б, в
Блок-картер двигуна СМД-31	Сірий чавун СЧ-20, НВ 170-241	1006x390x478	250	1Л470 д, е, і, к
Блок-картер двигуна СМД-21/22	Сірий чавун СЧ-20, НВ 170-241	684x328x478	139,8	1Л186
Блок-картер двигуна СМД-14	Сірий чавун СЧ-20, НВ 170-241	684x328x47	139,8	1Л61– 1Л64
Блок-картер двигуна СМД-60	Спеціальний чавун, НВ 170-241	602x666x448,5	230	1Л296 б, в, г, д, е
Кришка коробки переміни передач	Сплав алюмінієвий АЛ-4, НВ 60	219,5x180x194	8,4	1Л491 а

## Проектні технічні показники діючих АВС

Модель АВС	Показник	
	Час циклу, с	Продуктивність, шт./год
1Л61–1Л64	63	40
1Л404 в	60	42
1Л438 в	60	42
1Л398 б, в	90	28
1Л470 д, є, і, к	114	22
1Л186 б, в, г	120	21
1Л296 б, в, г, д, є	72	35
1Л491 а	43	58
1Л272, 1Л274	44	57

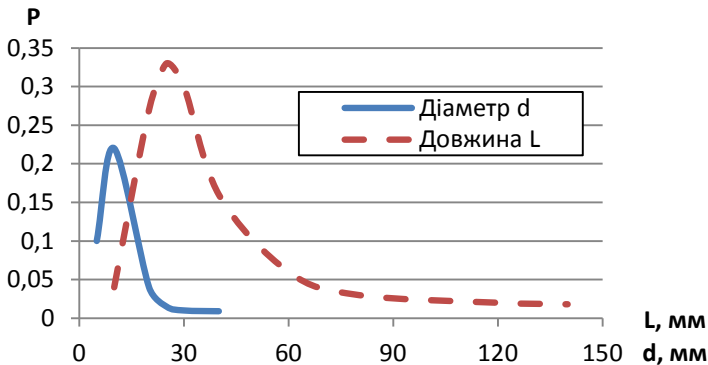


Рис. 1.4. Криві розподілу діаметрів  $d$  та довжин  $L$  кріпильних і допоміжних отворів корпусних деталей

Технологічна інтенсивність формоутворення визначається режимами різання, тому дослідження доцільно починати з аналізу встановлених режимів обробки. На рис. 1.5 показано криві розподілу подачі  $S_0$  свердел, а математичні оцінювання цього параметра для деяких досліджуваних АВС такі: модель 1Л186 б, в, г –  $\bar{S}_0 = 0,16$  мм/об.;

1Л296 б, в, г, д, е –  $\bar{S}_0 = 0,22$  мм/об.; модель 1Л272, 2Л274 –  $\bar{S}_0 = 0,12$  мм/об. За рекомендаціями НІТАвтопрому подачу при свердлінні отворів у чавунних деталях діаметром 8–20 мм потрібно обирати у межах 0,2–0,5 мм/об., тому встановлені у цих АВС величини подач занижені. Криві розподілу швидкості різання  $V$  наведені на рис. 1.6.

Математичні сподівання швидкості різання в АВС моделі 1Л296 б, в, г, д, е – 14,2 м/хв, моделі 1Л272 – 19,8 м/хв. На рис 1.7 зображені графіки залежності  $V = f(D)$  для різних АВС, які показують, що різальні можливості спіральних свердел використовуються неповністю. Це пов'язано з тим, що проектна продуктивність АВС часто не відповідає їх потенційним можливостям.

Криві розподілу технологічної інтенсивності формоутворення одиничними РІ досліджуваних АВС наведені на рис. 1.8. Мінімальне розсіювання технологічної інтенсивності формоутворення характерне для АВС моделей 1Л272, 1Л274, що створює передумови для мінімізації витрат інтенсивності формоутворення при проектуванні структури багатоінструментної обробки.

Аналіз інтенсивності багатоінструментної та багатопозиційної обробки, виконаний на основі фактичних значень такту і коефіцієнта використання АВС, отриманих у результаті експериментальних досліджень продуктивності та надійності діючих систем. Криві розподілу інтенсивності багатоінструментної та багатопозиційної обробки, що припадає на один РІ, наведені на рис. 1.9, 1.10.

Значення питомих показників інтенсивності формоутворення на всіх ієрархічних рівнях досліджуваних АВС наведено у табл. 1.5.

Отримані результати дозволяють оцінити технічну досконалість ТС, резерви та шляхи вдосконалення структурно-технологічних схем ТС для обробки аналогічних деталей як у процесі проектування, так і під час модернізації систем.

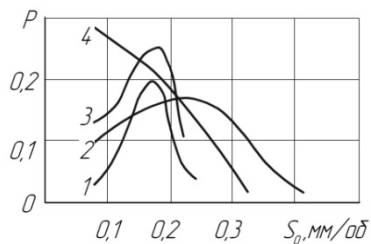


Рис. 1.5. Криві розподілу подачі різальних інструментів у АВС моделей:

- 1 – 1Л61–1Л63;
- 2 – 1Л186 б, в, г;
- 3 – 1Л296 б, в, г;
- 4 – 1Л272, 1Л274

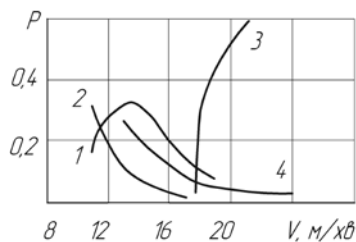


Рис. 1.6. Криві розподілу швидкості різання у АВС моделей:

- 1 – 1Л61–1Л63;
- 2 – 1Л296 б, в, г, д;
- 3 – 1Л186 б, в, г;
- 4 – 1Л272, 1Л274

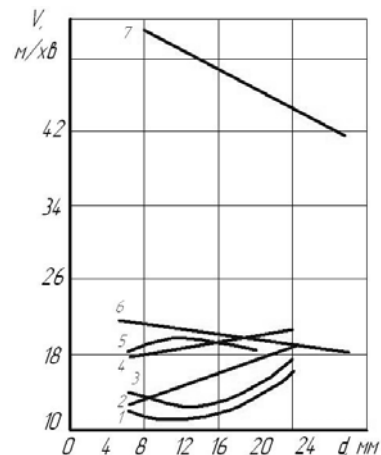


Рис. 1.7. Рівні швидкостей різання у АВС моделей:

- 1 – 1Л186 б, в, г; 2 – 1Л296 б, в, г, д;
- 3 – 1Л61–1Л63; 4 – за рекомендаціями НШТАвтопрому;
- 5 – 1Л470 д, є, і, к; 6 – 1Л272, 1Л274; 7 – 1Л491

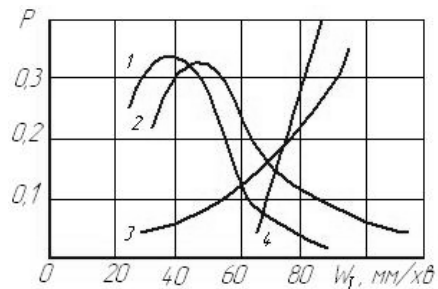


Рис. 1.8. Криві розподілу технологічної інтенсивності формоутворення одиничними інструментами у ABC моделей: 1 – 1Л61–1Л63; 2 – 1Л186 б, в, г; 3 – 1Л296 б, в, г, д; 4 – 1Л272, 1Л274

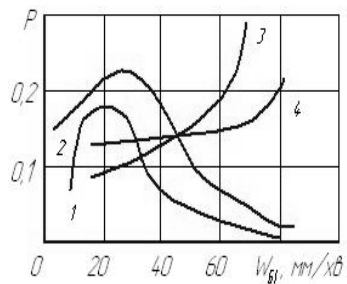


Рис. 1.9. Криві розподілу питомої інтенсивності багатоінструментної обробки на ABC моделей: 1 – 1Л61–1Л63; 2 – 1Л186 б, в, г; 3 – 1Л272, 1Л274; 4 – 1Л296 б, в, г, д

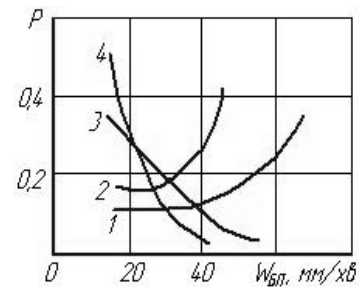


Рис. 1.10. Криві розподілу питомої інтенсивності багатопозиційної обробки на ABC моделей: 1 – 1Л186 б, в, г; 2 – 1Л272, 1Л274; 3 – 1Л296 б, в, г, д; 4 – 1Л61–1Л63



Таблиця 1.5

Питома інтенсивність формоутворення, що припадає на один інструмент,  
для ієрархічних рівнів структури АВС

Показник, мм/хв	1Л61– 1Л64	1Л186 б, в, г	1Л296 б, в, г, д	1Л272 1Л274	1Л470 д, є, і, к	1Л404 в	1Л458 в	1Л491 а
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Питома технологічна інтенсивність формоутворення, мм/хв	59,6	47,5	74	88,6	58,2	113,1	105,9	213,3
Питома інтенсивність багатоінструментної обробки, мм/хв	29,2	28,3	51,1	53,2	26,8	39,5	58,3	106,7
Питома інтенсивність багатопозиційної обробки, мм/хв	13,7	19,4	38,1	32,5	21,8	28,5	45,5	39,3
Питома інтенсивність формоутворення АВС, мм/хв	8,7	14,8	29,2	27,1	15,3	20,0	31,9	27,5
Коефіцієнт інтенсивності багатоінструментної обробки	0,49	0,59	0,69	0,61	0,46	0,35	0,55	0,51
Коефіцієнт інтенсивності багатопозиційної обробки	0,47	0,69	0,64	0,61	0,80	0,72	0,78	0,36

## **1.6. Підвищення продуктивності та інтенсивності формоутворення діючих технологічних систем**

Експериментальні дослідження діючих ТС, наприклад АВС, є обов'язковим етапом вирішення проблеми підвищення продуктивності у разі її невідповідності проектній величині або у зв'язку зі збільшенням річної виробничої програми понад проектне значення.

Кількісна оцінка фактичної надійності діючих ТС та їх підсистем на основі експериментальних даних, отриманих у ході виробничих натурних випробувань, дозволяє знаходити найбільш ефективні шляхи підвищення їх технічного рівня та економічності.

Об'єктивні кількісні дані про процеси функціонування ТС, отримані в результаті виробничих досліджень, дозволяють визначити дійсні значення надійності ТС та її елементів, скорегувати вихідні дані та методику прогнозування показників надійності, а також визначити резерви і шляхи підвищення надійності та продуктивності діючих ТМ.

Дослідження надійності та продуктивності діючих ТС – трудомісткий і дорогий процес, тому вибір об'єкта дослідження є відповідальним завданням. Для складних ТС, що мають значну кількість виробничих дільниць, за об'єкт дослідження доцільно обирати лімітуючу за продуктивністю частину системи, тобто ту дільницю ТС, де величина простоїв найбільша.

Спостереження за процесом функціонування ТС і вивчення організації її експлуатації повинно здійснюватися безперервно протягом усього календарного фонду часу роботи, тобто в одну, дві або три зміни залежно від режиму експлуатації, оскільки завантаження ТС упродовж доби звичайно змінюється від зміни до зміни, що впливає на рівень надійності. Велике значення має кваліфікація дослідника, від чого залежать точність та достовірність отриманої інформації. Проведення хронометражних спостережень і фіксація виробничої інформації можуть здійснюватися за допомогою спеціалізованих ЕОМ або комп'ютерних систем.

Ступінь достовірності отриманих дійсних показників надійності ТС визначається трьома основними факторами: типовістю обраного періоду дослідження та високою кваліфікацією дослідника; точністю та ретельністю проведення хронометражу; достатністю накопиченого обсягу інформації, що залежить від тривалості спостережень.

Запропонована нами комп'ютерна система аналізу виробничої інформації (КСАВІ) дозволяє здійснювати тривалий або постійний контроль процесу функціонування основного технологічного обладнання, комплектів (дільниць) такого обладнання і ТС з будь-якими системами керування; формувати баланс роботи і простоїв за будь-який календарний період часу; визначати фактичні показники надійності системи та її елементів; установлювати закони розподілу потоків відмов і відновлень та ін.

Структура КСАВІ показана на рис. 1.11. Матеріальною основою її є програмно-технологічний комплекс, що складається із комплексу технічних засобів і програмно-методичного комплексу. Виходячи із призначення та завдань, які вирішують КСАВІ, у її складі передбачені такі технічні засоби: збирання та введення інформації у систему – пристрій збирання даних (ПЗД), а також різні види периферійного обладнання ЕОМ, наприклад, дисплей; зберігання інформації у системі (зовнішній запам'ятовувальний пристрій ЕОМ); переробки інформації (програмне забезпечення і процесори ЕОМ); відображення та видачі інформації у зручній формі (дисплей, пристрій друку (ПД)). Програмно-методичний комплекс – це програмне забезпечення КСАВІ, база даних (БД) і документація з експлуатації КСАВІ.

Для забезпечення організаційно-технічного планування та оперативного виробничого керування дільницею (цехом) доцільно створювати КСАВІ на базі персонального комп'ютера, встановленого у приміщенні технічного персоналу, та ПЗД, що розміщується в шафі системи керування ТС, і з'єднаного з комп'ютером кабелем. Запропонована конструкція ПЗД сумісна

з будь-яким комп'ютером та будь-яким видом технологічного обладнання.

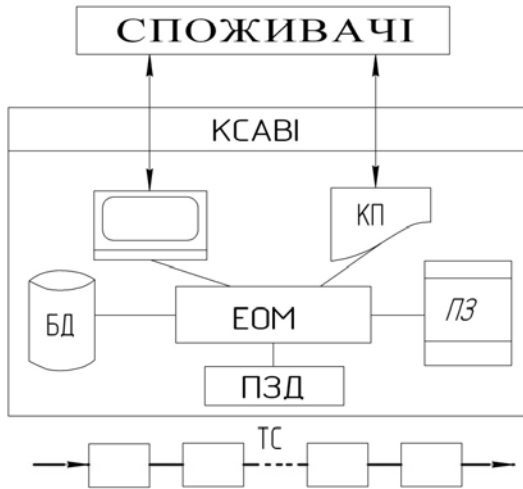


Рис. 1.11. Структура комп'ютерної системи аналізу виробничої інформації

КСАВІ може функціонувати у таких режимах:

- 1) введення вихідної інформації про ТС;
- 2) діагностика ТС;
- 3) видача оперативної виробничої інформації;
- 4) видача узагальнювальної виробничої інформації;
- 5) імовірнісний аналіз виробничої інформації.

Під час роботи КСАВІ в режимі діагностики на екрані комп'ютера, встановленого на виробничій дільниці, подана схема компонування ТС, на якій зазначені об'єкти, що контролюються системою. При виникненні відмови відповідний об'єкт виділяється на схемі, а на вільному полі наводиться перелік можливих причин відмови. Після відновлення працездатності ТС наладчик вводить кодовану інформацію про дійсну причину відмови.

У режимі видачі оперативної інформації користувач отримує фотографію робочого часу поточної зміни та кількісну інформацію про надійність і продуктивність системи за час робочої зміни, що збіг.

Кількісні показники надійності ТС розраховуються за формулами:

$$\eta_z = \sum_{i=1}^m T_{oi} / (\sum_{i=1}^m T_{oi} + \sum_{i=1}^m T_{ei});$$

$$\eta_{m.e} \equiv \sum_{i=1}^m T_{oi} / (\sum_{i=1}^m T_{oi} + \sum_{i=1}^m T_{ei} + T_{mo});$$

$$\eta_e = \sum_{i=1}^m T_{oi} / T_k;$$

$$\bar{T}_o = \sum_{i=1}^m T_{oi} / m;$$

$$\bar{T}_e = \sum_{i=1}^m T_{ei} / m;$$

$$\lambda = 1 / \sum_{i=1}^m T_{oi};$$

$$B = \sum_{i=1}^m T_{ei} / \sum_{i=1}^m T_{oi},$$

де  $T_{oi}$  – тривалість  $i$ -го напрацювання на відмову, хв;

$T_{ei}$  – тривалість відновлення після  $i$ -ї відмови, хв;

$T_k$  – календарний час роботи ТС, хв;

$T_o$  – середнє напрацювання на відмову, хв;

$\bar{T}_e$  – середній час відновлення, хв;

$B$  – питома тривалість відновлення;

$T_{mo}$  – час технічного обслуговування, хв;

$m$  – число відмови ТС за період дослідження процесу її функціонування, шт.

До узагальнювальної виробничої інформації належать статистичні оцінки показників надійності та продуктивності за певний календарний період часу протягом року. В результаті ймовірнісного аналізу визначаються довірчі границі кількісних

показників надійності та закони розподілу напрацювання на відмову і часу відновлення ТС та її елементів.

Довірчі границі показників надійності визначаються за такими залежностями:

$$\begin{aligned} \underline{T}_o &= T_o / (1 + Z_p \sqrt{m}); \\ \overline{T}_o &= T_o / (1 - Z_p / \sqrt{m}); \\ \underline{T}_e &= T_e / (1 + Z_p / \sqrt{m}); \\ \overline{T}_e &= T_e / (1 + Z_p / \sqrt{m}); \\ \underline{B} &= B / (1 + Z_p / \sqrt{m}); \\ \overline{B} &= B / (1 - Z_p / \sqrt{m}); \\ \underline{\eta}_{m.e} &= (1 - Z_p \cdot \sqrt{2/m}) / (1 + Z_p \cdot \sqrt{2/m} + B); \\ \overline{\eta}_{m.e} &= (1 + Z_p \cdot \sqrt{2/m}) / (1 + Z_p \cdot \sqrt{2/m}), \end{aligned}$$

де  $Z_p$  – коефіцієнт, що залежить від достовірності статистичних оцінок.

Під час дослідження ТС потоки відмов та відновлень розподіляються відповідно на залежні від обладнання та від РІ, оскільки природа виникнення таких відмов різна. Розподіл таких відмов обладнання підпорядковується експоненціальному закону, а за результатами експериментальних досліджень розподілу відмов РІ встановлено, що в більшості випадків найкраще співвідношення експериментальних даних спостерігається з теоретичним розподілом Вейбула-Гніденко.

Принципово можливі два шляхи підвищення продуктивності ТС: скорочення позациклових витрат часу і зменшення тривалості робочого циклу. В першому випадку можливе підвищення продуктивності на 8–10%. Більші можливості забезпечує другий шлях, пов'язаний з підвищенням інтенсивності формоутворення, однак він вимагає проведення досить трудомістких організаційно-технічних заходів щодо перебудови діючої ТС. Тому завдання підвищення продуктивності ТС вирішується в першу чергу шляхом

скорочення позациклових витрат часу. Проте виробничий досвід показує, що часто потрібне підвищення продуктивності важко отримати лише таким способом, але в тих випадках, коли задана продуктивність суттєво перевищує проектну, це практично неможливо.

Розглянемо методику збільшення продуктивності ТС шляхом підвищення інтенсивності формоутворення на прикладі АВС моделі 1Л61 для обробки блок-картера двигуна моделі СДМ-14, що має вісім робочих позицій, на яких здійснюється свердління та зенкерування кріпильних отворів.

Аналіз тривалості циклів багатоінструментних наладок цієї АВС показав (рис. 1.12), що серед наладок, розташованих на позиціях за ходом технологічного процесу ліворуч ( $\tau_{н.л}^{\phi}$ ) і праворуч ( $\tau_{н.пр}^{\phi}$ ), суттєво лімітуючих за часом немає.

Для скорочення тривалості циклу АВС потрібно зменшити тривалість циклів практично всіх наладок. Це можливо тільки за наявності резервів підвищення інтенсивності формоутворення багатоінструментними налагодженнями на базі установлених силових агрегатів. З цією метою визначаємо вихідні режими різання, що відповідають максимальній інтенсивності формоутворення, формуємо можливі варіанти багатоінструментної обробки, визначаємо для кожної з наладок найвигіднішу величину спільної хвилинної подачі та аналізуємо можливість конструктивної реалізації кожного із варіантів перебудови. Серед варіантів, що можливо реалізувати технічно, найвигідніший обираємо за максимальною інтенсивністю багатоінструментної обробки.

Визначаємо фактичні значення  $K_{БІ}^{\phi}$  коефіцієнтів для кожної із існуючих наладок, а також для оптимального варіанта, що забезпечує максимальну інтенсивність багатоінструментної обробки, значення  $K_{БІ}^o$ . Порівняння фактичних та оптимальних значень коефіцієнтів інтенсивності багатоінструментної обробки з наладок (рис. 1.13), а також зіставлення їх середніх значень

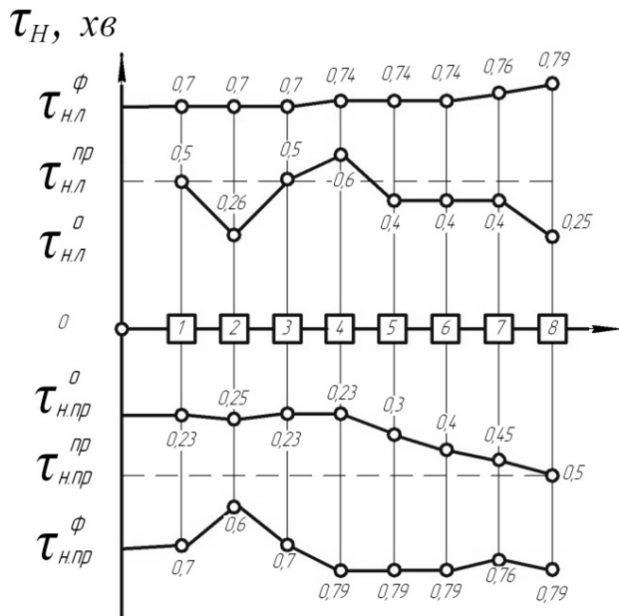


Рис. 1.12. Аналіз тривалості циклів багатоінструментних наладок АВС

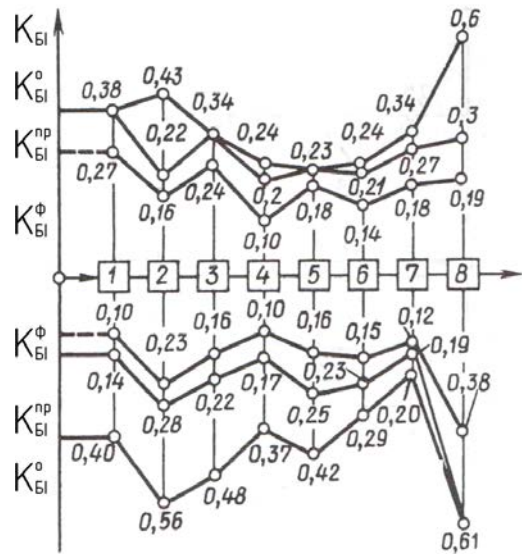


Рис. 1.13. Порівняльний аналіз коефіцієнтів багатоінструментної обробки для наладок АВС



( $\bar{K}_{BI}^{\phi} = 0,18$ ,  $\bar{K}_{BI}^o = 0,42$ ) підтверджують наявність резервів інтенсивності формоутворення АВС.

Відповідно до оптимальних значень інтенсивності формоутворення для багатоінструментних наладок розраховані також величини робочих циклів  $\tau_{н.л}^o$ ,  $\tau_{н.нр}^o$ . Для визначення остаточного проектного рішення почергово беремо за лімітуючу наладку:  $4Л(\tau_n^o = 0,6хв)$ ;  $1Л(\tau_n^o = 0,5хв)$ ;  $7П(\tau_n^o = 0,45хв)$ ;  $5Л(\tau_n^o = 0,4хв)$  та ін.

Для кожного варіанта зміни структури багатоінструментної обробки знаходимо величину зведених витрат, пов'язаних з перебудовою АВС. Установлено, що скорочення часу циклу наладок нижче 0,5 хв пов'язане з різким зростанням економічних витрат. Тому як лімітуюче беремо значення  $\tau_n^{np} = 0,5хв$ , що відповідає такту АВС  $\tau_{ABC}^n = 0,95хв$ .

Значення коефіцієнтів інтенсивності багатоінструментної обробки для наладок  $K_{BI}^{np}$  після перебудови системи наведено на рис. 1.13. При цьому середня величина  $\bar{K}_{BI}^{np} = 0,26$ . Продуктивність дослід-жуваної АВС за рахунок скорочення такту шляхом реалізації резервів підвищення інтенсивності формоутворення збільшується на 19,2%, що підтверджує доцільність використання методики підвищення продуктивності ТС на основі аналізу інтенсивності формоутворення на різних ієрархічних рівнях системи.

Інтенсивність формоутворення – це інтегральний системний критерій, що комплексно характеризує продуктивність, надійність та гнучкість ТС, а також у явному вигляді враховує інформацію про параметри обробки і структури системи.

Маючи загальний характер, критерій інтенсивності формоутворення є абсолютним, тобто забезпечує зіставність оцінок для різних видів ТС, відзначається наочністю та простотою у практичному використанні.

Ієрархічна структура критерію інтенсивності формоутворення, що відповідає структурі ТС, дозволяє використовувати його як критерій оптимальності на всіх або більшості етапів синтезу ТС, поступово розширюючи обсяг використаної інформації, забезпечуючи тим самим максимальну достовірність структурно-технологічних рішень.

Критерій інтенсивності формоутворення з успіхом застосовується для аналізу діючих ТС і процесів з метою зіставлення проектних показників, а також для визначення шляхів удосконалення та підвищення їх ефективності.

Запропонована методика виявлення резервів та способів підвищення продуктивності ТС на основі аналізу інтенсивності формоутворення дає можливість підвищити ефективність діючих систем шляхом спрямованого пошуку структурно-технологічних рішень відповідно до поставлених виробничих вимог.

Аналіз фактичних показників надійності та продуктивності діючих ТС підтверджує ефективність проведення виробничих досліджень для параметрів надійності систем, агрегатів, пристроїв, різальних інструментів та ін., які враховуються при розрахунках показників надійності ТС, а також для виявлення резервів підвищення продуктивності та формоутворення.

Запропонована комп'ютерна система аналізу виробничої інформації, здатна здійснювати збір та обробку інформації про процес функціонування ТС протягом тривалого періоду – важливий фактор підвищення ефективності технологічного обладнання та реалізації його виробничого потенціалу при забезпеченні мінімальної трудомісткості та собівартості дослідження діючих ТС.

## **2. Багатокритеріальна оптимізація технологічних систем**

### **2.1. Основні положення системного підходу до аналізу технологічних систем**

Складність проблем, що підлягають вирішенню на сучасному рівні розвитку суспільства, науки і техніки, обумовлює необхідність формувати певну сукупність технічних та організаційних засобів з урахуванням обслуговуючих їх людей, тобто створювати системи, які є предметом вивчення системотехніки – наукового напрямку, що досліджує загальносистемні властивості системотехнічних комплексів, процеси їх створення, вдосконалення та ліквідації з метою отримання максимального соціального ефекту. Основним методом системотехніки є системний підхід з його конкретними видами реалізації: системним аналізом, дослідженням операцій та кібернетикою.

У системотехніці фундаментальним є поняття системи. Але до сьогодні немає загальноприйнятого його визначення. Вважається, що об'єкт повинен володіти такими властивостями, щоб визнати його системою:

1) первинною є ознака цілісності, тобто він розглядається як одне ціле, що складається із взаємодіючих частин, часто різноякісних, але одночасно сумісних;

2) наявність суттєвих усталених зв'язків між елементами та (або) їх властивостями, що перевищують за силою зв'язки цих елементів з елементами, які не входять до цієї системи (під елементами системи розуміємо об'єкти, які не підлягають розчленуванню);

3) наявність певної організації, що проявляється у зниженні ентропії системи порівняно з ентропією системоутворювальних факторів, які визначають можливість створення системи;

4) суттєві інтегративні властивості, тобто такі якості, що властиві системі в цілому, але не належать жодному із її елементів окремо.

Таким чином, будь-який об'єкт, що володіє всіма цими властивостями, може називатися системою. Важливою якістю системи є здатність до управління, що характеризує можливість існування в ній актів рішення, тобто вибору із альтернативних варіантів дії. За цією ознакою системи поділяються на прості та складні. Під складною розуміють систему, здатну виробляти рішення, на відміну від простої, що не має такої властивості. В класі складних виділяють великі системи, у яких функціонує хоча б одна людина.

Система визначається також структурою і поведінкою. Під структурою звичайно розуміють інваріантну в часі фіксацію зв'язків між елементами системи, що задається за допомогою графа, а поведінка (функціонування) – це її дії в часі. Зміна структури системи в часі розглядається як її еволюція. Поведінка великих систем, спрямована на досягнення деякого найкращого стану, має назву мети системи.

Особливістю простих систем є повна детермінованість номенклатури та числа елементів і зв'язків усередині системи, а також основних зв'язків системи із зовнішнім середовищем. Складні системи – це сукупність великого числа об'єктів, об'єднаних виконанням комплексних завдань. Їх особливість – недетермінованість зв'язків як усередині системи, так і з зовнішнім середовищем.

Системи, характерними особливостями яких є: послідовне вертикальне розміщення підсистем, що становлять дану систему (вертикальна декомпозиція); пріоритет дій або право втручання підсистем верхнього рівня; залежність дій підсистем верхнього рівня від фактичного виконання нижчими рівнями своїх функцій належать до категорії багаторівневих ієрархічних систем. При ієрархічному описанні система задається сукупністю моделей, кожна з яких описує поведінку системи з точки зору різних рівнів абстрагування. Для кожного рівня існує низка перемінних, законів та принципів, за допомогою яких і описується поведінка системи. Щоб такий ієрархічний опис був ефективним, необхідна якомога більша незалежність моделей для різних рівнів систем.

Ієрархічна система – це принципово багатокритеріальна система, оскільки вона складається із окремих підсистем, які мають самостійні права оброблення інформації та прийняття рішень на основі своїх власних функціоналів. Децентралізація управління приводить до зменшення невизначеності, пов'язаної зі збиранням та переробленням інформації, але в той же час служать джерелом нової невизначеності, основна причина якої – суперечності між цілим та його частинами, що проявляються у незбіганні інтересів усієї системи та її окремих елементів. Тому необхідно вести мову про оптимальний ступінь централізації та децентралізації, про оптимальний розподіл функцій прийняття рішень між різними рівнями системи. До складних ієрархічних систем належать і технологічні системи.

Технологічна система (ТС) – це сукупність функціонально взаємозв'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців, призначених для виконання у регламентованих виробничих умовах заданих технологічних процесів або технологічних операцій відповідно до вимог нормативно-технічної документації.

Сучасні ТС механічної обробки характеризуються складною структурою, значною кількістю верстатів та виконуваних технологічних переходів. Головною особливістю їх є гнучкість, тобто здатність змінювати свою структуру та мету функціонування залежно від виробничих умов. Під час вивчення ТС необхідно враховувати тісний взаємозв'язок між великою кількістю факторів, що визначають її поведінку; невизначеність у поведінці ТС в цілому та її складових частин, які виникають унаслідок впливу випадкових факторів та участі в процесі функціонування системи людей; наявність керівних дій, завдяки яким реалізуються виробничі завдання. Сукупність зазначених властивостей свідчить про те, що ТС можуть бути віднесені до категорії великих технічних систем із багаторівневою ієрархічною структурою.

Однією із найважливіших особливостей структурної концепції системотехніки є комплексний аналіз великих технічних систем, у тому числі технологічних, у часі та

просторі. Для описання системи в часі введено поняття життєвого циклу, яке відображає період існування системи. Життєвий цикл умовно відраховується від початку робіт із розроблення технічного завдання і до повної деградації ТС, яка завершується її зняттям спочатку з виробництва, якщо воно серійне, а потім і з експлуатації (до фізичного знищення системи). Кожен із періодів життєвого циклу характеризується специфічним комплексом процесів, із яких складаються основні етапи життєвого циклу: проектування, виготовлення, впровадження, стабільна експлуатація, поступова деградація з подальшим зняттям з експлуатації.

Період проектування ТС містить такі етапи: технічне завдання, технічна пропозиція, ескізний, технічний та робочий проекти. Технічне завдання з урахуванням формалізованої системи критерії та обмежень можна розглядати як модель-аналог створюваної ТС.

На етапі розроблення технічної пропозиції на основі попереднього конструкторсько-технологічного напрацювання розроблюють оптимальний варіант технологічного компонування системи й уточнюють її технічні характеристики. Це найвідповідальніший етап, що характеризується використанням методів математичного моделювання та оптимізації структурно-компонувальних варіантів ТС. На подальших етапах проектування розробляється конструкторська документація.

Основними роботами у процесі виготовлення ТС є технологічна підготовка виробництва, виготовлення деталей, складання та випробування вузлів і верстатів, монтаж системи, налагодження та обкатування, контроль і приймання відділом технічного контролю виробника, приймально-здавальні випробування, демонтаж ТС та маркування її складових частин і деталей, остаточне фарбування і консервація складових частин системи, упакування та відвантаження її замовнику. Приймально-здавальні випробування системи у виробника, як правило, попередні. Монтаж, налагоджування та остаточні

приймально-здавальні випробування проводяться у замовника за додатковим погодженням між виробником і замовником.

Період упровадження ТС на підприємстві-замовнику складається із таких видів робіт: виготовлення фундаменту під обладнання та підведення комунікацій, транспортування складових частин і монтаж ТС, під'єднання комунікацій, пуск та налагодження системи, приймально-здавальні випробування, промислова експлуатація і поступовий вихід на проектну продуктивність.

У період стабільної експлуатації виконується періодичне відновлення функціональних характеристик ТС у процесі технічного обслуговування та регламентних ремонтів, а також збереження рівня ефективності ТС за допомогою капітальних ремонтів, шляхом заміни деяких підсистем (агрегатів, складальних одиниць, пристроїв тощо), модернізації та ін. На цьому етапі доцільно проводити натурні випробування, спрямовані на дослідження надійності та працездатності окремих елементів і ТС у цілому. Отримані результати дозволяють стабілізувати показники функціонування ТС, підтримуючи їх на проектному рівні. Дані про надійність уніфікованих агрегатів, пристроїв, різальних інструментів та ін. враховуються при уточненні математичних моделей, що використовувалися під час проектування ТС.

Потім, коли капітальні ремонти, модернізація та ін. уже не дають необхідного ефекту і спостерігається незворотне погіршення характеристик ТС, настає етап її деградації, який завершується зняттям з експлуатації (демонтажем).

Викладене дозволяє зробити висновок про те, що життєвий цикл ТС – це складна, впорядкована у часі сукупність взаємозв'язаних процесів. Отже, можна розглядати життєвий цикл як різновид складної організації ТС. Таким чином, життєвий цикл ТС характеризується трьома видами структур: внутрішньою, зовнішньою та ієрархічною. Внутрішня структура життєвого циклу впорядковує процеси в часі та їх взаємозв'язку. Зовнішня структура життєвого циклу системи впливає на взаємодію процесів існування ТС із процесами існування інших

систем і дозволяє визначити і проаналізувати найважливіші моменти в дослідженнях ТС. Наприклад, сумісний розгляд зовнішніх структур життєвого циклу системи та її підсистеми дозволяє зробити висновок про впорядкованість у часі та за ресурсами розвитку окремих підсистем і формування їх у ТС. Ієрархічна структура життєвого циклу системи характеризує підпорядкованість цілей, що досягаються в кожному із процесів, цілям процесів вищих рівнів. На кожному етапі життєвого циклу ТС маємо справу з одним і тим самим об'єктом – предметом виробництва (заготовкою). В межах внутрішньої структури вона розглядається як фізичний об'єкт, що підлягає обробці відповідно до фізичних законів; ієрархічна структура пов'язана з уявленням про заготовку як про керовану перемінну, а для зовнішньої структури – це вже товар, тобто економічна категорія.

Таким чином, аналізуючи ефективність ТС, необхідно виходити із комплексної оцінки, що визначається сукупним аналізом трьох розглянутих структур життєвого циклу (внутрішньої, зовнішньої та ієрархічної).

У структурі суспільного виробництва основними суб'єктами господарювання є підприємства, які належать до штучно створених людьми систем у процесі розвитку продуктивних сил та виробничих відносин. Тому такі системи є економічними, основною системною характеристикою яких є цілісність. При цьому кожний окремий елемент системи існує тільки у взаємозв'язку з іншими елементами. Властивості системи не можуть бути простою сумою властивостей її елементів. Ця системна властивість цілісної системи називається неадитивністю [4]. Підприємство як цілісна система функціонує у вигляді єдності різноманіття форм і аспектів господарської діяльності, що існують як складові цілого. Склад і структура системи визначають її організацію. Виділення в складі системи елементів як найменших неподільних частин на даному рівні системного аналізу дозволяє проводити комплексні дослідження властивостей та взаємозв'язків елементів, кожен із яких може розглядатися як самостійна цілісна система.



Підприємство функціонує в певних умовах зовнішнього середовища, будучи основною ланкою економічної системи держави як більш широкої системи. При цьому характер відносин цілісної системи – підприємства з іншими системами будується на відносній незалежності взаємодіючих систем. Відносна незалежність підприємства як самостійного суб'єкта господарювання полягає в тому, що при різноманітних змінах зовнішнього середовища воно, як економічна система, повинне зберігати здатність функціонувати для досягнення основної мети своєї діяльності.

В умовах розвитку ринкових відносин важливою характеристикою підприємства є його відкритість та зміна стану і параметрів функціонування протягом часу роботи, тобто динамічність. Такі зміни відбуваються внаслідок взаємодії із зовнішнім середовищем і необхідністю відповідних реакцій на дії зовнішніх факторів.

Такий підхід принципово відмінний від того, що існував у період централізовано-планової економіки, коли підприємство розглядалось як замкнена система, що знаходиться у стійкій рівновазі й зберігає свої показники тривалий час сталими, тобто зберігалися структура, характер функціонування, характеристики входів та виходів системи. Як відомо, рівноважні системи не здатні до розвитку і самоорганізації, адже якщо під впливом зовнішнього середовища або внутрішніх процесів відбуваються зміни параметрів системи, то вона повертається у попередній стан. Ця схема не відповідає характеру функціонування підприємств в умовах ринкової економіки, коли параметри зовнішнього середовища динамічні й існує велика кількість альтернативних варіантів господарських рішень. Ефективний розвиток можливий тільки на основі уявлень про підприємство як відкриту систему, в якій постійно відбуваються зміни параметрів, складу, характеру поведінки. Формою організації такої системи є рухомість, неусталеність, циклічність, що виникають під впливом зовнішнього середовища. Така система повинна постійно здійснювати певні дії, щоб зберегти своє існування і можливість підвищення

самоорганізованості та результативності. Це відповідає положенню про те, що загальною формою організації матерії є нерівноважність і циклічність. Такий підхід до управління підприємством забезпечується використанням наукових положень синергетики, що досліджує процеси самоорганізації та розвитку відкритих систем і є методологічною основою для управління підприємством.

## **2.2. Системні принципи структурно-параметричної оптимізації технологічних систем механообробки**

Особливістю сучасних ТС є комплексний характер механічної обробки, концентрація як однотипних, так і кінематично відмінних видів обробки на одному металорізальному верстаті. Сутність концентрації технологічних переходів полягає в тому, що обробка певної кількості поверхонь виконується на одній і тій самій технологічній операції, що дозволяє підвищити продуктивність і точність виготовлення деталі. Залежно від послідовності виконання технологічних переходів розрізняють послідовну, паралельну та паралельно-послідовну концентрацію обробки.

При послідовній концентрації технологічних переходів РІ, що входять до технологічного комплекту, необхідного для вирішення заданого технологічного завдання, і розміщені в інструментальних магазинах або револьверних головках, послідовно обробляють відповідні поверхні заготовки. Кінематичний зв'язок між РІ відсутній, але спостерігається структурний зв'язок, оскільки вони є структурними елементами технологічного комплекту.

Паралельна концентрація технологічних переходів реалізується найчастіше, коли між РІ, що входять до технологічного комплекту, або їх частинами існує кінематичний зв'язок (багаторізцеві наладки, шпindelні коробки і насадки та багатошпindelні головки).

Паралельно-послідовна концентрація технологічних переходів спостерігається, наприклад, під час обробки на БВ як

окремими РІ, так і багатопіндельними головками або на багатопозиційних ТС за допомогою шпіндельних коробок.

Концентрація обробки може здійснюватися також за допомогою комбінованого та фасонного РІ під час обробки кількох поверхонь або при послідовній обробці однієї і тієї самої поверхні.

Технологічні процеси, що реалізуються ТС, у загальному випадку поділяються на позиції, багатоінструментні наладки, технологічні переходи. Ієрархічна структура технологічного компонування ТС відповідно до цього складається з таких рівнів: одноінструментна обробка (ОІ), багатоінструментна обробка (БІ), багатопозиційна обробка (БП) (рис. 2.1).

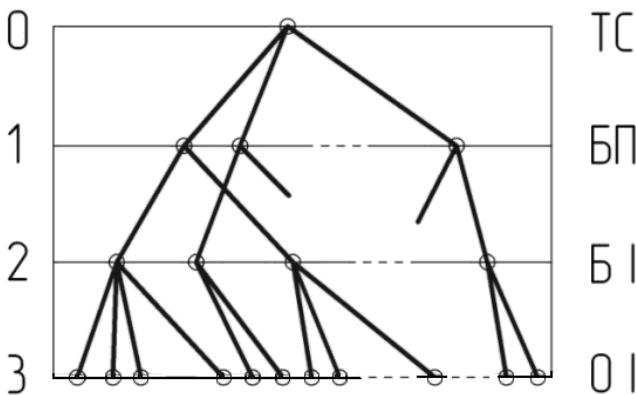


Рис. 2.1. Ієрархічна структура технологічної системи механічної обробки

Досягнення виробничої мети ТС – випуск продукції необхідної якості в установленій виробничою програмою кількості та в задані терміни забезпечується вирішенням сукупності конкретних задач окремими елементами системи або її підсистем. Елементами ТС є РІ, що складають технологічний формоутворювальний комплекс.

Під час дослідження системотехнічних властивостей ТС і принципів системного підходу до їх аналізу і проектування враховувалися результати робіт. Визначені такі основні принципи системного підходу до розроблення ТС.

1. Принцип цілеобумовленості, який передбачає, що система може бути створена, якщо їй задана мета. У процесі функціонування гнучких ТС ця мета змінюється. Відповідно повинна змінюватися її структура або (і) спосіб функціонування системи, оскільки мета обумовлює структуру та поведінку ТС. При зміні мети важливо знати, як і в який термін на неї реагує ТС, яка її інерційність або гнучкість. Повинен існувати також механізм, що дозволяє оцінювати ступінь досягнення заданої мети.

2. Принцип відносності: одна і та сама сукупність елементів може розглядатись, як самостійна ТС і як частина (підсистема) іншої, більшої ТС, до якої вона входить. Для даної ТС мету задає більша стосовно неї система. Найважливішим етапом після встановлення та впорядкування множини цілей системи є виявлення її ієрархічної структури.

3. Принцип керованості полягає в тому, що створювана ТС повинна бути керованою, тобто здатною переформувувати свою структуру, переходити у різні стани під впливом керівних дій. У ТС повинен бути механізм управління у вигляді керуючої і керованої частин, з'єднаних лініями прямого та зворотного зв'язку. Структура керованої ТС повинна описуватись у вигляді ієрархії керованих контурів. Функції управління у такій ТС розподілені між співвідлеглими рівнями. Для гнучких ТС керованість є однією із найважливіших властивостей. За своєю суттю поняття гнучкості та керованості досить близькі й, з практичної точки зору, можна вважати їх аналогічними, тобто гнучкість зводиться до здатності до управління (керованості). Керованість ТС забезпечується можливостями як керуючої частини системи, так і керованої (агрегати, пристрої, механізми тощо), тобто обладнання і пристрої повинні забезпечувати технічну можливість переформування структури і зміни процесу функціонування.

4. Принцип зв'язаності, який означає, що підсистема, виділена для самостійного аналізу, повинна бути керованою стосовно старшої і керуючою стосовно молодшої у ієрархії системи.

5. Принцип модельованості обумовлює необхідність створення моделі прогнозування у часі станів ТС для вибору найкращої поведінки, яка забезпечує досягнення заданої цілі при мінімальних витратах ресурсів. Об'єктом оптимізації ТС є структура і поведінка системи. Під час розроблення комплексу математичних моделей ТС необхідно враховувати, що на різних етапах життєвого циклу ТС можуть вирішуватися різні оптимізаційні завдання. Управління з прогнозуванням може здійснюватись з урахуванням нечіткості (розпливчастості) множин цілей та умов (обмежень) функціонування системи.

6. Принцип симбіозності: керовані ТС повинні будуватись із використанням таких концепцій, які дозволяють розглядати людину як ланку системи управління, тобто в керованій ТС повинен передбачатися механізм, який забезпечує корекцію керуючих дій з боку людини.

7. Принцип оперативності вимагає, щоб зміна руху (функціонування) керованої ТС під впливом різних дій відбувалася своєчасно, тобто в реальному масштабі часу.

Розглянуті принципи системного підходу є методологічною основою синтезу гнучких ТС. Ієрархічний багаторівневий характер структури об'єктів синтезу зумовлює, у свою чергу, ієрархічну структуру процесу оптимізації. Кожен рівень ієрархії ТС відображає деякий ступінь деталізації проектного рішення. Синтез оптимальної структурно-технологічної схеми ТС є складним багатоваріантним техніко-економічним завданням, вирішення якого найдоцільніше здійснювати з використанням методу декомпозиції, що передбачає розчленування (декомпозицію) задачі синтезу ТС на ряд підзадач. У загальному випадку розв'язання всіх підзадач впливає одне на одне, причому ці взаємозв'язки, як правило, досить складні та різнопланові, мають імовірнісний характер. Синтез ТС визначається прийнятою схемою декомпозиції; методами розв'язання підзадач; способом організації взаємозв'язку підзадач. Вибір схеми декомпозиції відповідно до принципів системного підходу здійснюється на основі дослідження ієрархії структури ТС із урахуванням причинно-

наслідкових та інформаційних зв'язків з метою виділення порівняно автономних підзадач:

1) формування технологічно мінімального комплексу РІ для обробки деталей заданої номенклатури;

2) вибір вихідних режимів різання технологічним комплектом РІ;

3) формування технічно можливих варіантів структури багатоінструментної обробки;

4) формування технічно можливих варіантів структури багатопозиційної обробки;

5) вибір найвигіднішого варіанта структури технологічного компонування ТС.

Залежно від інформаційних зв'язків між задачами декомпозиційні схеми поділяються на послідовні, паралельні та ітераційні. При послідовній декомпозиції інформація, отримана в результаті розв'язання однієї підзадачі, є вихідною при розв'язанні наступної, а при паралельній схемі взаємозв'язки між підзадачами вважають несуттєвими. Синтез ТС потрібно здійснювати з використанням системи декомпозиції, в якій обмін інформацією між підзадачами може здійснюватися в обох напрямках з метою послідовного уточнення рішення.

У декомпозиційних схемах можуть бути реалізовані два методи розв'язання підзадач: деталізації та узагальнення. В першому випадку рішення формується, починаючи з верхніх рівнів ієрархії, тобто спочатку приймається рішення стосовно більш загальних фрагментів об'єкта проектування, а потім виконується їх подальша деталізація та уточнення. У другому випадку в процесі вирішення підзадач проектне рішення формується, починаючи з нижніх рівнів його ієрархії, тобто рішення стосовно більш загальних фрагментів об'єкта проектування приймається, виходячи із рішень, прийнятих стосовно їх складових. Звичайно домінуючим є принцип деталізації, особливо у випадку конструкторських розробок, але синтез ТС доцільно здійснювати методом узагальнення шляхом поступового нарощування числа факторів, які враховуються. Задача синтезу ТС має розгалужений характер: кожне рішення

попереднього етапу породжує кілька рішень наступного етапу, тобто вибір найвигіднішого варіанта є багатоваріантною задачею. Найвигідніший структурно-технологічний варіант компонування ТС доцільно здійснювати методом комплексної, а не локальної оптимізації. Тобто на кожному етапі проектування не вибирається найвигідніший варіант, а всі варіанти враховуються при подальшому проектуванні. Остаточний вибір здійснюється на останньому етапі за прийнятим критерієм оптимальності.

Критерій оптимальності – це один із показників ТС, який найбільшою мірою характеризує її відповідність заданому цільовому призначенню.

Формують критерій так, щоб найкраща оцінка критерію відповідала його максимуму або мінімуму. Значущість критерію визначається ступенем впливу зміни його величини на загальну якість об'єкта. Помилки, допущені на етапі вибору критерію, неминуче призводять до створення неоптимальних, навіть збиткових ТС. Синтез складних ТС із використанням одного критерію найчастіше неможливий, адже може статися так, що дерево цілей ТС на нижньому рівні ієрархії містить не одну, а набір кількісно вимірюваних цілей, що не зводяться одна до одної, і тому описуються різними критеріями. Крім того, кожна ціль не обов'язково характеризується одним критерієм. Найчастіше існує множина критеріїв, кожен з яких характеризує той або інший аспект функціонування об'єкта. Проблему вирішення задач оптимізації з урахуванням множини показників якості називають багатокритеріальною оптимізацією. Очевидно, що цієї проблеми не існувало б, якби всі окремі критерії могли бути зведені до одного глобального критерію (узагальненої цільової функції) або якби локальні критерії були несуперечливі, тобто якби зміна параметрів елементів ТС забезпечувала одночасне покращання (або одночасне погіршення) усіх локальних критеріїв. Однак у задачах багатокритеріальної оптимізації завжди наявні суперечливі критерії, коли покращання одного з них пов'язане з погіршенням іншого і навпаки. Об'єктивно не існує розв'язання

багатокритеріальної задачі, яке переводить в екстремум усі локальні критерії, але існує область Парето (область компромісів) у просторі критеріїв і так звані Парето-оптимальні рішення.

Можна виділити такі чотири основні групи методів багатокритеріальної оптимізації [32]:

1) оптимізація послідовності скалярних (локальних) критеріїв при введенні пріоритетів та призначенні послідовних поступок;

2) оптимізація з метою виділення Парето-оптимальних рішень;

3) оптимізація на основі компромісних співвідношень, наприклад, шляхом використання вагових коефіцієнтів або порогової оптимізації;

4) оптимізація в сенсі близькості рішення до деякого ідеального значення (квазіоптимальні рішення).

До недоліків методів першої групи потрібно віднести необхідність обґрунтування ранжування системи критеріїв та поступок і значну трудомісткість. Побудова області Парето є трудомісткою задачею, яка вимагає організації спеціальних обчислювальних процедур. У третій групі методів знаходиться компромісне рішення шляхом визначення певних вагових співвідношень між локальними критеріями або призначення допустимих значень локальних критеріїв. Задача визначення вагових коефіцієнтів не менш складна, ніж призначення поступок, і розв'язується найчастіше шляхом експертних оцінок. Методи четвертої групи базуються на введенні ідеальної точки та знаходженні рішення найближчого в заданому сенсі до ідеальної точки.

При математичному моделюванні ТС як основи синтезу неможливо врахувати достатньо велику кількість факторів, оскільки це призвело б до надмірного ускладнення системи синтезу, тому в модель доведеться вводити тільки найсуттєвіші фактори. У зв'язку з цим відгук моделі на той чи інший вплив (вибір альтернативи) може бути відомим лише приблизно, нечітко, причому ступінь нечіткості тим менший, чим більше



число факторів явно бере участь у математичній моделі. Таким чином, складна система описується деякою нечіткою функцією мети, яка кожній альтернативі (впливі на систему) становить у відповідність деякий відгук системи на вибір цієї альтернативи.

Стан системи визначається як мінімальна кількість інформації, що необхідна для описання поведінки системи в будь-який заданий момент часу. Значна частина інформації має суттєво невизначений характер, що може враховуватися введенням у математичні моделі випадкових величин. При цьому повинно дотримуватися жорстке обмеження – необхідність знання законів розподілу випадкових величин, що найчастіше неможливо. У разі неповної інформації можна вводити допуски на значення параметрів у вигляді інтервалів числової осі, припускаючи, що можливі різні значення із відповідними ступенями допустимості. Неповністю визначені процеси можна моделювати, користуючись поняттям нечіткої множини, яке є спробою математичної формалізації нечіткої інформації з метою її використання для побудови математичних моделей складних систем. В основі цього поняття лежить уявлення про те, що складові даної множини елементів, які мають спільну властивість, можуть володіти цією властивістю різною мірою, а отже, належать цій множині з різним ступенем приналежності. Один із простих способів математичного описання нечіткої множини – характеристика ступеня приналежності елемента множини числом, наприклад із інтервалу  $[0, 1]$ .

Ступінь приналежності елемента  $X$  нечіткій множині  $C$  визначається функцією приналежності елемента  $X$  до нечіткої множини  $C$   $\mu_C(X)$ . Зважаючи на те, що нечітка множина описується своєю функцією приналежності, її можна використовувати як позначення нечіткої множини. Звичайні множини становлять підклас класу нечітких множин.

Розв'язання задачі досягнення нечіткої мети означає досягнути мету і задовольнити обмеження, причому в нечіткій постановці потрібно вести мову не просто про досягнення мети, а про її досягнення з тим чи іншим ступенем, у тому числі

необхідно враховувати і ступінь виконання обмежень. У підході Белмана-Заде обидва ці фактори враховуються таким чином. Нехай, наприклад, деяка альтернатива  $X$  забезпечує досягнення мети зі ступенем  $\mu_C(X)$  і задовольняє обмеженням зі ступенем  $\mu_G(X)$ . Тоді вважається, що ступінь приналежності цієї альтернативи розв'язанню задачі дорівнює мінімальному із цих чисел. Нечітким розв'язанням задачі досягнення нечіткої мети називається перетин нечітких множин мети і обмежень, тобто функція приналежності рішень  $\mu_D(X)$  має вигляд

$$\mu_D(X) = \min\{\mu_C(X), \mu_G(X)\}.$$

За наявності кількох цілей та обмежень нечітке розв'язання описується такою функцією приналежності:

$$\mu_D(X) = \min\{\mu_{C_1}(X), \dots, \mu_{C_n}(X), \mu_{G_1}(X), \dots, \mu_{G_m}(X)\}.$$

Якщо цілі та обмеження відрізняються за важливістю та задані відповідними коефіцієнтами відносної важливості цілей  $p_i$  і обмежень  $v_i$ , то функція приналежності розв'язань задачі визначається виразом:

$$\mu_D(X) = \min\{p_1 \cdot \mu_{C_1}(X), \dots, p_n \cdot \mu_{C_n}(X), v_1 \cdot \mu_{G_1}(X), \dots, v_m \cdot \mu_{G_m}(X)\}.$$

Нечітким розв'язанням задачі досягнення цілі  $C$  при обмеженнях  $G$  називається максимальна нечітка множина  $D$ , яка має такі властивості:

- 1)  $D \leq G$  (допустимість розв'язання);
- 2)  $\varphi(D) \leq C$  (досягнення нечіткої мети), де  $\varphi(D)$  – образ  $D$  при досягненні  $\varphi$ .

Розв'язання задачі оптимізації, в тому числі стосовно ТС, потрібно вибирати за максимальним ступенем приналежності нечіткому розв'язанню, тобто альтернативу, яка реалізує функцію

$$\max \mu_D(X) = \max \min\{\mu_C(X), \mu_G(X)\}.$$

Такі альтернативи називаються максимізуючими розв'язаннями.

Процес створення машини, в загальному випадку, передбачає виготовлення дослідного зразка, випробування якого дозволяє виявити й усунути дефекти, що не виявили під час розроблення проектної документації. Проте складні та дорогі ТС звичайно виготовляються в обмеженій кількості, а найчастіше в одному екземплярі. Тому немає можливості відпрацювання конструкції на натурних зразках. Для отримання достовірної оцінки показників ефективності ТС доцільно використовувати досвідно-теоретичний метод, який передбачає застосування різних способів отримання інформації про ТС (математичне моделювання, використання аналогів та імітаторів, натурних експериментів тощо); обґрунтування та вибір складу і структури необхідних математичних моделей; планування та організація натурних експериментів; обґрунтування обсягу та необхідної кількості експериментів.

Досвідно-теоретичний метод дозволяє оцінювати як окремі характеристики елементів, так і показники ефективності ТС у цілому. Одночасно вирішується задача про найбільш раціональне використання обмеженої кількості натурних експериментів, включаючи задачу погодження результатів експерименту з результатами моделювання. Особливістю натурних випробувань при створенні складних ТС є те, що експерименти виконуються на ТС-аналогах, які експлуатуються уже протягом деякого періоду і вийшли на проектну продуктивність або стабільний режим експлуатації. Можливість використання отриманих результатів для вирішення проектно-конструкторських і технологічних задач ґрунтується на спільності елементної бази ТС (типи металорізальних верстатів, силові агрегати, транспортно-накопичувальні системи, шпindelльні вузли та ін.). Порівнюючи результати експериментів та моделювання, виконують параметричне доопрацювання моделі, припускаючи, що вибрана структура задовільна. Якщо ж виявляються суттєві відмінності між вихідними показниками після параметричного доопрацювання за результатами порівняння даних моделювання і натурних випробувань, проводять структурну перебудову моделі ТС,

пов'язану з додатковим урахуванням окремих факторів, значущість яких підтвердилась або зводиться до зміни і доповнення у структурній схемі моделі окремих зв'язків. Такий підхід, що ґрунтується на раціональному поєднанні теоретичних досліджень і натурних випробувань, дозволяє створити працездатну математичну модель ТС і досягти необхідної достовірності результатів проектування. Проблема отримання, обробки та аналізу інформації про ефективність ТС і її елементів значно спрощується при використанні комп'ютерних систем керування.

Визначальною тенденцією сучасного машинобудівного виробництва є скорочення термінів випуску виробів за незмінною конструкторською документацією, тобто здійснюється перехід від масового та великосерійного виробництва до серійного випуску продукції. При цьому висуваються вимоги подальшого зниження трудомісткості технічної підготовки виробництва і скорочення строків переходу до випуску нових виробів за умови ефективного використання потенційних можливостей сучасного металообробного виробництва.

Головною умовою економічної ефективності автоматизованих ТС є випереджальне зростання продуктивності обробки порівняно зі збільшенням капітальних та поточних витрат, пов'язаних з автоматизацією. Найефективнішим шляхом вирішення цієї проблеми є концентрація технологічних переходів та багатопозиційна обробка. Найвищий рівень концентрації обробки забезпечують агрегатні верстати і системи, що проектуються на основі принципу агрегування.

Багатоінструментні та багатопозиційні ТС можна віднести до категорії великих технічних систем із багаторівневою ієрархічною структурою, причому гнучкі ТС мають перемінну структуру. Гнучкість (керованість) структури ТС визначається гнучкістю системи керування та керованого технічного устаткування (технологічного, транспортного, допоміжного та ін.).

Технологічною основою керування структурою гнучкої ТС є сукупність технологічного та допоміжного обладнання, технологічної оснастки та пристроїв, що мають гнучкість, а також системи автоматизованого синтезу структурно-технологічних рішень, спрямованих на реалізацію комплексу технологічних задач із виготовлення заданої у повному обсязі або частково номенклатури виробів.

Синтез структурно-технологічних схем ТС доцільно здійснювати з використанням ітераційної схеми декомпозиції, в якій обмін інформацією між підзадачами може виконуватися в обох напрямках з метою послідовного уточнення проектного рішення. Формувати структуру потрібно за методом узагальнення, починаючи з нижніх рівнів ієрархії ТС шляхом поступового нарощування числа факторів, що враховуються. Остаточний вибір виконується методом комплексної, а не локальної оптимізації, тобто із сукупності технічно перспективних варіантів на останньому етапі синтезу, який є багатокритеріальним завданням, оскільки існує деяка множина критеріїв, кожен із яких характеризує той чи інший аспект функціонування ТС, причому локальні критерії найчастіше не можна звести до єдиного глобального (узагальненої цільової функції).

Математичне моделювання ТС здійснюється за неповної інформації про фактори, що впливають на показники її функціонування, тому математична формалізація може виконуватися з використанням теорії нечітких множин. Найвигіднішу структурно-технологічну схему ТС потрібно вибирати за максимальним ступенем приналежності нечіткому рішенню.

Для підвищення достовірності оцінок критеріїв ефективності ТС доцільно застосовувати досвідно-теоретичний метод дослідження, який передбачає використання різних способів отримання інформації (математичне моделювання, вивчення аналогів, натурний експеримент та ін.); планування та організація натурних експериментів; обґрунтування обсягу випробувань та методик аналізу результатів досліджень.

### 2.3. Система критеріїв оптимальності

Для оцінки продуктивності обробки деталей на різних типах металорізальних верстатів доцільно використовувати нормативну інтенсивність формоутворення.

Цільова функція для визначення інтенсивності формоутворення має вигляд

$$W_H = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} W_{Tij} \frac{t_{Oij}}{T_{штij} + T_{пзj} / N_D + \tau_j} \right),$$

де  $W_{Tij}$  – технологічна інтенсивність формоутворення  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, мм/хв;

$T_{штij}$  – норма штучного часу обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;

$t_{Oij}$  – основний час обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;

$T_{пзj}$  – підготовчо-заклучний час, пов'язаний з обробкою партії деталей на  $j$ -му верстаті, хв;

$N_D$  – величина виробничої партії деталей, шт.;

$\tau_j$  – резерв часу, необхідний для відновлення працездатності  $j$ -го верстата у разі випадкової відмови верстата або ПІ, з метою підвищення ймовірності виконання виробничого завдання, хв.

В умовах централізованого управління економікою, характерного для соціалістичної системи господарювання, величина прибутку визначалася галузевими і державними органами управління. Зокрема прибуток підприємства розраховувався на підставі централізовано встановленої норми прибутку, а напрямки його використання та розподіл були регламентовані. Матеріальна зацікавленість підприємств реалізувалася лише у вигляді матеріального стимулювання трудових колективів у вигляді вдосконалення форм і систем заробітної плати та премій. У сучасних умовах, коли підприємства мають можливість самостійного формування та

розподілення фінансових ресурсів, матеріальна зацікавленість визначається у збільшенні прибутку.

Прибуток займає лідируюче положення в ієрархії цілей виробничої організації. Як економічна мета він характеризує фінансовий результат підприємницької діяльності підприємств. Прибуток є показником, що найбільш повно відображає ефективність виробництва, продуктивність праці, рівень собівартості, якість продукції та ін. [5]. Разом з тим прибуток впливає на зміцнення комерційної діяльності, інтенсифікацію виробництва та є джерелом забезпечення внутрішньогосподарських потреб підприємств. За рахунок прибутку здійснюється фінансування заходів науково-технічного і соціально-економічного розвитку. Так, наприклад, 89% американських компаній різних галузей економіки ставлять на перше місце серед цілей своєї діяльності саме отримання прибутку. Тому основною метою кожного підприємства є одержання якомога більшого прибутку.

Величина прибутку залежить від ринкової ціни продукції та її собівартості. В умовах ринкової економіки ціна продукції визначається під дією ринкових факторів, основними з яких є попит та пропозиція і не залежить від технологічних особливостей виготовлення деталей. Тому основним фактором, який залежить від ТП виготовлення деталі і впливає на величину прибутку підприємства, залишається собівартість.

На ціну, собівартість та прибуток підприємств впливають зміни в податковій, митній та іншій політиці держави. Таким чином, в умовах нестабільної економічної та соціально-політичної ситуації найбільш значущість фінансовою метою підприємства є одержання максимального прибутку в найкоротший термін. Цій меті повною мірою відповідає критерій «інтенсивність маржинального прибутку»  $I_{II}$ , грн/хв, який відображає величину одержуваного маржинального прибутку від реалізації продукції, що припадає на одиницю часу, витраченого на її виробництво.

Цільова функція для визначення інтенсивності маржинального прибутку має вигляд

$$I_{II} = \frac{C_D - C_3 - \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{BT} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right)}{\sum_{j=1}^m T_{ШТКj}},$$

де  $C_D$  – ринкова ціна деталі, грн;

$C_3$  – ринкова ціна заготовки, грн;

$C_{PIij}$  – ціна комплекту РІ для обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, грн;

$m$  – кількість металорізальних верстатів, що задіяні при обробці деталі, шт;

$p_j$  – кількість оброблюваних поверхонь деталі на  $j$ -му верстаті, шт;

$K_{BT}$  – коефіцієнт випадкової втрати РІ;

$T_{ij}$  – стійкість комплекту РІ для обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;

$t_{Oij}$  – основний час обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;

$z_{ij}$  – кількість граней багатогранної непереточуваної пластини РІ, шт.;

$C_{Cij}$  – відповідно витрати на переточування або зміну багатогранної пластини РІ, грн;

$3p_j$  – заробітна плата основних і допоміжних робітників з нарахуваннями на  $j$ -му верстаті, грн;

$C_{Ej}$  – вартість електроенергії, що витрачена на обробку деталі на  $j$ -му верстаті, грн;

$T_{ШТКj}$  – норма штучно-калькуляційного часу обробки деталі на  $j$ -му верстаті, хв.

Ринкова ціна заготовки залежить від виду та способу її отримання, а також від ринкової вартості матеріалу, з якого вона виготовлена.



Заробітна плата основних і допоміжних робітників визначається за такою залежністю:

$$З_{Pj} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{C_{Pj}}{60} + \frac{C_{Hj}}{60 \cdot K_{OB}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{K_{ЗП}}{100} \right) \cdot T_{ШТКj},$$

де  $C_{Pj}$  – годинна тарифна ставка робітника на  $j$ -му верстаті, грн/год;

$C_{Hj}$  – годинна тарифна ставка наладчика  $j$ -го верстата, грн/год;

$K_{OB}$  – кількість верстатів, що обслуговує наладчик, шт.;

$K_{ЗП}$  – відсоток відрахувань по заробітній платі до Пенсійного фонду, Фонду соціального страхування та Фонду страхування від нещасних випадків.

Виділення суми постійних витрат у системі «директ-костинг» дозволяє виявити їх вплив на фактичний прибуток підприємства, тому критерій «постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей» у поєднанні з інтенсивністю маржинального прибутку дозволяє об'єктивно оцінити економічну діяльність підприємства упродовж планового проміжку часу, визначеного строком виконання виробничого завдання.

Цільова функція для розрахунку постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей, має вигляд

$$S_{\Pi} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{(S_{Oj} + S_{Bj}) \cdot \gamma_j \cdot 12 \cdot C_P + C_{OБj} \cdot H_A}{\Phi_D} + З_{EOj} \right) \cdot \frac{T_{ШТКj} \cdot N_D}{60},$$

де  $S_{Oj}$  – виробнича площа, яку займає  $j$ -й верстат, м<sup>2</sup>;

$S_{Bj}$  – виробнича площа, яку займають виносні пристрої  $j$ -го верстата, м<sup>2</sup>;

$\gamma_j$  – коефіцієнт, що враховує додаткову площу  $j$ -го верстата;

$C_P$  – вартість місячної оренди 1 м<sup>2</sup> виробничої площі, грн/м<sup>2</sup>;

$C_{OБj}$  – балансова вартість  $j$ -го верстата, грн;

$H_A$  – норма амортизаційних відрахувань щодо обладнання;

$Z_{EOj}$  – витрати на експлуатацію та обслуговування обладнання, технологічної оснастки та виробничих площ  $j$ -го верстата, грн;  
 $\Phi_D$  – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.

Вартість різних типів металорізальних верстатів залежить від країни та підприємства виробника і ціни на однакові типи верстатів можуть істотно відрізнятись. Для об'єктивності розрахунків необхідно користуватися даними однієї нормативної бази, наприклад, цінами на обладнання українських та російських машинобудівних підприємств або окремих представництв іноземних фірм.

Витрати на експлуатацію та обслуговування обладнання, технологічного оснащення та виробничих площ визначаються за такою залежністю:

$$Z_{EOj} = (P_M \cdot R_{Mj} + P_E \cdot R_{Ej} + P_{CKj}) + \frac{C_{ВП} \cdot S_{Oj} + C_{OCj} \cdot (K_O + K_P)}{\Phi_D},$$

де  $P_M$  – витрати на ремонт та обслуговування механічних частин верстатів у розрахунку на 1 годину роботи, грн;

$R_{Mj}$  – категорія ремонтної складності механічної частини  $j$ -го верстата;

$P_{Ej}$  – витрати на ремонт та обслуговування електричних частин верстатів у розрахунку на 1 годину, грн;

$R_{Ej}$  – категорія ремонтної складності електричної частини  $j$ -го верстата;

$P_{CKj}$  – витрати на ремонт та обслуговування системи керування  $j$ -го верстата в розрахунку на 1 годину, грн;

$C_{ВП}$  – витрати на опалення, вентиляцію, ремонт та прибирання 1 м<sup>2</sup> виробничих площ, грн/рік;

$S_{Oj}$  – виробнича площа, яку займає  $j$ -й металорізальний верстат, м<sup>2</sup>;

$C_{OCj}$  – вартість технологічної оснастки, грн;

$K_O$  – коефіцієнт, що враховує погашення витрат на

технологічну оснастку за рік (беруть у розмірі 0,5);

$K_p$  – коефіцієнт, що враховує витрати на ремонт технологічної оснастки (беруть 0,1).

На сьогодні важливим напрямком діяльності світових промислових підприємств є економія енергоресурсів. Рациональне використання енергетичних ресурсів – це важливе завдання під час здійснення виробничої діяльності. Основу енергетичних ресурсів, які споживають машинобудівні підприємства на технологічні цілі, пов'язані з механічною обробкою деталей, становить електроенергія. Основними показниками використання електроенергії є: електромісткість продукції, електромісткість основних фондів та виробництва, електрооснащеність праці, витрати електроенергії на одного працівника та ін. [6].

Раніше в машинобудуванні нормативи витрат енергоресурсів застосовувалися досить рідко і носили рекомендаційний характер й у виробничій діяльності підприємств практично не знаходили застосування. На сьогоднішній день планування діяльності підприємства неможливе без урахування ефективності використання енергетичних ресурсів.

Одним із основних недоліків існуючих показників витрат електроенергії є відсутність взаємозв'язку між витратами електроенергії і техніко-економічними показниками, що характеризують інші результати діяльності підприємств, наприклад, продуктивність праці та собівартість продукції. Ці показники розраховуються на одиницю натурального випуску продукції, що ускладнює їх застосування в нестабільних економічних умовах при нестабільному завантаженні обладнання та при частій зміні цін на енергоносії.

Показники витрат електроенергії повинні враховувати витрати електроенергії в розрахунку на одиницю інших виробничих ресурсів. Їх застосування сприятиме забезпеченню ефективності використання енергетичних ресурсів у взаємозв'язку з виробничим потенціалом підприємства. Тому

оцінювати витрати електроенергії потрібно за показниками кінцевого випуску продукції.

Величину спожитої електроенергії визначають обсяги виробництва продукції, зміна яких зазвичай виражається у фінансових показниках. Таким чином, існує безпосередній зв'язок між зміною обсягів виробництва, які представлені в грошовому вигляді, та зміною витрат електроенергії. Енергетичні та грошові оцінки результатів виробництва є важливими і нетотожними характеристиками. У виробничих умовах доцільно зіставляти енергетичні та грошові оцінки результатів виготовлення продукції.

Для оцінки ефективності виробництва з урахуванням витрат електричної енергії доцільно використовувати критерій «електромісткість прибутку» [6], що визначає співвідношення витрат електроенергії, спожитої в процесі виготовлення продукції, та прибутку, отриманого в результаті її використання.

Цільова функція для визначення електромісткості прибутку має вигляд

$$E_{\Pi} = \frac{\sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} (P_{Pij} \cdot t_{Oij}) / \eta_{Pj} + (\sum P_{Bj} \cdot k_{Pj} / \eta_{Bj} + P_{EЛj}) \cdot T_{штj} \right)}{\Pi_{Д}},$$

де  $P_{Pij}$  – споживання електроенергії двигунами головного руху при обробці  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, кВт;

$\sum P_{Bj}$  – сумарна потужність допоміжних двигунів  $j$ -го верстата, кВт;

$k_{Pj}$  – коефіцієнт завантаження допоміжних двигунів за потужністю на  $j$ -му верстаті, хв;

$P_{EЛj}$  – споживання електроенергії системами керування обладнанням верстата, кВт;

$\eta_{Pj}$ ,  $\eta_{Bj}$  – коефіцієнти корисної дії основних та допоміжних електродвигунів  $j$ -го верстата відповідно;

$\Pi_{Д}$  – маржинальний прибуток від реалізації деталі, грн.

Процес виконання виробничого завдання є стохастичним, тому що на нього впливають випадкові фактори, викликані відмовами верстатів та РІ. При цьому продуктивність обробки має деяке розсіювання та існує ймовірність того, що реально досягнута продуктивність виявиться менше запланованої, яка необхідна для виконання виробничого завдання у встановлений термін.

Визначити та оцінити стохастичний зв'язок між необхідною та досягнутою продуктивністю дозволяє критерій «імовірність виконання завдання».

Він є узагальненим імовірнісним показником, що характеризує надійність процесу функціонування обладнання ТП протягом планового проміжку часу, визначеного строком виконання завдання. Імовірність виконання завдання залежить від показників, що характеризують надійність обладнання (імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення, коефіцієнт готовності). Значення параметрів інтенсивності відмов  $\lambda$  та інтенсивності відновлення  $\mu$  визначаються на підставі статистичних даних середнього часу напрацювання на відмову та середнього часу відновлення елемента, що відмовив в умовах діючого виробництва. Параметри  $\lambda$  і  $\mu$  залежать від конструктивно-технологічних характеристик обладнання та умов його експлуатації. Значення показника ймовірності виконання завдання дозволяє встановити, з якою ймовірністю можливе виготовлення партії придатних деталей (що відповідають робочому кресленню і технічним вимогам) протягом заданого проміжку часу.

При визначенні показника ймовірність виконання завдання доцільно окремо аналізувати вплив інтенсивності відмов й інтенсивності відновлень обладнання та РІ. Це викликано тим, що причини виникнення цих відмов і час їх відновлення різні й здебільшого вони виконуються різними категоріями обслуговуючого персоналу. Функції розподілу ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відновлення обладнання прийнято вважати експонентними. Ймовірнісні оцінки процесу функціонування РІ рекомендується здійснювати

на підставі закону розподілу Вейбула. Це підтверджується статистичними даними дослідження процесу експлуатації РІ.

Цільова функція для визначення ймовірності виконання завдання має вигляд

$$P = 1 - e^{-\lambda_j \cdot t_s - \mu_j \cdot \tau} \sum_{v=1}^n \frac{(\lambda_j \cdot t_s)^v}{v!} \left( \sum_{w=0}^{n-1} \frac{(\mu_j \cdot \tau)^w}{w!} \right) \cdot \prod_{i=1}^{N_{Kj}} \left( 1 - e^{-(\lambda_{q,j} \cdot t_r)^b - \mu_{q,j} \cdot \tau} \cdot a_{w,v} \sum_{v=1}^m \frac{((\lambda_{q,j} \cdot t_r)^b)^v}{v!} \left( \sum_{w=0}^{m-1} \frac{(\mu_{q,j} \cdot \tau)^w}{w!} \right) \right),$$

де  $\lambda_j$ ,  $\mu_j$  – відповідно інтенсивність відмов та відновлень  $j$ -го верстата, 1/хв;

$\lambda_{q,j}$ ,  $\mu_{q,j}$  – відповідно інтенсивність відмов та відновлень  $q$ -го інструмента на  $j$ -му верстаті, 1/хв;

$n$ ,  $m$  – кількість перших членів ряду, доданого методом послідовних наближень;

$v$ ,  $w$  – відповідні номери членів ряду;

$t_s$  – час роботи верстата при виконанні виробничого завдання, хв;

$t_r$  – час роботи РІ при виконанні виробничого завдання, хв;

$\tau$  – резерв часу, хв;

$b$  – показник степеня розподілу Вейбула;

$a_{w,v}$  – коефіцієнти для визначення згорток, що відповідають членам ряду;

$N_{Kj}$  – кількість інструментів, що використовуються при виготовленні деталі на  $j$ -му верстаті, шт.

Технічними обмеженнями для вибраної системи критеріїв оптимальності є обмеження щодо ринкової ціни заготовки (Цз) та деталі (Цд), балансової вартості верстата кожного типу (С<sub>Обј</sub>), споживання електроенергії (Р<sub>р</sub>), виробничої площі, яку займають верстати (S<sub>о</sub>) і виносні пристрої верстатів (S<sub>в</sub>), вартості орендної плати за використання виробничих площ (С<sub>р</sub>) та ймовірності виконання завдання (Р).

## **2.4. Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів**

Прийняття технологічних рішень при оптимізації ТП пов'язане зі значними труднощами, основним із яких є необхідність врахування багатьох умов технологічного, організаційного, економічного та виробничого характеру, а також визначення ефективного методу оптимізації для розв'язання поставлених задач.

Найбільш об'єктивно обрати найвигідніший варіант ТП із числа конкуруючих дозволяють методи багатокритеріальної оптимізації. Багатокритеріальна оптимізація дозволяє повною мірою оцінити потенційні можливості металорізального обладнання та технологічної оснастки.

Необхідність багатокритеріальної оптимізації ТП пов'язана з тим, що окремі показники ТП (локальні критерії) не можна звести один до одного або до єдиного глобального критерію. А також тому, що критерії оптимальності перебувають між собою у складному взаємозв'язку, що характеризується суперечливістю окремих локальних критеріїв, тобто вдосконалення одного критерію призводить до погіршення характеристик іншого та навпаки.

Існує велика кількість методів багатокритеріальної оптимізації, що істотно відрізняють за складністю та трудомісткістю розрахунків.

Для випадків, коли вихідні дані параметрів математичних моделей мають умовно детермінований характер, проведення багатокритеріальної оптимізації технологічних рішень здійснюється такими методами: вагових коефіцієнтів; виділення Парето-оптимальних рішень; послідовних поступок; близькості до ідеальної точки [7–9].

Багатокритеріальна оптимізація методом вагових коефіцієнтів критеріїв ґрунтується на знаходженні компромісного рішення шляхом встановлення вагових співвідношень між локальними критеріями, що дозволяє шляхом лінійного згортання сформувати єдиний узагальнений критерій:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^q \gamma_i \cdot F_{ij}(x),$$

де  $F_{ij}(x)$  – значення  $i$ -го критерію оптимальності  $j$ -го варіанта, зведені до єдиного знаменника;

$\gamma_i$  – коефіцієнт важливості  $i$ -го критерію оптимальності;

$q$  – кількість критеріїв оптимальності.

При цьому оптимальним є варіант із максимальним значенням узагальненого критерію.

Визначення коефіцієнтів важливості критеріїв оптимальності – складне завдання, що потребує суб'єктивної оцінки осіб, які приймають рішення.

Багатокритеріальна оптимізація методом послідовних поступок передбачає поетапне розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. Кожний етап характеризується досягненням оптимального рішення на підставі одного окремого критерію. При цьому всі критерії упорядковуються за пріоритетом відповідно до своєї значущості:

$$F_1(x) > F_2(x) > \dots > F_q(x).$$

Після упорядкування критеріїв за пріоритетом знаходиться оптимальне значення першого критерію  $F_1^0$  та призначається поступка  $\Delta F_1$ , тобто величина, на яку допускається погіршення критерію з метою оптимізації інших критеріїв. Потім знаходиться оптимальне значення другого критерію з урахуванням призначеної поступки для першого і призначається поступка  $\Delta F_2$  і т.д.

$$F_1(x) \geq F_1^0 - \Delta F_1.$$

Оптимізація щодо кожного наступного критерію відбувається з урахуванням призначених поступок для попередніх критеріїв. Недоліком цього методу є необхідність визначення значущості критеріїв і значень поступок.



У випадках, коли неможливо призначити переваги за окремими локальними критеріями і впорядкувати їх за важливістю, обмежуються визначенням множини Парето-оптимальних рішень. Однак метод виділення Парето-оптимальних рішень є трудомістким завданням, що вимагає організації спеціальних обчислювальних процедур і у зв'язку з цим він не отримав великого поширення.

Багатокритеріальна оптимізація методом близькості рішення до ідеальної точки базується на принципі гарантованого результату, що передбачає вибір такого набору параметрів, при якому реалізується максимальне наближення до глобального оптимуму. При цьому для кожного критерію щодо кожного порівнюваного варіанта визначаються нормовані різниці  $\Delta_{ij}$ , які показують величини їх відмінності від оптимальних значень критеріїв.

На підставі нормованих різниць формується узагальнений критерій, що визначає максимальні відхилення від глобального оптимуму щодо кожного варіанта:

$$F_{\Sigma} = \max(\Delta_{ij} \cdot \gamma_i).$$

Найвигіднішим вважається варіант із мінімальними відхиленнями від локального оптимуму.

У разі використання в процесі прийняття рішень суб'єктивної інформації, а також коли вихідні дані параметрів математичних моделей носять стохастичний характер, виникають умови невизначеності. Умови невизначеності сприяють отриманню нечітких значень цільових функцій і результатів дослідження. Причинами виникнення невизначеності є: неповнота знань про властивості об'єкта; недостатній ступінь упевненості в правильності значень; суперечливість знань; нечіткість подання інформації.

При розв'язанні оптимізаційних задач в умовах невизначеності застосовуються методи багатокритеріальної оптимізації, які базуються на теорії нечітких множин і на підставі експертних оцінок.

Метод багатокритеріальної оптимізації, що базується на використанні теорії нечітких множин, є спробою математичної формалізації нечіткої інформації з метою її використання при побудові математичних моделей складних систем. Уперше він був запропонований Л. Заде.

Поняття нечіткої множини полягає у тому, що елементи які складають дану множину і мають загальну властивість, можуть мати цю властивість у різному ступені, і відповідно, належати даній множині з різним ступенем. Ступінь приналежності елемента  $j$  нечіткій множині визначається функцією приналежності  $\mu_j$ , яка набуває значення в інтервалі  $[0, 1]$ .

Функція приналежності визначається за формулами:

– для критерію, що максимізується:

$$\mu_{ij} = \left( 1 - \frac{\max F_{ij} - F_{ij}(x)}{\max F_{ij} - \min F_{ij}} \right);$$

– для критерію, що мінімізується:

$$\mu_{ij} = \left( 1 - \frac{F_{ij}(x) - \min f_{ij}}{\max F_{ij} - \min F_{ij}} \right).$$

При розв'язанні задачі досягнення нечіткої оптимальної мети не визначається оптимальний варіант, а визначається лише ступінь його приналежності нечіткій оптимальній меті. Розв'язанням задачі досягнення глобальної нечіткої мети є перетин нечітких множин кожної окремої мети. Функція приналежності нечіткої глобальної мети розраховується з урахуванням коефіцієнта вагомості  $\gamma_i$  кожної окремої мети:

$$\mu_A = \min(\mu_{ij} \cdot \gamma_i).$$

Оптимальним варіантом розв'язання задачі є той, який має максимальний ступінь приналежності нечіткій глобальній меті.

Одним із методів багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності, що ґрунтується на підставі експертних оцінок, є метод аналізу ієрархій, детально розглянутий Т. Л. Сааті.

В. І. Дубровін розглянув проведення багатокритеріальної оптимізації ТП з використанням методу аналізу ієрархій. Він дозволяє групі експертів (технологів, економістів, керівників підрозділів та ін.) взаємодіяти разом з проблемою, що їх цікавить, модифікувати та об'єднувати свої міркування відповідно до основної мети. Об'єднання роздумів відбувається при проведенні попарних порівнянь об'єктів. Прийняття рішень у процесі дослідження складних систем зводиться до послідовності попарних порівнянь їх окремих складових. Метод аналізу ієрархій складається з таких етапів: побудова ієрархії, формування матриці попарних порівнянь, отримання вектора пріоритетів та оцінка ступеня відповідності матриці попарних порівнянь.

Необхідно відзначити, що існуючі методи багатокритеріальної оптимізації істотно відрізняються за складністю та трудомісткістю розрахунків, а разом з тим відсутні достатньо науково обґрунтовані положення стосовно вибору ефективного методу багатокритеріальної оптимізації ТП з урахуванням виробничих умов.

## **2.5. Дослідження впливу характеру виробничого процесу на результати оптимізації**

Існуючі методи багатокритеріальної оптимізації (див. п. 2.4) відрізняються трудомісткістю та складністю оптимізаційних розрахунків, а також кількістю суб'єктивної інформації, що необхідно отримати від особи або групи осіб, які приймають рішення. Суб'єктивною інформацією осіб, які приймають рішення, є визначення вагомості окремих критеріїв (методи вагових коефіцієнтів, близькості до ідеальної точки та нечітких множин) або ступеня значущості (метод аналізу ієрархій), ранжування критеріїв за значущістю і призначення

величин поступок (метод послідовних поступок) та ін. Неоднорідність і неоднакова кількість вихідної інформації, а також різний ступінь складності розрахунків можуть призвести до суперечливості результатів, отриманих різними методами. Тому при виборі методу оптимізації ТП обробки деталей потрібно враховувати його принципові особливості з точки зору кількості критеріїв оптимальності та виробничих умов.

З метою вибору раціонального методу оптимізації був проведений порівняльний аналіз результатів визначення оптимального типу токарного верстата для обробки партії деталей типу фланця, отриманих різними методами оптимізації. Дослідження проводилися з урахування різної кількості типів верстатів, на яких можливе проведення обробки.

У табл. 2.1 наведені значення критеріїв оптимізації для різних типів токарних верстатів, а у табл. 2.2 – результати оптимізації, отримані різними методами з урахуванням різної кількості критеріїв. У табл. 2.1 подані позначення верстатів: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпindelний із ЧПК; 5 – токарний багатошпindelний напівавтомат. У табл. 2.2 – позначення методів оптимізації: 1 – вагових коефіцієнтів; 2 – аналізу ієрархій; 3 – близькості до ідеальної точки; 4 – послідовних поступок; 5 – нечітких множин.

Як бачимо, за результатами розрахунків методи оптимізації розподілилися на дві групи, в межах яких усі методи забезпечують однакові результати. До першої групи входять метод вагових коефіцієнтів та аналізу ієрархій, а до другої – метод близькості до ідеальної точки, послідовних поступок та нечітких множин. Необхідно зазначити, що при величині партії деталей  $N_d \leq 5$  шт. та  $N_d \geq 200$  шт. усі методи оптимізації забезпечують однакові результати. Це викликано тим, що токарно-гвинторізний верстат при  $N_d \leq 5$  шт., а токарний багатошпindelний напівавтомат при  $N_d \geq 200$  шт. за всіма критеріями оптимальності переважають інші верстати і їх вибір як оптимальних є однозначним.

Таблиця 2.1

Значення критеріїв оптимізації для різних типів токарних верстатів  
та величини виробничої партії деталей

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт.								
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>W<sub>н</sub>, мм/хв</b>									
1	35,9	63,2	69,8	73,7	76,2	77,1	77,5	77,9	78,0
2	20,7	74,8	96,6	112,9	125,7	130,6	133,2	134,9	135,4
3	15,1	55,5	83,1	110,8	138,4	150,9	158,1	162,8	164,3
4	22,6	81,9	121,9	161,2	199,9	217,3	227,2	233,6	235,7
5	6,6	31,6	60,2	109,8	217,1	321,8	424,1	524,2	568,9
<b>I<sub>ц</sub>, грн/хв</b>									
1	4,21	7,75	8,61	9,11	9,44	9,55	9,61	9,65	9,67
2	2,48	8,73	11,55	13,68	15,34	15,98	16,32	16,53	16,60
3	0,96	6,20	9,30	13,40	16,98	18,62	19,55	20,15	20,36
4	1,43	9,14	14,33	19,44	24,46	26,72	28,00	28,83	29,12
5	0,1	2,57	6,29	12,73	26,67	40,28	53,59	66,59	72,41

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>S<sub>п</sub>, грн</b>									
1	3,79	9,07	15,68	28,89	68,51	134,55	266,64	664,5	1320,6
2	21,49	30,87	42,6	66,05	136,43	253,9	488,29	1192	2365,5
3	24,26	28,9	34,7	46,3	81,9	139,08	255,05	602,97	1183,2
4	39,08	46,88	56,63	76,13	134,63	232,13	427,13	1012,1	1987,3
5	118,24	120,76	123,9	130,22	149,13	170,64	233,67	432,76	747,9
<b>E<sub>п</sub>, кВт/грн</b>									
1	0,0082	0,0045	0,0041	0,0039	0,0038	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
2	0,04	0,012	0,009	0,0077	0,0069	0,0067	0,0066	0,0065	0,0065
3	0,142	0,022	0,014	0,011	0,0084	0,0077	0,0073	0,0072	0,0071
4	0,197	0,032	0,021	0,015	0,012	0,011	0,01	0,01	0,01
5	0,634	0,169	0,069	0,034	0,016	0,011	0,0083	0,0064	0,0062
<b>P</b>									
1	0,998	0,996	0,994	0,99	0,979	0,962	0,936	0,896	0,886
2	0,995	0,992	0,988	0,98	0,959	0,924	0,863	0,725	0,685
3	0,995	0,993	0,992	0,988	0,978	0,961	0,932	0,866	0,82
4	0,995	0,988	0,985	0,978	0,96	0,93	0,876	0,745	0,699
5	0,995	0,991	0,981	0,976	0,97	0,958	0,947	0,923	0,898

Таблиця 2.2

Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт.									
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Токарно-гвинторізний	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Токарний з ЧПК										
Токарно-револьверний										
Токарний двошпиндельний з ЧПК										
Токарний багатшпиндельний										

Для величини виробничої партії деталей  $5 \leq N_d < 200$ , яка характерна для умов багатомноменклатурного виробництва вибір методу оптимізації впливає на оптимізаційне рішення.

Графічні залежності, наведені на рис. 2.2–2.5, дозволяють наочно проаналізувати особливості визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації. Позначення верстатів на рис. 1–4 таке: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпиндельний із ЧПК; 5 – токарний багатшпиндельний напівавтомат.

При оптимізації методом вагових коефіцієнтів та аналізу ієрархій (рис. 2.2 та 2.3) найвигіднішим є токарний багатшпиндельний напівавтомат (варіант 5), для якого критерії  $W_H$ ,  $I_{II}$ ,  $S_{II}$ ,  $P$  набувають оптимальних значень, а критерій  $E_{II}$  набуває середнього значення з діапазону зміни значень серед конкуруючих варіантів, тобто оптимізація цими методами базується на принципі сумарного впливу, при якому враховується сумарний внесок абсолютних значень кожного критерію.

При оптимізації методами близькості до ідеальної точки та нечітких множин (рис. 2.4 та 2.5), а також методом послідовних поступок найвигіднішим є токарно-револьверний напівавтомат (варіант 3), для якого жоден критерій не має оптимуму, але у нього одночасно всі критерії оптимальності набувають середніх значень із діапазону зміни значень. Тобто ці методи базуються на принципі гарантованого результату, згідно

з якими в оптимального варіанта значення одночасно всіх критеріїв найбільш наближені до оптимальних значень серед конкуруючих варіантів.

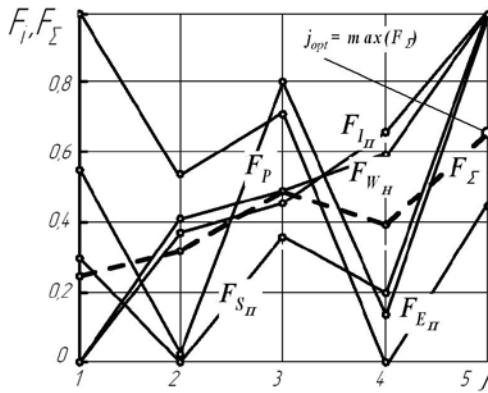


Рис. 2.2. Залежності величини локальних ( $F_i$ ) та узагальнювального ( $F_{\Sigma}$ ) критеріїв оптимальності для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом вагових коефіцієнтів ( $N_{д} = 150$  шт.)

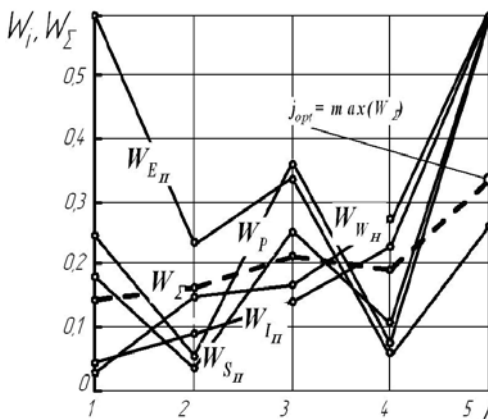


Рис. 2.3. Залежності величини локальних ( $W_i$ ) та глобального ( $W_{\Sigma}$ ) пріоритетів різних типів токарних верстатів при оптимізації методом аналізу ієрархій ( $N_{д} = 150$  шт.)



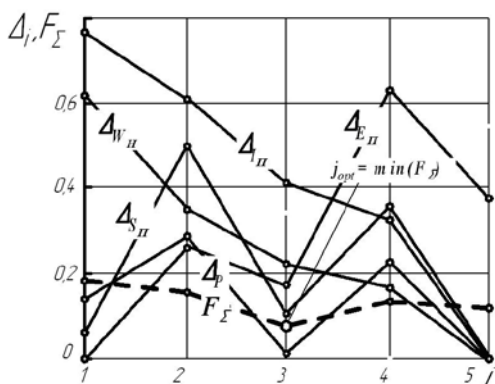


Рис. 2.4. Залежності величини нормованих різниць ( $\Delta_i$ ) та узагальнювального критерію ( $F_\Sigma$ ) для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом близькості до ідеальної точки ( $N_D = 150$  шт.)

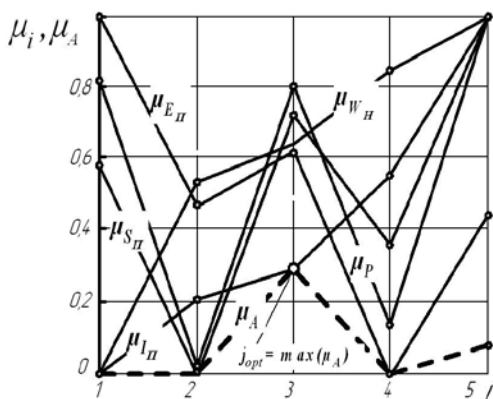


Рис. 2.5. Залежності величини функцій приналежності для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом нечітких множин ( $N_D = 150$  шт.)

Якщо вибір найвигіднішого типу верстата здійснюється серед двох або трьох альтернативних варіантів (табл. 2.3–2.5), то всі методи оптимізації забезпечують однакові результати. Тобто за наявності не більше трьох альтернативних варіантів рішення

доцільно використовувати найменш складні й трудомісткі методи оптимізації.

За умовно детермінованого характеру вихідних даних необхідно використовувати метод вагових коефіцієнтів, а в умовах невизначеності – метод нечітких множин.

У табл. 2.3–2.5 позначення методів оптимізації: 1 – вагових коефіцієнтів; 2 – аналізу ієрархій; 3 – близькості до ідеальної точки; 4 – послідовних поступок; 5 – нечітких множин.

Таким чином, вибір методу багатокритеріальної оптимізації ТП залежить не тільки від характеру задання параметрів та обмежень у математичних моделях, а й від кількості альтернативних варіантів рішення.

Таблиця 2.3

Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт.									
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Токарно-звинторізний	○○○○○					3	4	5		
Токарний з ЧПК	1									
Токарно-револьверний		2								

Таблиця 2.4

Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт.									
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Токарно-звинторізний	○○○○○					3	4	5		
Токарний з ЧПК	1									
Токарний двошпиндельний з ЧПК		2								

Таблиця 2.5

Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт.									
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Токарно-звинторізний	○○○○○					3	4	5		
Токарно-револьверний	1	2								

З метою встановлення впливу кількості критеріїв оптимальності із запропонованої системи на результат оптимізаційного рішення був проведений вибір найвигіднішого типу токарного верстата для обробки фланця з урахуванням різної кількості критеріїв. У табл. 2.6 подані величини виробничої партії деталей, межі яких визначають оптимальний тип верстата з урахуванням різної кількості критеріїв оптимальності із запропонованої системи критеріїв.

У графічному вигляді на рис. 2.6 наведені діаграми впливу кількості критеріїв оптимальності на величину виробничої партії деталей, яка визначає найвигідніший тип верстата. Дослідження результатів вибору найвигіднішого типу токарного верстата, які проводилися з використанням лише деяких критеріїв оптимальності із запропонованої системи критеріїв дало змогу встановити, що збільшення числа критеріїв об'єктивно розширює область ефективного застосування того чи іншого ТП і дозволяє уточнити граничні значення величини виробничої партії деталей, які визначають найвигідніший варіант ТП.

Так, при використанні запропонованої системи критеріїв область ефективного застосування токарно-гвинторізного верстата збільшується у 2,35 раза, токарного із ЧПК – у 1,85, токарного двошпиндельного із ЧПК – у 2,65, а токарно-револьверного – у 1,7 раза відповідно (рис. 2.6).

Таким чином, запропонована система критеріїв для багатокритеріальної оптимізації ТП дозволяє об'єктивно розширити межі ефективного застосування ТП.

Для визначення закономірностей зміни критеріїв оптимальності були проведені розрахунки значень критеріїв оптимальності при обробці деталей на різних типах металорізальних верстатів з урахуванням діаметра оброблюваної поверхні, матеріалу заготовки та характеру обробки (чорнова і чистова). Розрахунок норм часу здійснювався з урахуванням режимів різання згідно з рекомендаціями загальномашинобудівних нормативів [10–11].

Таблиця 2.6

Величина виробничої партії деталей, що визначає оптимальний тип верстата

Верстат	Критерії оптимальності, що враховувалися				
	$W_H$	$W_H, I_{II}$	$W_H, I_{II}, S_{II}$	$W_H, I_{II}, S_{II}, E_{II}$	$W_H, I_{II}, S_{II}, E_{II}, P$
Токарно-гвинторізний	1–6	1–8	1–10	1–13	1–15
Токарний із ЧПК	7–36	9–43	11–44	14–55	16–62
Токарно-револьверний	37–53	44–63	45–89	56–113	63–127
Токарний двошпindelний із ЧПК	54–180	64–196	90–235	114–285	128–318
Токарний багатошпindelний	>180	>196	>235	>285	>318

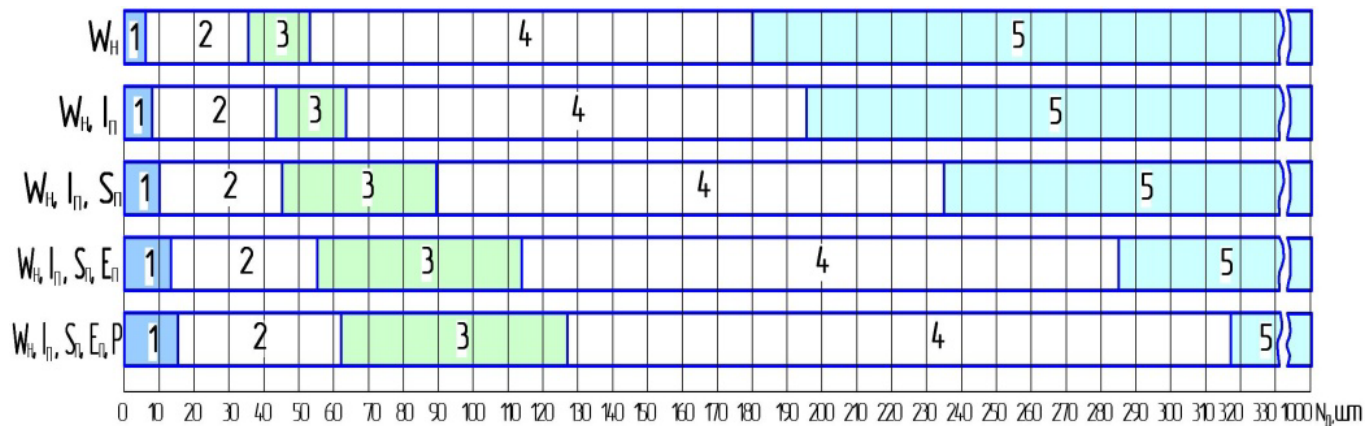


Рис. 2.6. Діаграма впливу кількості критеріїв оптимальності на величину виробничої партії деталей, межі якої визначають оптимальний тип токарного верстата:  
 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний;  
 4 – токарний двошпindelний із ЧПК; 5 – токарний багатшпindelний

Аналіз залежності критеріїв оптимальності від діаметра оброблюваної поверхні (рис. 2.7–2.10) показав, що зі збільшенням діаметра обробки значення критеріїв інтенсивності прибутку та інтенсивності формоутворення зменшуються, а електромісткості прибутку та витрат на виробничі площі збільшуються. Це обумовлено тим, що при збільшенні діаметра обробки зменшується швидкість різання, яка найбільш суттєво впливає на продуктивність обробки і відповідно значення критеріїв оптимальності.

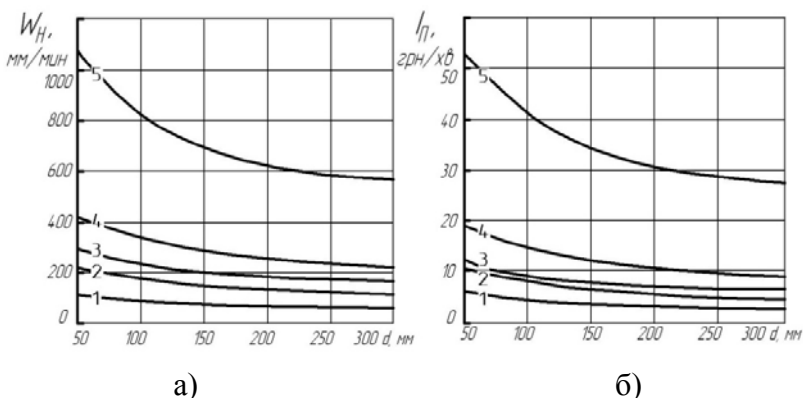


Рис. 2.7. Графіки залежності інтенсивності

формоутворення (а) та інтенсивності маржинального прибутку (б) від діаметра оброблюваної поверхні при чорновому точінні сталевго фланця на різних типах токарних верстатів:

- 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний з ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпindelний з ЧПК;
- 5 – токарний багатшпindelний

Така закономірність характерна для всіх видів обробки, крім внутрішнього шліфування, при якому зі збільшенням діаметра оброблюваної поверхні параметри режиму різання і продуктивність збільшуються, забезпечуючи поліпшення значень критеріїв оптимальності.

Критерії оптимальності залежать також від характеру обробки та матеріалу заготовки. Діаграми, показані на рис. 2.11–2.14, відображають рівень значень критеріїв оптимальності для

чорнового та чистого точіння деталі типу фланця, виготовленого з різних матеріалів заготовки.

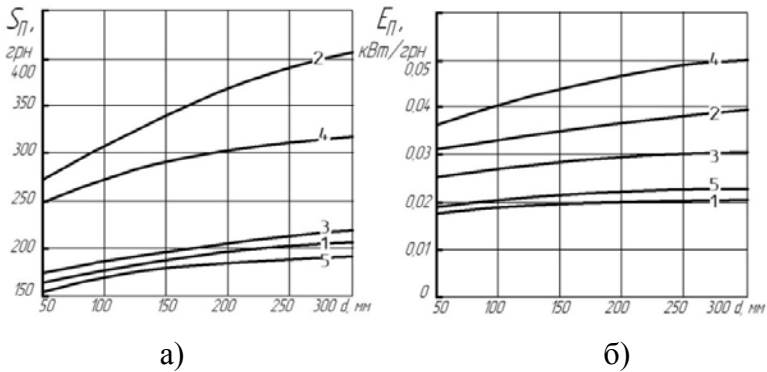


Рис. 2.8. Графіки залежності постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей (а) та електричності прибутку (б) від діаметра оброблюваної поверхні при чорновому точінні сталевого фланця на різних типах токарних верстатів: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпindelний із ЧПК; 5 – токарний багатшпindelний

При чистовому точінні у порівнянні з чорновим інтенсивність формоутворення та інтенсивність маржинального прибутку зменшуються у 1,35 і 1,43 рази, а постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей, та електричність прибутку збільшуються відповідно – у 1,35 та 1,17 рази.

При чорновому точінні чавунної заготовки у порівнянні зі сталеву інтенсивність формоутворення та інтенсивність маржинального прибутку збільшуються відповідно у 2,1 та 2,25 рази, а постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей, та електричність прибутку зменшуються – у 2,1 та 1,4 рази.

Для чорнової обробки алюмінієвої заготовки відповідно інтенсивність прибутку та інтенсивність формоутворення збільшуються у 2,4 та 2,25 рази, а постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей та електричність прибутку зменшуються – у 2,25 та 1,47 рази.

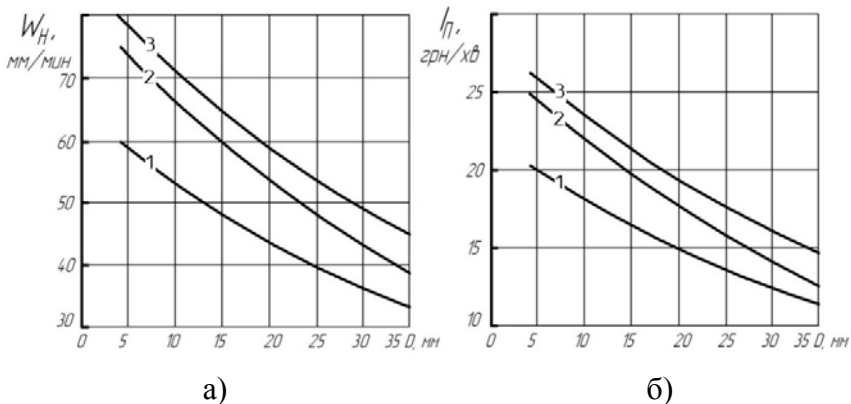


Рис. 2.9. Графіки залежності інтенсивності формоутворення (а) та інтенсивності маржинального прибутку (б) від діаметра оброблюваної поверхні при свердлінні сталевго фланця на різних типах верстатів: 1 – вертикально-свердильний; 2 – свердильно-фрезерний із ЧПК; 3 – токарний багатоцільовий

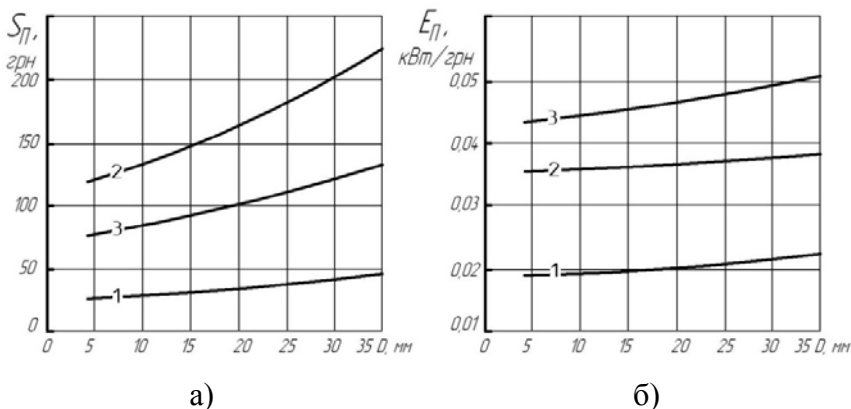


Рис. 2.10. Графіки залежності постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей (а) та електричності прибутку (б) від діаметра оброблюваної поверхні при свердлінні сталевго фланця на різних типах верстатів: 1 – вертикально-свердильний; 2 – свердильно-фрезерний із ЧПК; 3 – токарний багатоцільовий



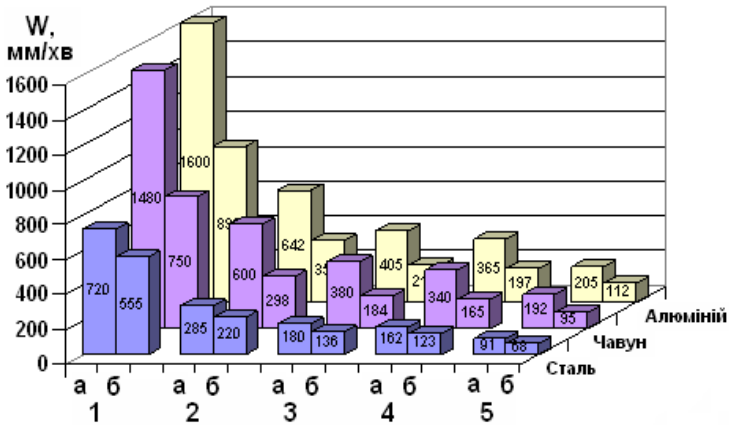


Рис. 2.11. Діаграма інтенсивності формоутворення при токарній обробці фланця: а – чорнове точіння; б – чистове точіння; 1 – токарний багатшпіндельний напівавтомат; 2 – токарний двошпіндельний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний із ЧПК; 5 – токарно-гвинторізний

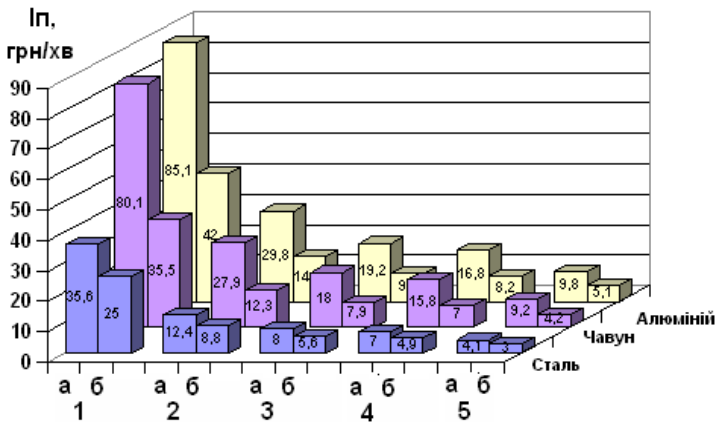


Рис. 2.12. Діаграма інтенсивності маржинального прибутку при токарній обробці фланця: а – чорнове точіння; б – чистове точіння; 1 – токарний багатшпіндельний напівавтомат; 2 – токарний двошпіндельний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний із ЧПК; 5 – токарно-гвинторізний

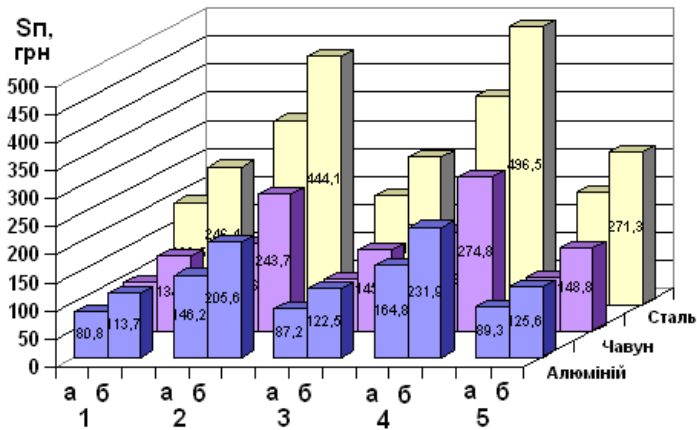


Рис. 2.13. Діаграма постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей при токарній обробці фланця: а – чорнове точіння; б – чистове точіння; 1 – токарний багатшпindelний напівавтомат; 2 – токарний двошпindelний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний із ЧПК; 5 – токарно-гвинторізний

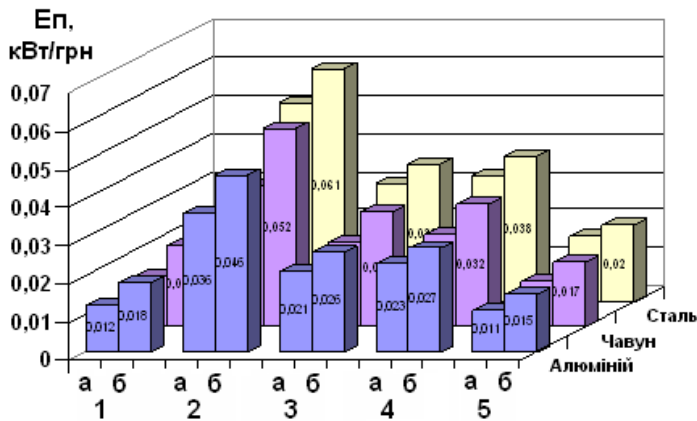


Рис. 2.14. Діаграма електричності прибутку при токарній обробці фланця: а – чорнове точіння; б – чистове точіння; 1 – токарний багатшпindelний напівавтомат; 2 – токарний двошпindelний з ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний з ЧПК; 5 – токарно-гвинторізний

При чистовій обробці чавунної та алюмінієвої заготовок інтенсивність формоутворення збільшується у 1,35 та 1,6 рази, інтенсивність маржинального прибутку – в 1,42 та 1,67, постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей зменшуються відповідно – у 1,6 та 1,35 рази, а електромісткість прибутку – у 1,35 та 1,18 у порівнянні з обробкою сталеві заготовки.

Як бачимо, характер обробки та матеріал заготовки найбільш суттєво впливають на інтенсивність маржинального прибутку й істотно на інтенсивність формоутворення та постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей, і найменшою мірою від них залежить електромісткість прибутку.

На рис. 2.15 та 2.16 наведені діаграми впливу діаметра обробки, матеріалу заготовки та характеру обробки на вибір оптимального типу токарного верстата. Зі збільшенням діаметра обробки значення критеріїв оптимальності погіршуються і зменшується величина виробничої партії деталей, у межах якої визначається оптимальний тип верстата. Найбільш суттєво на величину виробничої партії деталей впливає збільшення діаметра обробки від 50 до 100 мм. У діапазоні діаметрів 100–300 мм величина виробничої партії змінюється неістотно. Наприклад, при чорновій обробці заготовки діаметром 50 мм, виготовленої зі сталі, токарно-гвинторізний верстат є найвигіднішим при величині виробничої партії до 11 шт., а при діаметрі 100 мм – до 7 шт., у разі збільшення діаметра заготовки межі його ефективного застосування обмежуються шістьма деталями у виробничій партії.

При чистовій обробці значення критеріїв оптимальності погіршуються і величина виробничої партії деталей, що визначає оптимальний тип верстата, зменшується в середньому на 32%. У разі обробки заготовок, що виготовлені з чавуну та алюмінію, величина виробничої партії збільшується в середньому відповідно в 1,95 та 2,12 рази.

Критерії інтенсивності маржинального прибутку та електромісткість прибутку істотно залежать від різниці між ринковими цінами заготовки та деталі, що визначають

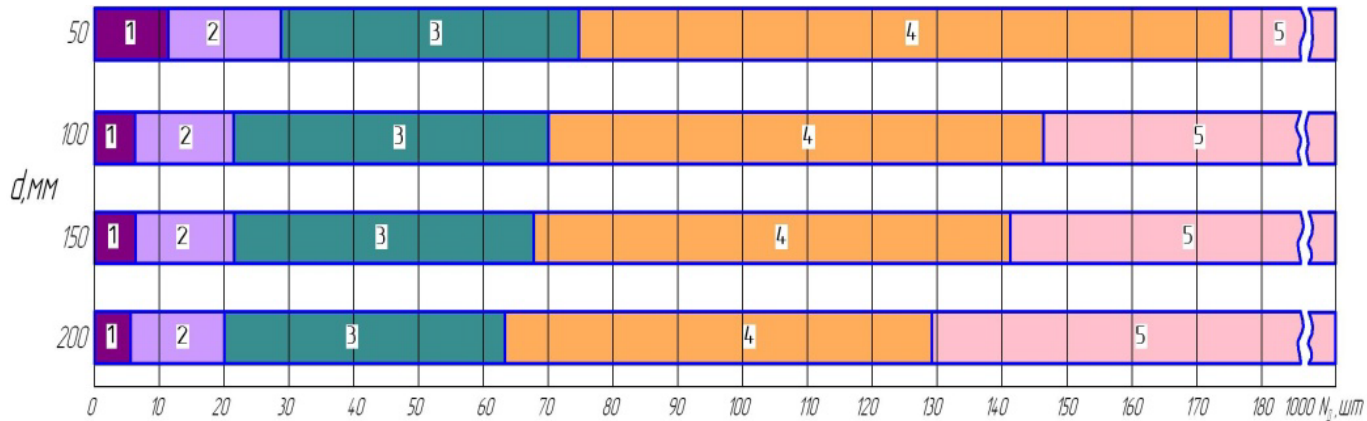


Рис. 2.15. Діаграма впливу діаметра обробки на вибір оптимального типу токарного верстата

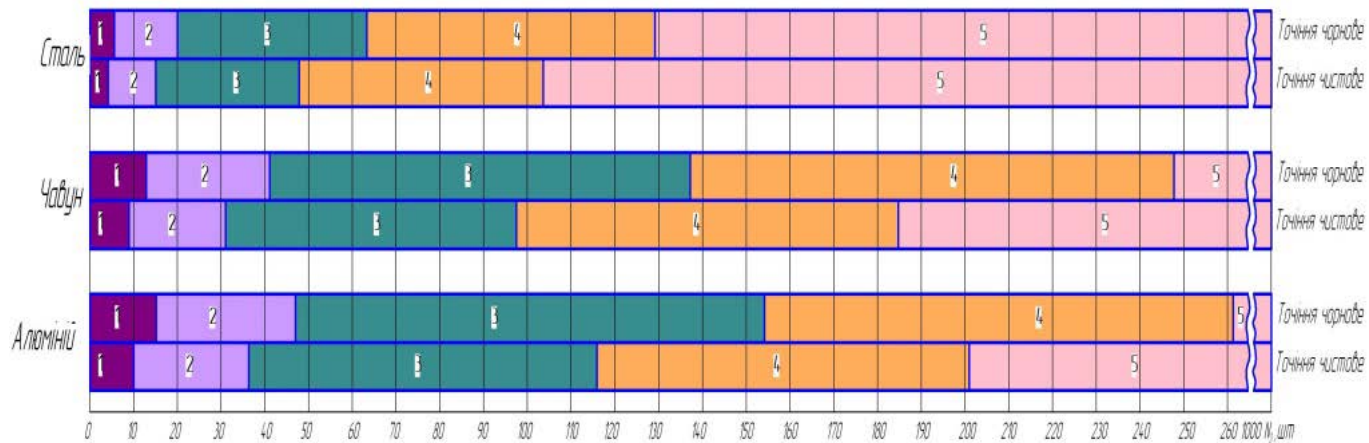


Рис. 2.16. Діаграма впливу матеріалу заготовки та характеру обробки на вибір оптимального типу токарного верстата

величину прибутку. Зі збільшенням різниці між цінами заготовки та деталі помітно збільшується різниця між інтенсивністю прибутку різних типів верстатів (рис. 2.17), тоді як різниця між електромісткістю прибутку різних типів верстатів – зменшується (рис. 2.18). Це підтверджує різний ступінь впливу цих критеріїв на вибір оптимального типу верстата залежно від рівня прибутку.

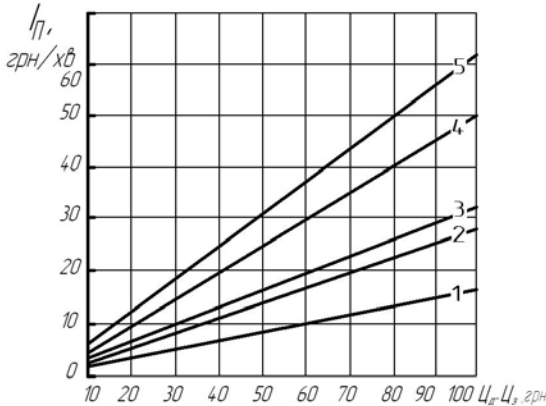


Рис. 2.17. Вплив різниці між ціною заготовки та деталі на інтенсивність маржинального прибутку при чорновому точінні сталевих фланців: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпиндельний із ЧПК; 5 – токарний багатошпиндельний напівавтомат

Залежності, наведені на рис. 2.19, дозволяють визначити мінімальну ціну деталі, при якій кожен тип токарного верстата забезпечуватиме отримання прибутку.

Від ціни деталі залежить критична програма випуску продукції, що визначає мінімальну величину виробничої партії деталей, при якій обраний тип верстата забезпечуватиме отримання прибутку (рис. 2.20).

На інтенсивність маржинального прибутку впливає також трудомісткість обробки деталі. Залежності, наведені на рис. 2.21, дозволяють визначити цей вплив для кожного типу токарного верстата.

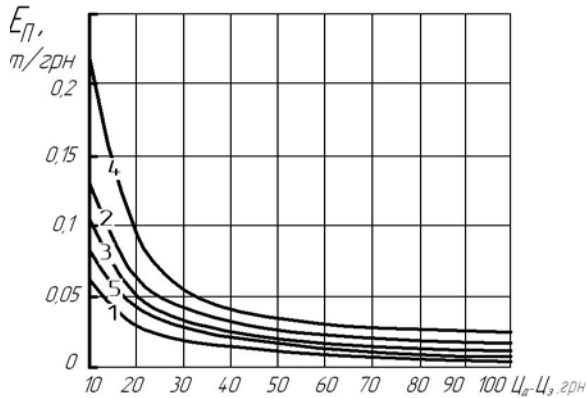


Рис. 2.18. Вплив різниці між ціною заготовки та деталі на електромісткість прибутку при чорновому точінні сталевого фланця: 1 – вертикально-свердильний; 2 – свердлильно-фрезерний із ЧПК; 3 – токарний багатощаблевий

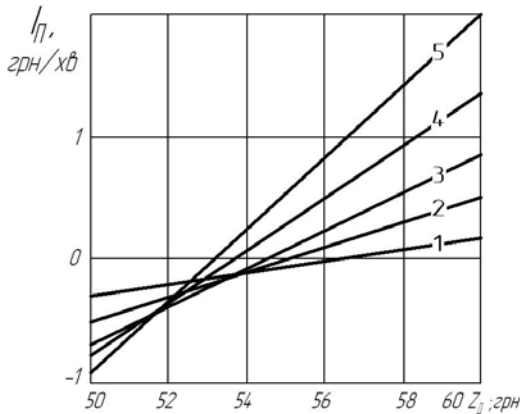


Рис. 2.19. Залежність інтенсивності маржинального прибутку від ціни деталі для різних типів токарних верстатів ( $N_d = 150$  шт.): 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпиндельний із ЧПК; 5 – токарний багатощаблевий напівавтомат

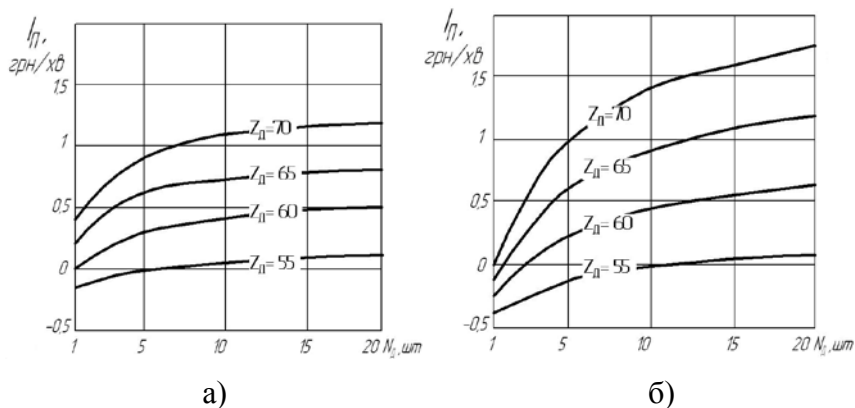


Рис. 2.20. Вплив ціни деталі на величину критичної програми випуску для: а – токарно-гвинторізного верстата; б – токарного верстата із ЧПК

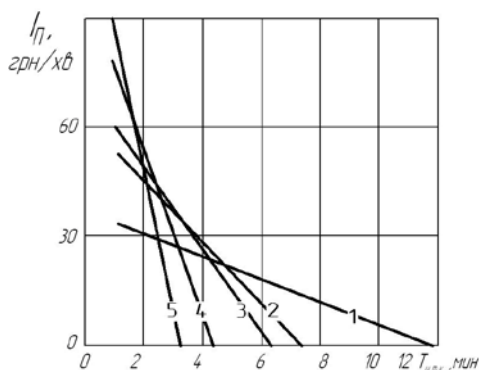


Рис. 2.21. Вплив трудомісткості обробки деталі на інтенсивність маржинального прибутку для різних типів токарних верстатів: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпindelний із ЧПК; 5 – токарний багатшпindelний напівавтомат

Постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей залежать від величини щомісячної орендної плати за користування виробничими площами, які займає металорізальне обладнання.



На рис. 2.22 показана залежність постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей від величини орендної плати. Як бачимо, зі збільшення орендної плати помітно зростає різниця між постійними витратами для різних типів верстатів, збільшуючи тим самим вплив цього критерію на вибір оптимального рішення.

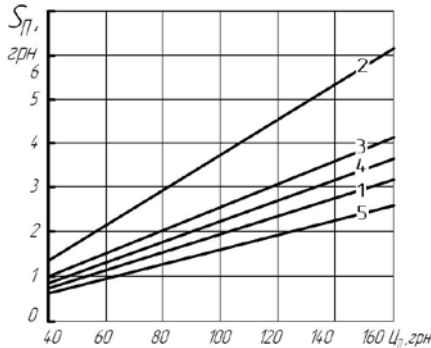


Рис. 2.22. Залежність постійних витрат, що припадають на виробничу партію деталей, від величини орендної плати при чорновому точінні сталевого фланця:

- 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК;
- 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпиндельний із ЧПК; 5 – токарний багатшпиндельний напівавтомат

Ймовірність виконання завдання залежить від часу його виконання, який визначається трудомісткістю обробки заготовки та величиною виробничої партії деталей. Так, зі збільшенням величини виробничої партії деталей ймовірність виконання завдання зменшується, що викликано збільшенням ймовірності відмови верстата та РІ (рис. 2.23).

Наявність резерву часу  $\tau$  год дозволяє компенсувати можливі простой через відмову РІ та обладнання, забезпечує підвищення ймовірності виконання завдання.

На рис. 2.24 наведені графіки залежності ймовірності виконання завдання для токарного верстата із ЧПК від резерву часу. На ймовірність виконання завдання впливають якість та надійність РІ, яку визначає показник степеня  $b$  у розподілі

Вейбула, що характеризує закон розподілу густини ймовірності стійкості  $P_I$  (експоненціальний, нормальний, Релея).

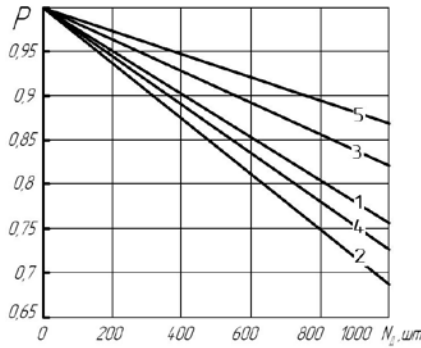


Рис. 2.23. Залежність ймовірності виконання завдання від величини виробничої партії при чорновому точінні сталевого фланця: 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпиндельний із ЧПК; 5 – токарний багатшпиндельний напівавтомат

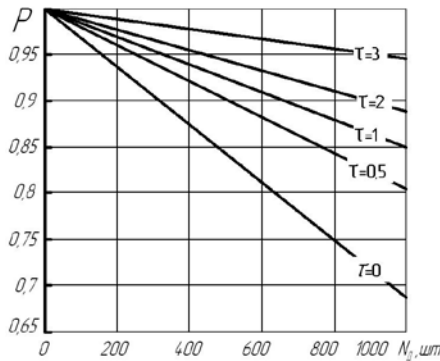


Рис. 2.24. Залежність ймовірності виконання завдання від величини виробничої партії та резерву часу для токарного верстата із ЧПК

На рис. 2.25 наведені графіки залежності ймовірності виконання завдання від показника степеня розподілу Вейбула для різних значень резерву часу.

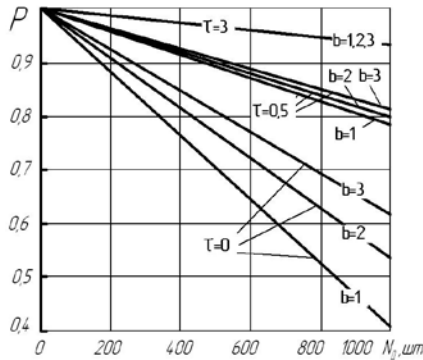


Рис. 2.25. Залежність імовірності виконання завдання від показника степеня розподілу Вейбула для токарного верстата із ЧПК

Якість РІ істотно впливає на ймовірність виконання завдання за відсутності резерву часу. Наявність резерву часу  $\tau \geq 0,5$  год дозволяє виключити вплив якості РІ на ймовірність виконання завдання.

## 2.6. Автоматизоване визначення трудомісткості обробки деталі

В умовах багатомоделного виробництва для визначення оптимального ТП необхідно проводити великі обсяги розрахунків, пов'язаних із визначенням їх техніко-економічних показників. Для прийняття рішення з вибору оптимального ТП необхідно визначити продуктивність обробки для всіх конкуруючих варіантів ТП. Тому пріоритетним завданням під час технологічної підготовки виробництва та у ході розроблення найвигіднішого ТП є визначення трудомісткості обробки деталі для всіх можливих варіантів ТП. При цьому трудомісткість обробки важливо визначати на підставі робочого креслення деталі без детального розроблення операційних технологій без виконання складних та трудомістких розрахунків. Існуючі методи оцінки трудомісткості, що базуються на нормах часу виготовлення

деталей-аналогів (див. п. 1.3), не забезпечують високої достовірності результатів і не відзначаються універсальністю застосування.

Оцінку трудомісткості обробки деталі пропонується здійснювати за допомогою системи автоматизованого розрахунку на підставі усереднених кількісних показників нормативної інтенсивності формоутворення металорізальних верстатів, що застосовуються при її обробці.

Трудомісткість обробки деталі визначається з використанням нормативної інтенсивності формоутворення металорізальних верстатів, на яких вона обробляється:

$$T_{штк} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{L_{ij}}{W_{Hij}} \right),$$

де  $m$  – кількість металорізальних верстатів, що застосовуються при обробці деталі, шт.;

$p_j$  – кількість оброблюваних поверхонь деталі на  $j$ -му верстаті, шт.;

$L_{ij}$  – довжина  $i$ -ї поверхні, оброблюваної на  $j$ -му верстаті, мм;

$W_{Hij}$  – показник нормативної інтенсивності формоутворення  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, мм/хв.

Для визначення усереднених кількісних показників нормативної інтенсивності формоутворення металорізальних верстатів розроблені аналітичні залежності, які враховують конструктивні параметри оброблюваних поверхонь, технологічні особливості обробки та ступінь концентрації технологічних переходів.

У загальному випадку ці залежності мають вигляд

$$W_H = (a \cdot e^{b \cdot d} + c) \cdot (m \cdot \ln(L + f) + g) \cdot (h + k \cdot N),$$

де  $a, b, c, f, g, h, k, m$  – коефіцієнти, що характеризують тип верстата, характер і умови обробки та матеріал заготовки;

$d$  – діаметр обробки, мм;

$L$  – довжина обробки, мм;

$N$  – кількість інструментів у налагодженні, шт.

Вони отримані шляхом апроксимації результатів розрахунків інтенсивності формоутворення з використанням загальномашинобудівних нормативів часу та режимів різання [10–11]. Аналітичні залежності отримані для різних типів верстатів і технологічних переходів, що застосовуються при обробці поверхонь валів, фланців і втулок та для різних матеріалів.

Наприклад, аналітичні залежності для визначення нормативної інтенсивності формоутворення чорнової токарної обробки циліндричних поверхонь деталі типу «фланець» мають вигляд:

при обробці на токарно-гвинторізному верстаті

$$W_H = (0,45 \cdot \ln(L + 85,84) - 1,39) \cdot (1,31 \cdot e^{-0,005 \cdot D} + 0,34) \times \\ \times (74,3 + 41,19 \cdot N);$$

при обробці на токарному верстаті з ЧПК

$$W_H = (0,675 \cdot \ln(L + 83,149) - 1,49) \cdot (1,28 \cdot e^{-5,356 \cdot 10^{-3} \cdot D} + 0,437) \times \\ \times (59,158 + 37,948 \cdot N);$$

при обробці на токарно-револьверному верстаті

$$W_H = (0,72 \cdot \ln(L + 75,25) - 1,17) \cdot (1,17 \cdot e^{-5,8 \cdot 10^{-3} \cdot D} + 0,57) \times \\ \times (55,9 + 33,2 \cdot N);$$

при обробці на токарному двошпиндельному верстаті з ЧПК

$$W_H = K \cdot (0,67 \cdot \ln(L + 77,13) - 0,12) \cdot (1,17 \cdot e^{-7,2 \cdot 10^{-3} \cdot D} + 0,5) \times \\ \times (31,57 + 31,78 \cdot N);$$

при обробці на токарному двошпиндельному верстаті з ЧПК

$$W_H = K \cdot (0,86 \cdot \ln(L + 57,8) - 0,54) \cdot (1,2 \cdot e^{-0,008 \cdot D} + 1,1) \times \\ \times (9,7 + 9,3 \cdot N).$$

Аналітичні залежності для визначення нормативної інтенсивності формоутворення при фрезеруванні пазів кінцевою фрезою мають вигляд:

при обробці на вертикально-фрезерному верстаті

$$W_H = (1,15 \cdot \ln(L + 15,2) + 12,5) \cdot (5,91 \cdot e^{-0,15 \cdot D} + 0,3);$$

при обробці на токарному багатопільовому верстаті з ЧПК

$$W_H = (1,69 \cdot \ln(L + 12,2) + 8,2) \cdot (7,9 \cdot e^{-0,075 \cdot D} + 1,25);$$

при обробці на фрезерному верстаті з ЧПК

$$W_H = (1,66 \cdot \ln(L + 13,4) + 7,4) \cdot (7,7 \cdot e^{-0,075 \cdot D} + 1,2).$$

Аналітичні залежності для визначення нормативної інтенсивності формоутворення шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь на деталі типу «фланець» мають вигляд:

при обробці на круглошліфувальному верстаті

$$W_H = (0,45 \cdot e^{-0,012 \cdot D} + 0,781) \cdot (-0,054 \cdot e^{3,292 \cdot 10^{-3} \cdot L} + 0,152);$$

при обробці на круглошліфувальному верстаті з ЧПК

$$W_H = (0,47 \cdot e^{-1,43 \cdot 10^{-3} \cdot D} + 0,5) \cdot (9,82 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,032 \cdot L} + 0,23).$$

Аналітичні залежності для визначення усереднених кількісних показників інтенсивності формоутворення окремих поверхонь розроблялися з урахуванням їх основних конструктивних ознак (рис. 2.26), що впливають на трудомісткість обробки.

Для автоматизованого розрахунку трудомісткості обробки розроблено інформаційну модель поверхні деталі, що є десятипозиційним кодом, який враховує тип та матеріал деталі, вид поверхні, її розташування на деталі, а також розміри і вимоги за точністю та шорсткістю. У структурі коду інформаційної моделі циліндричної поверхні (рис. 2.27) враховуються діаметра, довжина та квалітет точності діаметра

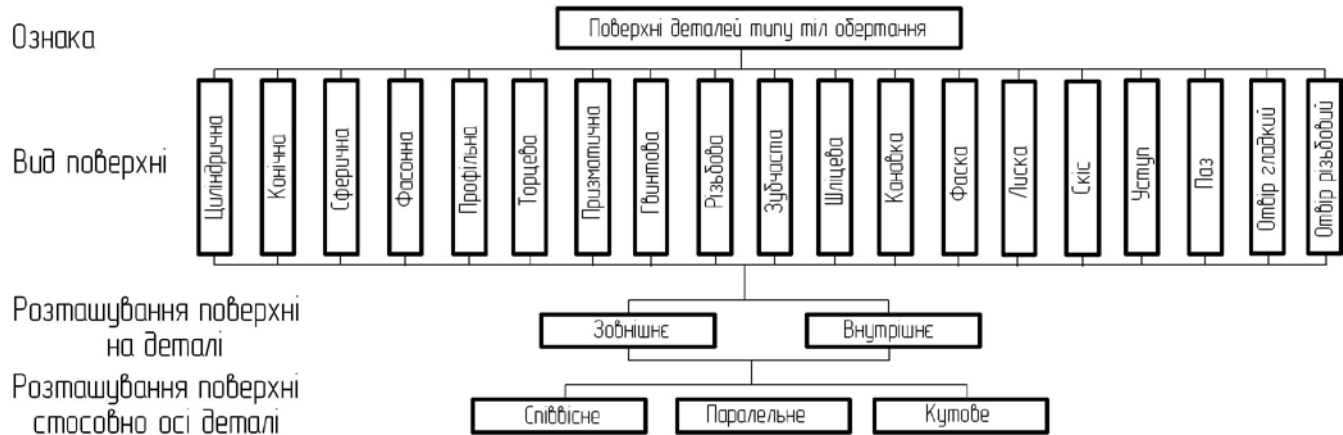


Рис. 2.26. Класифікація поверхонь деталей типу тіл обертання за конструктивними ознаками

поверхні. При обробці різьбових поверхонь враховуються діаметр та довжина, крок різьби і клас точності різьби, для зубчастих поверхонь – відповідно ділильний діаметр, ширина зубчастого вінця, модуль та клас точності й т.д.

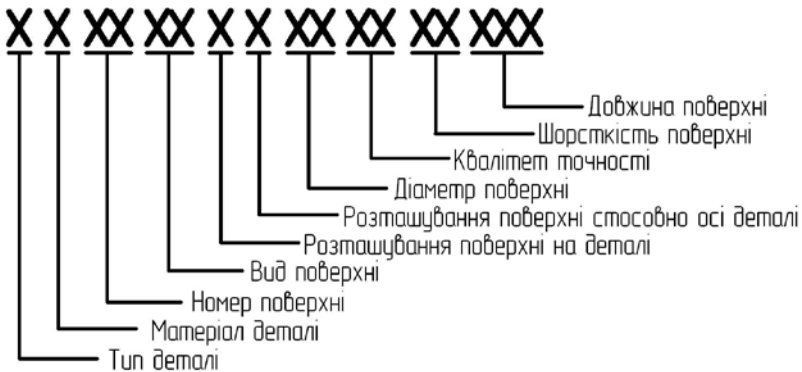


Рис. 2.27. Структура коду інформаційної моделі циліндричної поверхні

Номер поверхні деталі у структурі коду позначається числовим значенням від 01 до 99 включно. Квалітет точності діаметра або клас точності різьби і зубчастого вінця задаються двозначним номінальним значенням, наприклад, квалітета точності IT12 відповідає код 12, а IT6 – 06 і т.д.

Кодування інших класифікаційних ознак поверхонь здійснюється на підставі кодифікатора (табл. 2.7).

Запропонована структура коду інформаційної моделі поверхні є сукупністю характеристик поверхні й вимог, що ставляться до неї та впливають на трудомісткість її обробки.

Вона містить у собі всю необхідну та достатню інформацію для визначення як трудомісткості обробки окремої поверхні, так і деталі в цілому.

Наприклад, відповідно до кодифікатора і структури коду зовнішня циліндрична поверхня деталі з порядковим номером 1 діаметром  $d = 50$  мм з точністю за  $h10$ , шорсткістю  $Ra = 6,3$  мкм та довжиною  $L = 30$  мм має код:

- для сталевого вала 1. 01. 1. 1. 1. 50. 10. 02. 30;
- для чавунного фланця 2. 01. 1. 1. 1. 50. 10. 02. 30.



Таблиця 2.7

## Кодифікатор класифікаційних ознак поверхонь деталей

Класифікаційна ознака поверхні	Можливі варіанти	Код
1	2	3
Тип деталі	Вал	1
	Фланець	2
	Втулка	3
Матеріал деталі	Сталь	1
	Чавун	2
	Алюміній	3
Вид поверхні	Циліндрична	1
	Конічна	2
	Сферична	3
	Фасонна	4
	Профільна	5
	Торцева	6
	Призматична	7
	Гвинтова	8
	Різьбова	9
	Зубчаста	10
	Шліцева	11
	Канавка	12
	Фаска	13
	Лиска	14
	Скос	15
	Уступ	16
	Паз	17
	Отвір гладкий	18
	Отвір різбовий	19
Розташування поверхні на деталі	Зовнішнє	1
	Внутрішнє	2
Розташування поверхні стосовно осі деталі	Співвісне	1
	Паралельне	2
	Кутове	3

1	2	3
Шорсткість поверхні (параметр шорсткості Ra, мкм)	12,5	01
	6,3	02
	3,2	03
	2,5	04
	1,25	05
	0,8	06
	0,63	07
	0,5	08
	0,4	09
	0,32	10

Після кодування поверхонь розробляється загальна інформаційна модель деталі (рис. 2.28), що складається з кодів інформаційної моделі кожної окремої поверхні і формується у вигляді матриці кодованих значень класифікаційних ознак усіх поверхонь.

Тут  $i$  – номер  $i$ -ї поверхні деталі  $i = 1, 2, \dots, n$ , де  $n$  – кількість поверхонь деталі;  $j$  – номер класифікаційної ознаки в структурі коду інформаційної моделі  $i$ -ї поверхні деталі  $j = 1, 2, \dots, 10$ ;  $L_{i,j}$  – кодоване значення  $j$ -ї класифікаційної ознаки  $j$ -ї поверхні.

$$B = \begin{vmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1j} & \dots & I_{110} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2j} & \dots & I_{210} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n1} & \dots & I_{ij} & \dots & I_{n10} \end{vmatrix}$$

Рисунок 2.28 – Інформаційна модель деталі

Автоматизований розрахунок трудомісткості обробки відбувається на підставі інформаційної моделі деталі з використанням бази даних металорізальних верстатів, технологічної оснастки та аналітичних залежностей для

визначення інтенсивності формоутворення згідно зі схемою, показаною на рис. 2.29. Розрахунок на ЕОМ відбувається у такій послідовності: вводяться інформаційна модель деталі та розміри поверхонь заготовки; розпізнаються складові інформаційної моделі деталі; на підставі бази даних визначаються маршрути обробки деталі; обираються металорізальні верстати та їх технологічна оснастка; обираються необхідні аналітичні залежності для визначення інтенсивності формоутворення; з урахуванням глибини різання розраховуються проміжні технологічні розміри поверхонь; призначаються значення діаметра та довжини поверхні й відбувається розрахунок трудомісткості обробки поверхонь.

Для перевірки ефективності використання запропонованої методики був проведений порівняльний аналіз значень трудомісткості обробки, отриманих шляхом традиційного розрахунку за нормативами та за допомогою запропонованої методики автоматизованої оцінки.

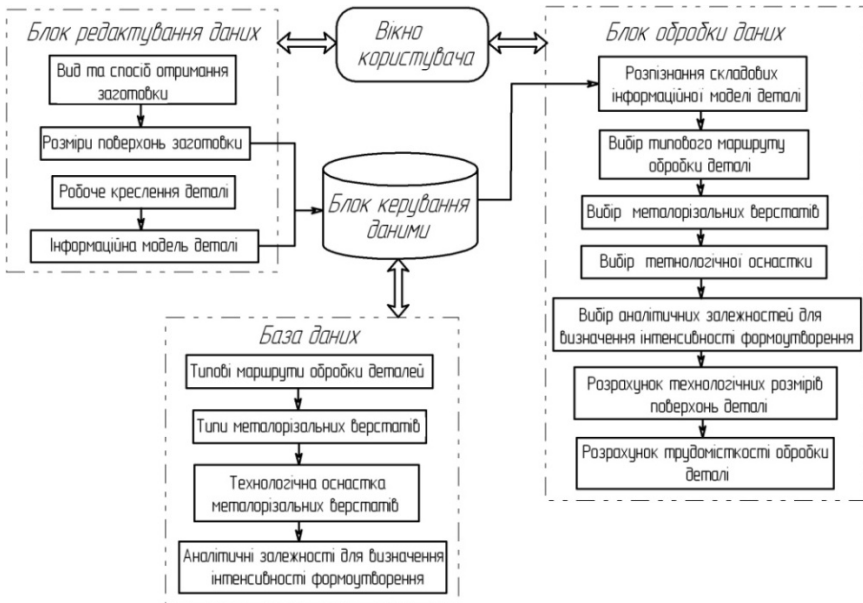


Рис. 2.29. Схема роботи системи автоматизованої оцінки трудомісткості обробки деталі

Дослідження проводилися для токарної, свердлильної, фрезерної та шліфувальної обробки поверхонь деталей типу вала та фланця, виготовлених зі сталі та чавуну.

На рис. 2.30 показані графіки залежності  $T_{шт} = f(d)$  при чорновій та чистовій токарній обробці сталюого вала, а на рис. 2.31 і 2.32 при чорновій та чистовій обробці сталюого і чавунного фланців на різних типах токарних верстатів.

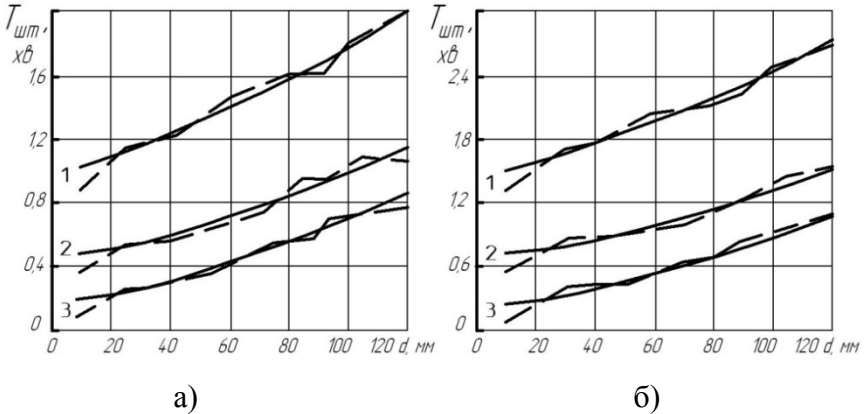


Рис. 2.30. Графіки залежності трудомісткості чорнкової (а) та чистової (б) токарної обробки сталюого вала на різних верстатах від діаметра обробки при розрахунку: за нормативами [10–11] – — ; з використанням показника нормативної інтенсивності формоутворення - - - - ; 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарний копіювально-багаторіздевий

Як бачимо, похибки розрахунку за допомогою запропонованої системи автоматизованої оцінки трудомісткості не перевищують  $\pm 15\%$ .

На рис. 2.33 показані графіки залежності  $T_{шт} = f(d)$  при свердлінні чотирьох отворів у сталюому та чавунному фланцях на різних типах верстатів.

Графіки залежності трудомісткості чорного фрезерування пазів кінцевою фрезою у сталюому та чавунному фланцях від ширини паза показані на рис. 2.34.

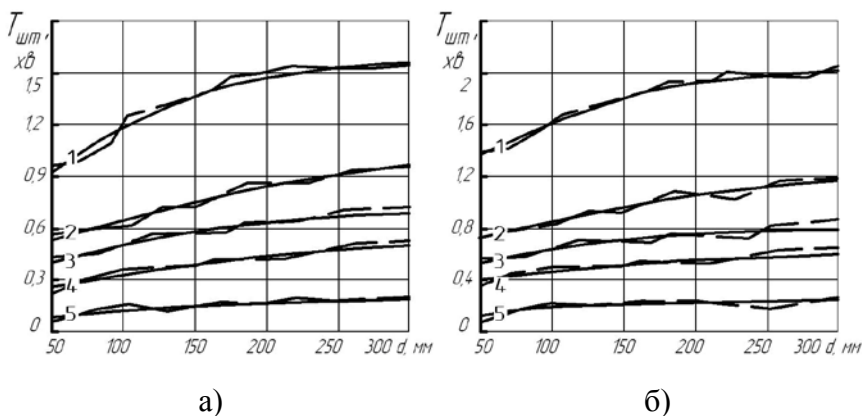


Рис. 2.31. Графіки залежності трудомісткості чорнкової (а) та чистової (б) токарної обробки сталюого фланця на різних верстатах від діаметра обробки<sup>1</sup>

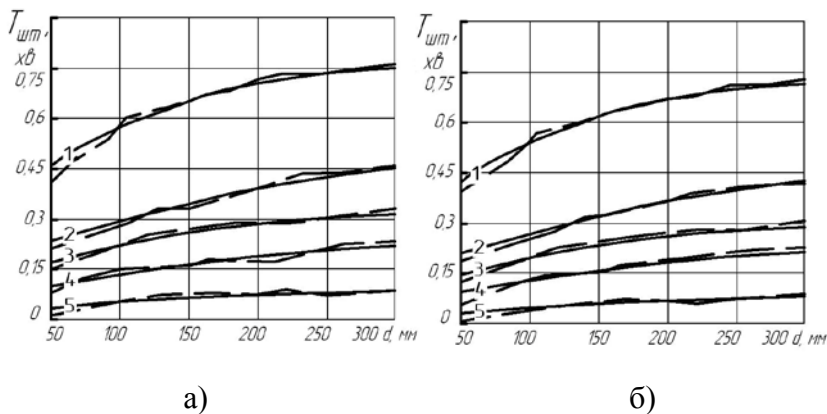


Рис. 2.32. Графіки залежності трудомісткості чорнкової (а) та чистової (б) токарної обробки чавунного фланця на різних верстатах від діаметра обробки<sup>1</sup>

<sup>1</sup> При розрахунку: за нормативами [10–11] – — ; з використанням показника нормативної інтенсивності формоутворення - - - - ; 1 – токарно-гвинторізний; 2 – токарний із ЧПК; 3 – токарно-револьверний; 4 – токарний двошпindelний із ЧПК; 5 – токарний багатшпindelний напівавтомат.

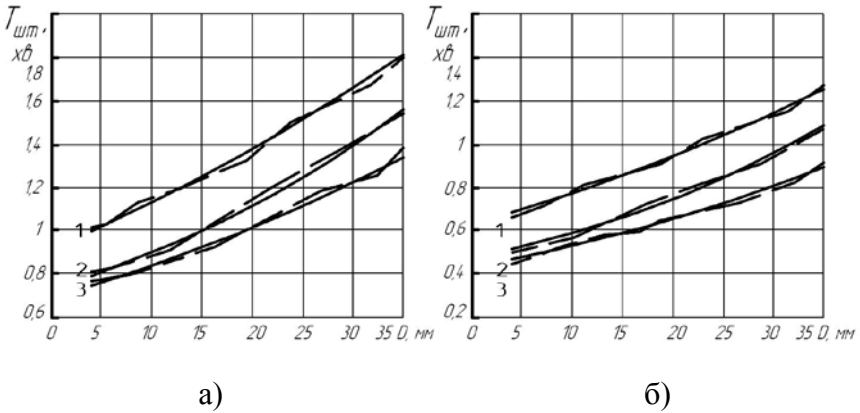


Рис. 2.33. Графіки залежності трудомісткості свердління чотирьох отворів у сталевому (а) та чавунному (б) фланцях від діаметра обробки<sup>2</sup>

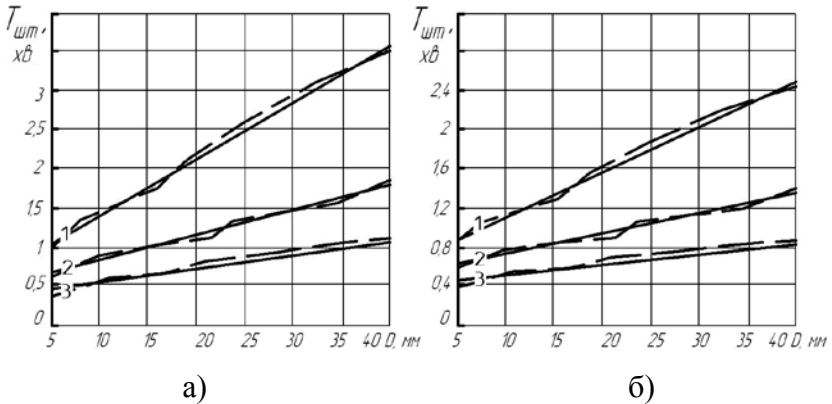


Рис. 2.34. Графіки залежності трудомісткості чорнового фрезерування пазів кінцевою фрезою у сталевому (а) та чавунному (б) фланцях від ширини паза<sup>2</sup>

<sup>2</sup> При розрахунку: за нормативами [10–11] – — ; з використанням показника нормативної інтенсивності формоутворення - - - - ; 1 – вертикально-фрезерний; 2 – свердлильно-фрезерний із ЧПК; 3 – токарний багатощаблевий

Графіки залежності  $T_{шт} = f(d)$  при шліфуванні зовнішніх та внутрішніх циліндричних поверхонь сталюого вала і фланця показані на рис. 2.35.

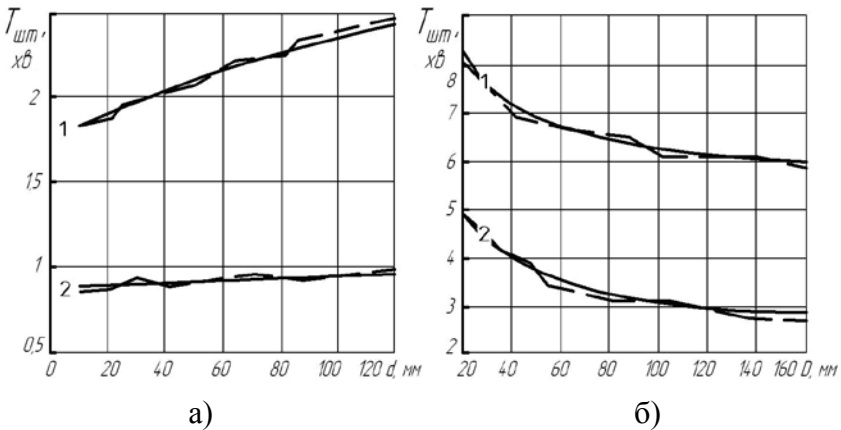


Рис. 2.35. Графіки залежності трудомісткості шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь сталюого вала (а) та внутрішніх циліндричних поверхонь сталюого фланця (б) на різних верстатах від діаметра обробки при розрахунку: за нормативами [10–11] – ———; з використанням показника нормативної інтенсивності формоутворення - - - - -; 1 – круглошліфувальний; 2 – круглошліфувальний із ЧПК

Для всіх видів обробки похибки розрахунків, отримані за допомогою запропонованої системи автоматизованої оцінки трудомісткості, не перевищують  $\pm 15\%$ . Для перевірки об'єктивності запропонованої системи автоматизованої оцінки були проведені розрахунки трудомісткості обробки типових деталей «вал» та «фланець» для випадків їх обробки на універсальних верстатах з ручним керуванням та на верстатах із ЧПК. При обробці вала на універсальних верстатах з ручним керуванням застосовувалися токарно-гвинторізний, вертикально-фрезерний та круглошліфувальний верстати, а при обробці на верстатах із ЧПК відповідно токарний, фрезерний та круглошліфувальний верстати із ЧПК.

### **3. Конструктивно-технологічні основи ефективного застосування комбінованих осьових інструментів**

#### **3.1 Аналіз конструкцій комбінованих осьових інструментів**

Комбінований осьовий інструмент (КОІ) – це різальний інструмент, призначений для суміщення технологічних переходів при обробці гладких або ступінчастих отворів, у якому поєднуються, як мінімум, два однотипних або різнотипних осьових інструменти (свердла, зенкери, розвертки, мітчики, кінцеві фрези) залежно від конструктивно-технологічних характеристик оброблюваного отвору.

За конструктивним виконанням КОІ бувають: суцільними (рис. 3.1), з напаяними пластинами (рис. 3.2), з механічним кріпленням пластин (рис. 3.3), зі вставними ножами (рис. 3.4) та збірними.

Залежно від типу інструментів, які поєднуються, КОІ може бути:

- однотипним (усі ступені однакові, наприклад, ступінчасте свердло, ступінчастий зенкер, ступінчаста розвертка, ступінчастий мітчик тощо);

- різнотипним (наприклад, свердло-зенківка, свердло-розвертка, зенкер-розвертка, свердло-розвертка-мітчик тощо).

Конструктивно-технологічні характеристики оброблюваних отворів обумовлюють принцип роботи ступенів КОІ (рис. 3.5):

- паралельний (усі ступені КОІ одночасно починають та закінчують обробку співвісних отворів);

- послідовно-паралельний (спочатку починає працювати перший ступінь, далі поступово в роботу вступають інші ступені, таким чином, що деякий час усі ступені інструмента працюють одночасно, наприклад, свердло-зенківка, свердло-зенкер, ступінчастий зенкер тощо);

- послідовний (ступені інструмента працюють по черзі таким чином, що в кожний момент часу працює лише один



ступінь, а інший вступає в роботу після закінчення роботи попереднього, наприклад, зенкер-розвертка, розвертка-мітчик тощо).

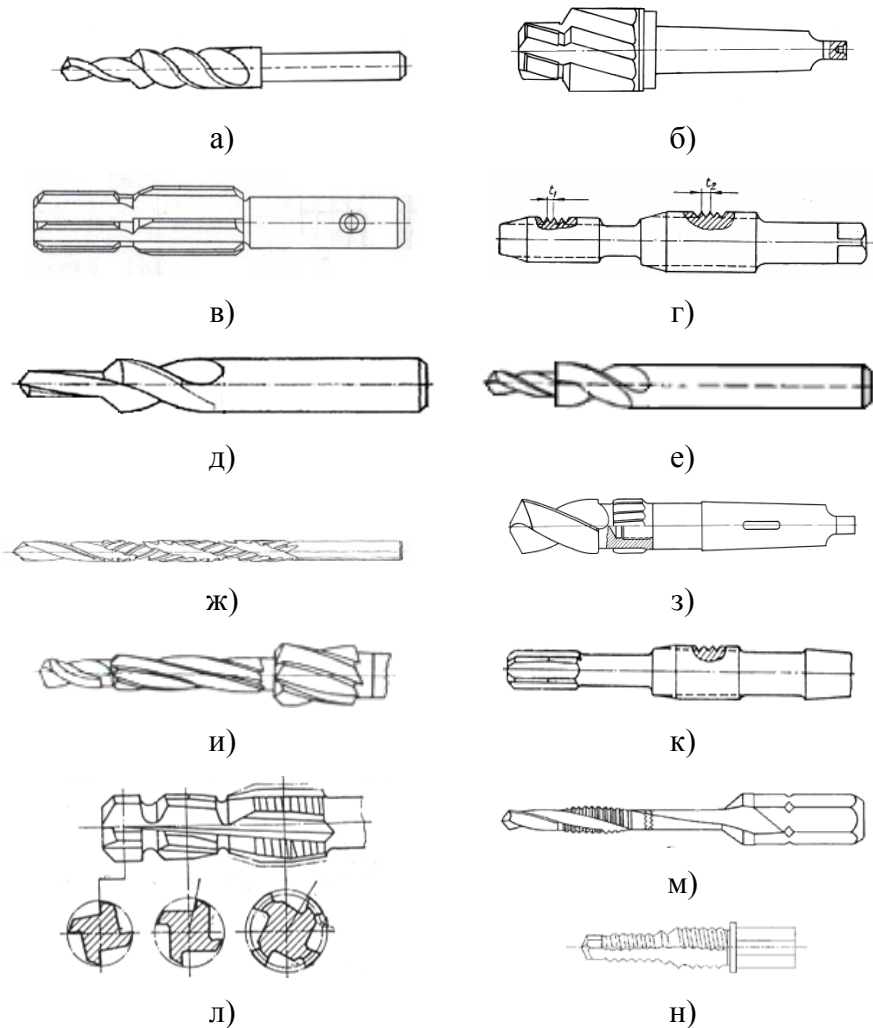


Рис. 3.1. Суцільні КОІ: а – двоступінчасте свердло; б – двоступінчастий зенкер; в – ступінчаста розвертка; г – двоступінчастий мітчик; д – свердло-зенківка; е – свердло-цеківка; ж – свердло-мітчик; з, и – свердло-розвертка; к – розвертка-мітчик

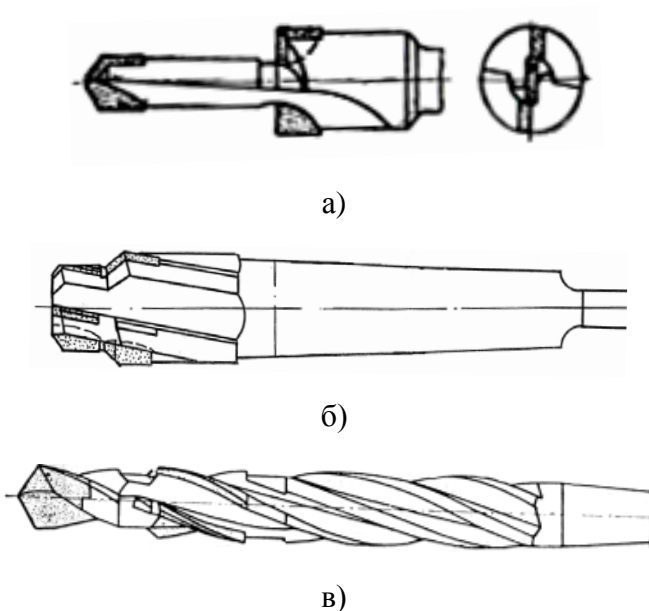


Рис. 3.2. КОІ з напаяними пластинами: а – свердло-зенкер; б – двоступінчастий зенкер; в – свердло-розвертка

КОІ, як і стандартні осьові інструменти, можуть бути виготовлені з циліндричним або конічним хвостовиком, що характеризує спосіб кріплення його на верстаті та у допоміжних інструментах.

Залежно від типу осьового інструмента, що входить до складу КОІ, він закріплюється на верстаті жорстко або у самоустановлюваному патроні.

Для поліпшення точності та якості обробки отворів на виробництві використовують додаткове спрямування осьових інструментів, яке реалізується за допомогою кондукторних втулок (для ступінчастих свердел) або додаткових конструктивних елементів.

В умовах сучасного машинобудування фірми-виробники інструмента пропонують збірний КОІ як більш економічний, ефективний та зручний в експлуатації. Далі описані деякі конструкції таких КОІ.

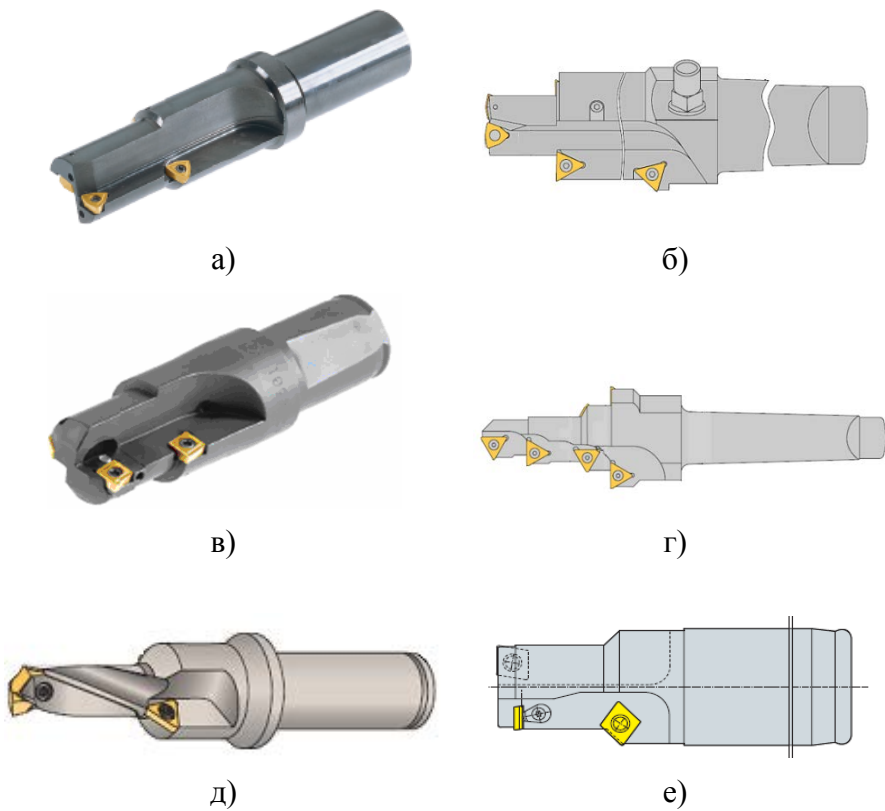


Рис. 3.3. КОІ з механічним кріпленням пластин:  
 а – двоступінчасте свердло; б – триступінчасте свердло;  
 в – двоступінчастий зенкер; г – чотириступінчастий зенкер;  
 д, е – свердло-зенківка

Конструкція збірного інструмента для обробки отворів (рис. 3.6), запатентована компанією Everede Tool Company (США) у 1982 р., складається з корпусу 1, в якому за допомогою гвинтів 2 на потрібній довжині фіксується осьовий інструмент (свердло 3 або розвертка 4). На корпус 1 гвинтами 5 у певному положенні кріпляться змінна різальна пластина 6 для обробки фаски. Таким чином, можна отримати свердло-зенківку (рис. 3.6 а) або розвертку-зенківку (рис. 3.6 б).

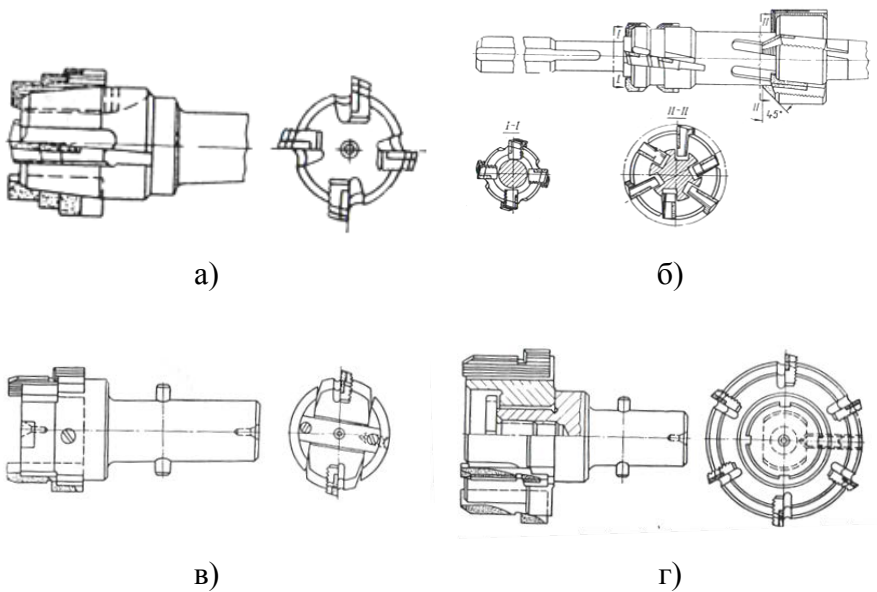


Рис. 3.4. КОІ зі вставними ножами: а – зенкер зі ступінчастими ножами; б – чотириступінчастий зенкер; в – розвертка з ножами, оснащеними плаваючими пластинами; г – розвертка з плаваючим корпусом

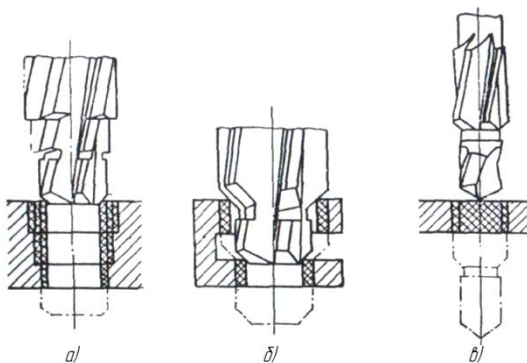


Рис. 3.5. Технологічні схеми обробки отворів КОІ: а – з послідовно-паралельною роботою ступенів; б – з паралельною роботою ступенів; в – з послідовною роботою ступенів

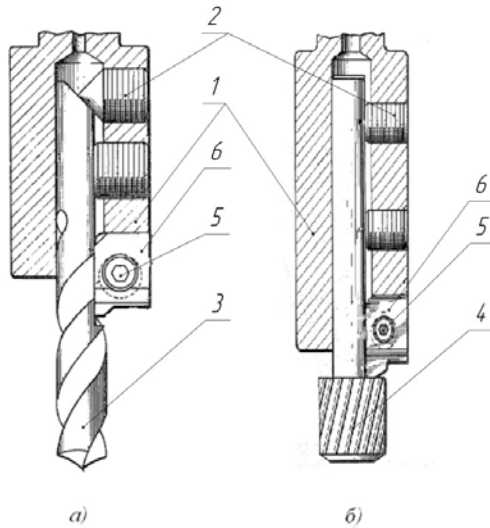


Рис. 3.6. Збірний КОІ компанії Everede Tool Company у виконанні: а – свердло-зенківка; б – розвертка-зенківка

Збірне ступінчасте свердло Карла Х. Ліндена (рис. 3.7), запатентоване в 1985 р. у США, складається з декількох окремих елементів різних діаметрів, які мають свої різальні кромки та спіральні канавки для виведення стружки із зони різання. Всі елементи, крім першого, у передній частині мають уніфікований різбовий отвір, у який загвинчується попередній елемент меншого діаметра, таким чином, щоб утворювалося ступінчасте свердло. Така конструкція збірного КОІ дозволяє скласти ступінчасте свердло з потрібною кількістю ступенів та набором діаметрів.

КОІ (рис. 3.8), який був запатентований компанією Hayes Lemmerz International у 2007 р. [12], складається із суцільного ступінчастого корпусу 1, в передню частину меншого діаметра якого встановлюється перове свердло 2, а на середню частину більшого діаметра гвинтами 3 кріпляться пластини 4. Цей інструмент призначений для свердління отвору з фаскою. Така конструкція забезпечує швидку заміну різальних кромки інструмента.

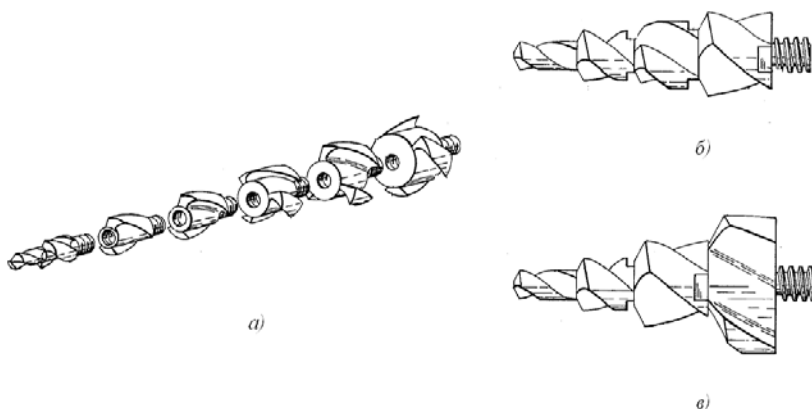


Рис. 3.7. Збірне ступінчасте свердло Карла Х. Ліндена

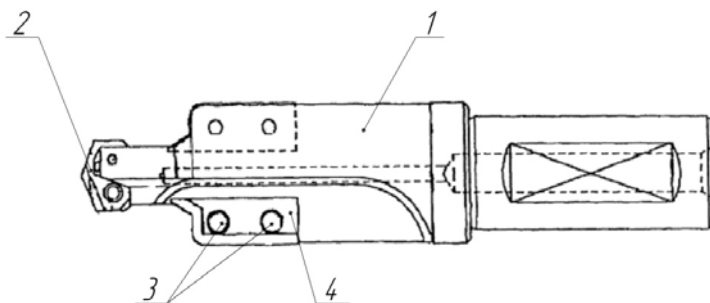


Рис. 3.8. Свердло-зенківка фірми Hayes Lemmerz International

Фірма Kennametal одержала патент США у 2006 р. на збірний КОІ свердло-зенківка (рис. 3.9), що складається зі спірального свердла 1 та закріпленої на ньому гвинтами 2 різальної насадки 3, яка має дві змінні різальні пластини 4. Між свердлом і різальною насадкою у спіральних стружкових канавках є вставка 5 для плавного спрямування стружки зі стружкової канавки спірального свердла у стружкову канавку різальної насадки. Така конструкція «свердла-зенківки» передбачає можливість налагодження довжини вильоту свердла на потрібну довжину оброблюваного отвору за рахунок пересування різальної насадки 3 уздовж осі спірального свердла 1.

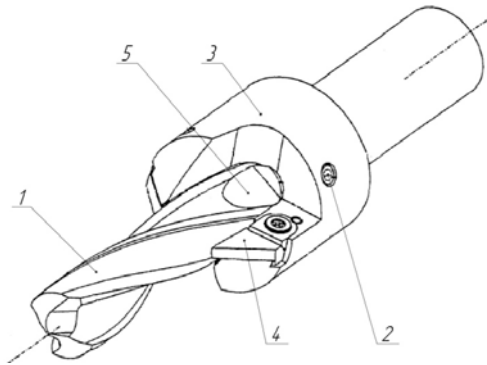


Рис. 3.9. Свердло-зенківка фірми Kennametal

Фірма Kennametal також виготовляє свердло-зенківку KenTIP BF (рис. 3.10 а). Цей інструмент складається з основного корпуса 1, всередині якого гвинтами 4 кріпиться свердло KenTIP 2. На корпусі гвинтами 5 закріплюються змінні твердосплавні пластини BF 3. Свердла KenTIP BF (рис. 3.10 б) мають твердосплавну змінну різальну частину, яка легко замінюється на нову при спрацюванні, що дозволяє скоротити час налагодження інструмента та збільшити термін його дії на 74% порівняно із суцільним твердосплавним КОІ.

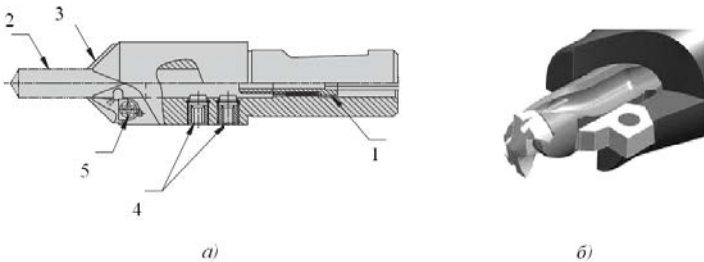


Рис. 3.10. Збірний КОІ свердло-зенківка KenTIP BF фірми Kennametal

Компанія Seco Tools (Швеція) у 2006 р. одержала патент на свою конструкцію збірного свердла-зенківки (рис. 3.11) [13]. Цей інструмент складається зі свердла 1, зенківки 2, до якої пригвинчується цанга 3. Зенківка 2 має пази, в яких гвинтами 4

кріпляться змінні пластини 5. Ці пази і пластини мають рифлення, за допомогою яких фіксується положення пластин відносно осі свердла. Така конструкція дозволяє використовувати зенківку 2 зі свердлами різних діаметрів. Осьове положення зенківки 2 відносно свердла 3 фіксується гвинтом 6.

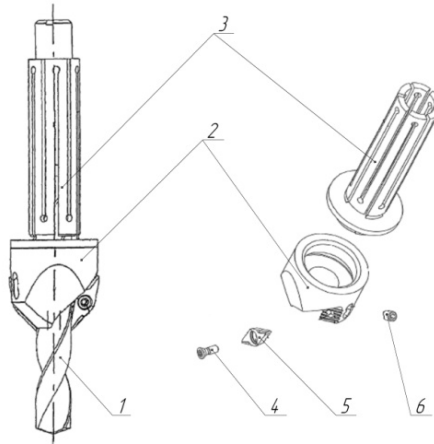


Рис. 3.11. Свердло-зенківка фірми Seco Tools

Компанія Granlund Tools AB (Швеція) пропонує збірний КОІ (рис. 3.12) [14] такої конструкції. У тримач 1 встановлюється цеківка 2, що має осьовий отвір, у якому розміщується спіральне свердло 3. Осьове положення цеківки та свердла фіксується гвинтами 4 і 5 відповідно. В середині тримача 1, збоку хвостовика є гвинт 6, який призначений для налагодження свердла на потрібну довжину обробки.

Використання КОІ для обробки отворів у машинобудуванні має такі переваги:

- підвищення продуктивності процесу обробки отворів за рахунок концентрації технологічних переходів;
- підвищення точності обробки співвісних поверхонь та отворів;
- зменшення допоміжного часу на заміну та налагодження інструмента;



– скорочення числа технологічного устаткування (зменшення кількості верстатів на поточних та автоматичних лініях, свердлильних головок у агрегатних верстатах; потрібно менше позицій в інструментальних магазинах верстатів із ЧПК, а також зменшується кількість допоміжних інструментів), що призводить до зменшення кількості працюючих, виробничої площі і, як наслідок, собівартості продукції.

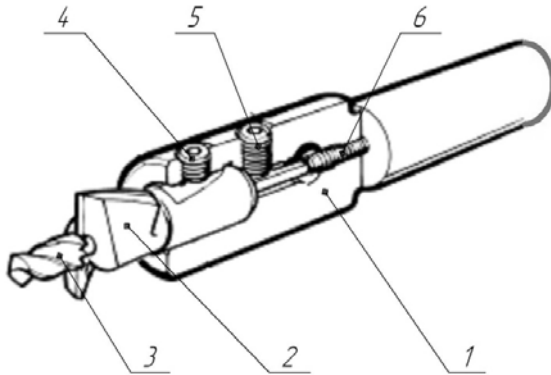


Рис. 3.12. Свердло-цеківка фірми Granlund Tools AB

Разом з тим їх використання у виробництві обмежується такими факторами:

– складність виготовлення та переточування через велику кількість різальних кромek, і відповідно більша вартість порівняно зі стандартними інструментами;

– велике число одночасно працюючих різальних кромek спричиняє концентрацію сил різання, зростання температури, що може призвести до збільшення величини розбиття отвору та прискореного спрацювання інструмента;

– збільшення обсягу матеріалу, який зрізується, що ускладнює відведення стружки і може спричинити її пакетування;

– призначення величини подачі за лімітуючим ступенем меншого діаметра призводить до неповного використання потенційних можливостей ступенів КОІ більших діаметрів.

Зменшити вплив цих недоліків можна на стадії розроблення та проектування інструмента. Так, для

забезпечення надійного відведення стружки із зони різання всіма ступенями розміри та кут нахилу стружкових канавок збільшують, а також використовують стружколоми та внутрішнє підведення ЗОР, що також зменшує температуру різання.

Для полегшення процесу експлуатації КОІ потрібно використовувати збірні інструменти з різальними кромками у вигляді тврдосплавних закріплених механічно пластин. Їх застосування виключає необхідність заточування різальних кромок, дозволяє підвищувати швидкість різання, стійкість, а також економити дорогий інструментальний матеріал та час на оновлення різальних кромок порівняно із суцільним КОІ або інструментом з напаяними пластинами.

Нами запропонована конструкція збірного комбінованого осьового інструмента (рис. 3.13), що складається зі стандартного спірального свердла 1 та різальної насадки 2, яка фіксується відносно свердла за допомогою чотирьох кріпильних елементів у вигляді гвинтів 3, що входять у стружкові канавки до упора і розташовані у двох взаємно перпендикулярних площинах. На різальну насадку гвинтами 4 кріпляться дві різцеві вставки 5 з напаяними пластинами. Можливе також використання змінних багатогранних пластин 6 для відповідного співвідношення діаметрів ступенів інструмента (рис. 3.13 в). Різальна насадка має стружкові канавки для ефективного виведення стружки обох різальних ступенів.

Регулювання глибини оброблюваного отвору здійснюється шляхом переміщення різальної насадки 2 уздовж осі спірального свердла 1. Розширення технологічних можливостей досягається використанням змінних різцевих вставок 5 з напаяними пластинами або змінних багатогранних пластин 6 потрібного профілю.

Запропонована конструкція збірного комбінованого осьового інструмента [15] розширює технологічні можливості КОІ та підвищує продуктивність і точність обробки отворів.

Як показали наші дослідження, перспективним напрямком підвищення ефективності КОІ та зменшення їх

впливу на зростання собівартості продукції є впровадження модульних конструкцій КОІ, що складаються з окремих модулів, які входять до комплекту уніфікованих елементів. Це дозволяє максимально використовувати ресурси кожного з елементів, що входять до складу даного КОІ.

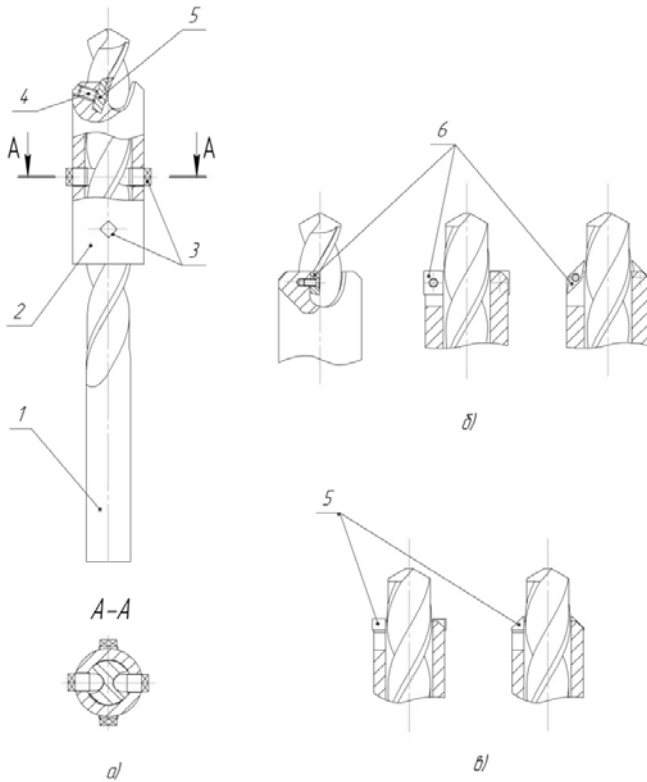


Рис. 3.13. Збірний комбінований осьовий інструмент:  
 а – загальний вигляд; б – виконання зі змінними різцевими вставками профілю та напаяними пластинами; в – виконання зі змінними багатограними пластинами

Модульний КОІ – це комплект уніфікованих різальних та допоміжних елементів різного технологічного призначення. з яких за допомогою складальних операцій комплектується КОІ відповідно до технологічного завдання, що вирішується.

Приклад такої системи модульного КОІ показаний на рис. 3.14 [16]. Ця система складається з осьових (свердло 1, зенкер 2 або розвертка 3) та кільцевих (свердло 4, зенкер 5 або розвертка 6) інструментів, поєднаних різьбовим з'єднанням, а також перехідної втулки 7, функціональне призначення якої полягає у закріпленні зібраного КОІ у патроні.

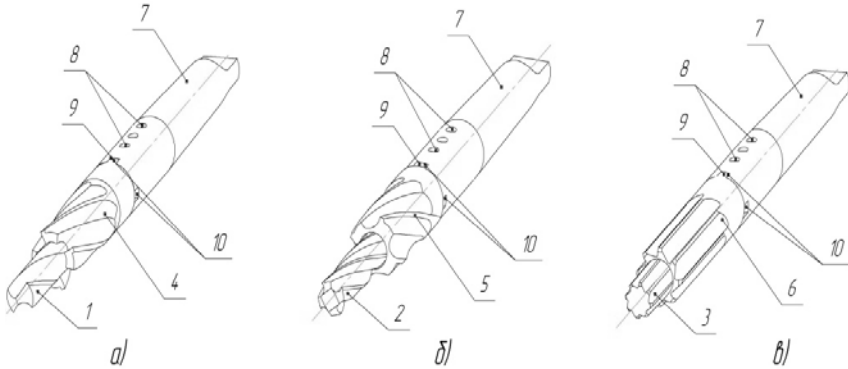


Рис. 3.14. Система модульного КОІ: а – двоступінчасте свердло; б – двоступінчастий зенкер; в – двоступінчаста розвертка

Інструменти, зібрані з такого комплекту модульного КОІ, призначені для обробки двоступінчастих отворів з мінімальним діаметром першого ступеня 8 мм, а другого – 16 мм.

Складання конструкції КОІ у виконанні, наприклад, двоступінчастого свердла (рис. 3.14 а) здійснюється таким чином: поєднані між собою за допомогою різьбового з'єднання свердло 1 та кільцеве свердло 2 встановлюються хвостовою частиною свердла 1 в отвір перехідної втулки 7 та фіксуються гвинтами 8. Перехідна втулка 7 має чотири пази 10 для фіксації положення кільцевого свердла 4.

Для переточування такого модульного КОІ конструкцію розбирають і заточують різальні кромки кожного елемента як відповідного йому стандартного інструмента.

Аналіз конструктивно-технологічної та патентної інформації, а також досвіду виробничного використання дозволив розробити класифікацію КОІ (рис. 3.15).

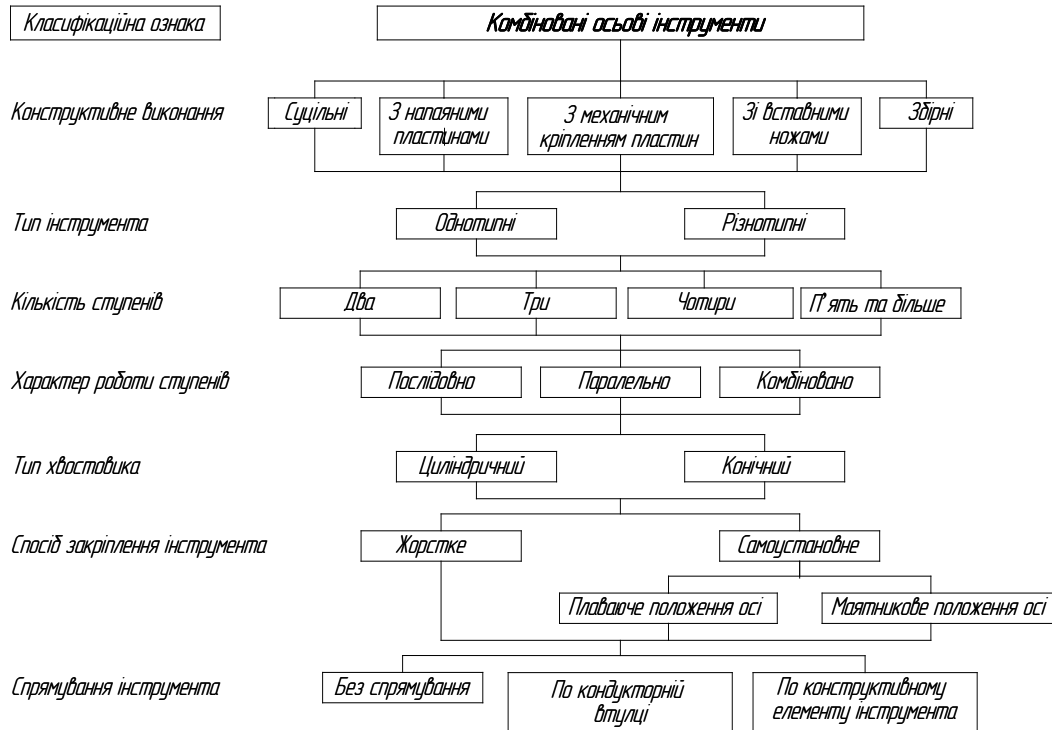


Рис. 3.15. Класифікація комбінованого осьового інструмента

Підвищення ефективності використання КОІ на металорізальних верстатах можливе шляхом вибору найвигідніших режимів різання з урахуванням конструктивно-технологічних характеристик оброблюваного отвору та величини виробничої партії, а також розширення технологічних можливостей цих інструментів, за умови забезпечення високої точності обробки.

### 3.2. Точність обробки двоступінчастими свердлами

При обробці отворів КОІ виникає концентрація сил різання та невірноважність їх радіальних складових, а також підвищення температури в зоні різання, що спричиняє виникнення похибок (розбиття отворів, поведіння осі, збільшення шорсткості), для зменшення яких на виробництві застосовують попереднє центрування отворів (на верстатах із ЧПК) або додаткове спрямування по кондукторній втулці (КВ), наприклад, на агрегатних та інших спеціальних верстатах.

Без спрямування двоступінчастого свердла зміщення його осі  $\Delta P$  під дією невірноваженої складової радіальної сили  $\Delta P_y$  визначається за формулою (рис. 3.16) [17]:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_y \cdot L_1^3}{3EJ_1} + \frac{\Delta P_y \cdot L_1 \cdot [(L_1 + L_2)^2 + L_1^2 + L_1 \cdot (L_1 + L_2)]}{3EJ_2},$$

де  $L_1$ ,  $L_2$  – довжина першого та другого ступенів двоступінчастого свердла відповідно, м;

$E$  – модуль пружності, Па;

$J_1$ ,  $J_2$  – моменти інерції першого та другого ступенів КОІ відповідно, м<sup>4</sup>.

Нами було проаналізовано зміщення осі двоступінчастих свердел діаметром першого ступеня  $d_1 = 10$  мм і загальною довжиною робочої частини  $L_p = 150$  мм, а діаметри другого ступеня  $d_2$  змінювалися в діапазоні 11–20 мм через 1 мм, змінювалася також довжина першого ступеня  $L_1$  у діапазоні 10–100 мм через 10 мм.

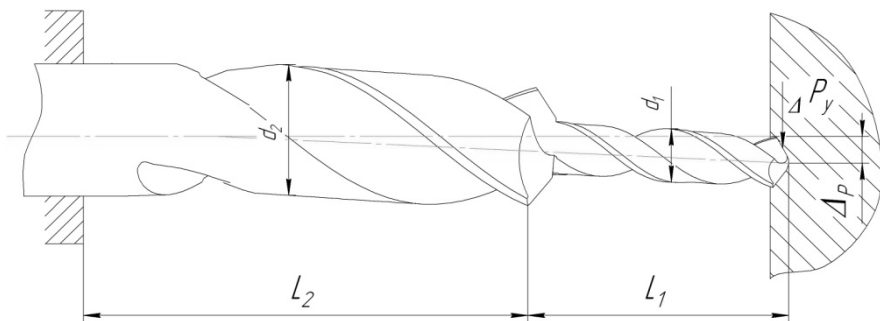


Рис. 3.16. Схема для розрахунку зміщення осі  $\Delta_p$  двоступінчастого свердла

На рис. 3.17 показано залежність величини зміщення осі  $\Delta_p$  цих інструментів під дією неврівноваженої радіальної сили  $\Delta P_y$  без спрямування по КВ від довжини першого ступеня інструмента при різних співвідношеннях діаметрів  $d_2/d_1$ .

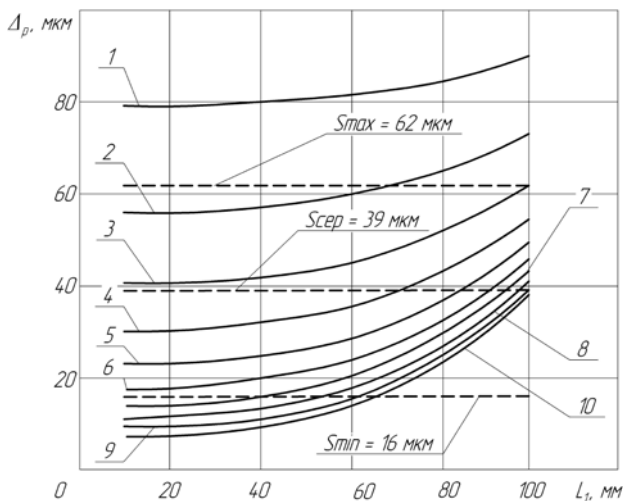


Рис. 3.17. Зміщення осі двоступінчастого свердла без спрямування по КВ: 1 –  $d_2/d_1 = 11/10$ ; 2 –  $d_2/d_1 = 12/10$ ; 3 –  $d_2/d_1 = 13/10$ ; 4 –  $d_2/d_1 = 14/10$ ; 5 –  $d_2/d_1 = 15/10$ ; 6 –  $d_2/d_1 = 16/10$ ; 7 –  $d_2/d_1 = 17/10$ ; 8 –  $d_2/d_1 = 18/10$ ; 9 –  $d_2/d_1 = 19/10$ ; 10 –  $d_2/d_1 = 20/10$

Величини  $S_{\max}$ ,  $S_{\text{сєр}}$ ,  $S_{\min}$  – максимальний, середній та мінімальний зазори, які визначаються посадкою спряження КВ та інструмента відповідно [18].

З рис. 3.17 бачимо, що КВ доцільно застосовувати у випадках, коли величина зміщення осі  $\Delta_p$  під дією неврівноваженої радіальної сили  $\Delta P_y$  більша, ніж величина зазору  $S_0$  між інструментом та КВ, наприклад, застосовуючи КВ із зазором  $S_{\min}$  для двоступінчастих свердел з діаметрами ступенів  $d_2/d_1 = 11/10; 12/10; 13/10; 14/10; 15/10$  та  $16/10$  мм, можна зменшити величину зміщення осі КОІ при будь-яких значеннях  $L_1$ , а для свердел  $d_2/d_1 = 17/10; 18/10; 19/10$  та  $20/10$  мм при  $L_1$  більше 40; 55; 60; 65 мм відповідно.

При спрямуванні двоступінчастого свердла по КВ сумарну величину зміщення осі  $\Delta_o$  знаходимо за формулою

$$\Delta_o = \Delta_p + \Delta_s,$$

де  $\Delta_s$  – зміщення осі, що виникає внаслідок наявності зазору  $S_0$  між інструментом та КВ, мм.

Найбільше значення  $\Delta_s$  знаходимо з рис. 3.18:

$$\Delta_s = \frac{S_o \cdot (L_5 + L_6)}{(L_3 + L_4 - L_5)},$$

де  $L_3$  – відстань від торця кондукторної втулки до оброблюваної деталі, мм;

$L_4$  – довжина кондукторної втулки, мм;

$L_5$  – відстань між точкою контакту КОІ та КВ і торцем оброблюваної деталі, мм;

$L_6$  – відстань між точкою контакту КОІ та КВ і центром повороту осі інструмента (точка О), мм.

Оскільки відрізок СА дорівнює відрітку ДВ, як радіуси отвору КВ, кут  $\text{OCA} = \text{ODB} = 90^\circ$ , а також кути  $\text{CAO} = \text{DBO}$  (як внутрішні перехресні кути при  $\text{CA} \parallel \text{ДВ}$ ), то трикутник СОА дорівнює трикутнику ДОВ. Отже,  $\text{CO} = \text{DO}$  (рис. 3.18 б).



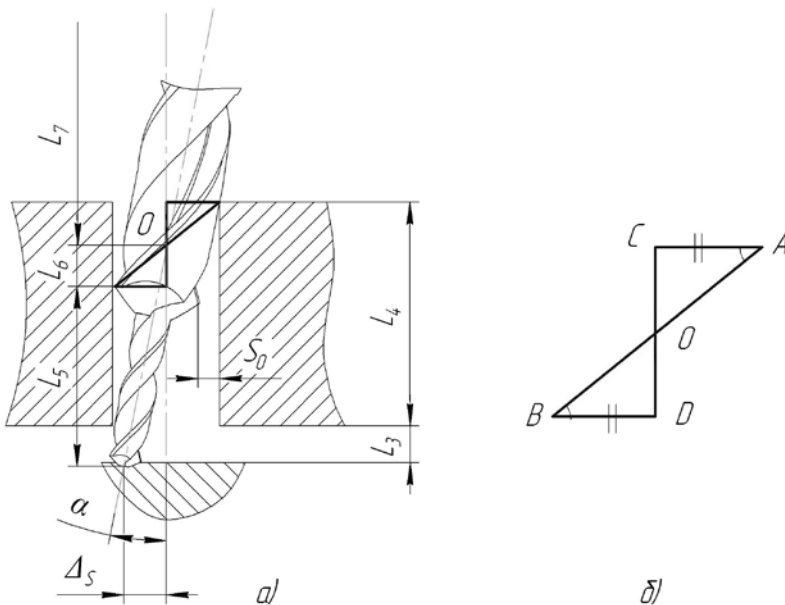


Рис. 3.18. Схема спрямування двоступінчастого свердла по КВ для визначення величини зміщення осі  $\Delta_o$

Таким чином, відстань  $L_6$  можна знайти за формулою

$$L_6 = \frac{L_3 + L_4 - L_5}{2}.$$

Відповідно

$$\Delta_S = \frac{S_o \cdot (L_3 + L_5 + L_6)}{2 \cdot (L_3 + L_4 - L_5)}.$$

Пружні переміщення осі  $\Delta_p$  під дією невірноваженої радіальної сили інструмента, спрямованого по КВ, розраховуються за формулою [17]:

$$\Delta_p = \frac{\Delta P_y \cdot L_5^3}{3EJ_1} + \frac{\Delta P_y \cdot L_5^2 \cdot L_7}{4EJ_2},$$

де  $L_7$  – відстань від торця шпинделя до точки опори на КВ ступеня КОІ більшого діаметра, м.

Пружні переміщення осі  $\Delta_s$ , що виникають унаслідок наявності зазору  $S_0$  між інструментом та КВ, зменшуються зі збільшенням довжини КВ і зростають при збільшенні довжини першого ступеня (рис. 3.19).

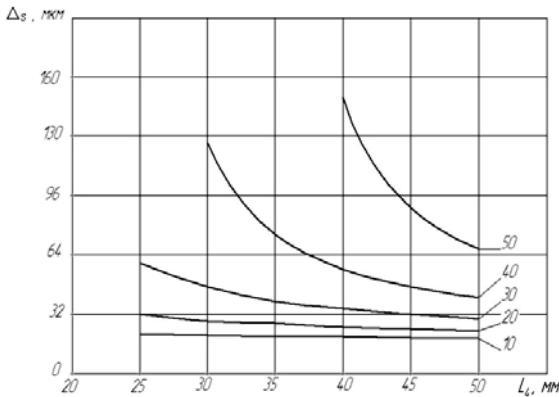


Рис. 3.19. Вплив довжини КВ на зміщення осі  $\Delta_s$  двоступінчастого свердла при довжині першого ступеня  $L_5 = 10, 20, 30, 40, 50$  мм

Зі збільшенням довжини першого ступеня двоступінчастого свердла при сталій довжині КВ зменшується довжина контакту КВ з поверхнею другого ступеня інструмента, а це призводить до зростання величини зміщення осі  $\Delta_s$ . Тому чим більша довжина першого ступеня, тим довшою повинна бути КВ для забезпечення необхідної точності обробки.

Розрахунки показали, що при обробці двоступінчастими свердлами з діаметрами ступенів  $d_2/d_1 = 11/10$  та загальною довжиною робочої частини  $L_p = 150$  мм доцільно використовувати КВ для додаткового спрямування КОІ з довжиною першого ступеня  $L_1 \leq 32$  мм (із зазором між свердлом та КВ  $S_{cp} = 39$  мкм) та  $L_1 \leq 47$  мм ( $S_{min} = 16$  мкм), а для

надійного спрямування КОІ діаметрами  $d_2/d_1 = 15/10$  мм довжина першого ступеня не повинна перевищувати 22 мм.

Таким чином, застосовуючи КВ для спрямування двоступінчастих свердел, можна суттєво зменшити пружні переміщення осі  $\Delta_o$  залежно від геометричних параметрів інструмента, КВ та їх взаємного розташування і відстані між торцем КВ і заготовкою.

### **3.3. Визначення режимів різання комбінованими осьовими інструментами**

Використання КОІ дозволяє підвищити продуктивність обробки отворів за рахунок концентрації технологічних переходів. Величина підвищення продуктивності залежить від того, за яким принципом працюють ступені КОІ: паралельно, послідовно чи послідовно-паралельно. У працях проф. М. В. Жарлікова, проф. І. О. Малишко [19] та ін. зазначено, що паралельно працюють, як правило, однотипні КОІ при обробці співвісних поверхонь (наприклад, ступінчасті зенкери, ступінчасті розвертки та ін.); послідовно працюють ступені різнотипних КОІ, режимами різання яких суттєво відрізняються (наприклад, свердло-зенкер, зенкер-розвертка, зенкер-розвертка-зенківка, свердло-мітчик тощо); послідовно-паралельний принцип роботи характерний для таких КОІ, як зенкер-зенкер-зенківка при обробці двоступінчастого отвору з фаскою (в цьому випадку зенкери працюють паралельно, а зенківка послідовно), свердло-зенкер також може працювати послідовно-паралельно.

Найбільша продуктивність досягається при обробці отворів КОІ за паралельною схемою роботи ступенів унаслідок скорочення як допоміжного часу на заміну та налагодження інструмента, швидких переміщень, так і основного часу пропорційно кількості його ступенів.

При паралельній роботі всі ступені КОІ працюють з однаковими режимами різання, які призначаються таким чином:

– лімітуючим ступенем для вибору подачі беруть ступінь найменшого діаметра;

– лімітуючим ступенем для вибору швидкості різання вважається ступінь із найбільшим діаметром.

Відомо, що зі збільшенням діаметра осьового інструмента зростає величина подачі та зменшується швидкість різання, тому існуючі рекомендації щодо призначення режимів різання для КОІ призводять до того, що нелімітуючі ступені таких інструментів працюють за заниженими режимами різання і недовикористовуються.

Проаналізуємо втрати за інтенсивністю режимів різання ступенями двоступінчастих КОІ.

Обробка ступінчастого отвору двоступінчастим КОІ з діаметром першого ступеня  $d_1$  та діаметром другого ступеня  $d_2$  дозволяє замінити послідовну обробку двома стандартними осьовими інструментами з такими самими діаметрами (рис. 3.20). Стандартний інструмент діаметром  $d_1$  обробляє отвір з подачею  $S_{o1}$ , швидкістю  $V_1$  та частотою обертання  $n_1$ , інструмент діаметром  $d_2$  –  $S_{o2}$ ,  $V_2$ ,  $n_2$ .

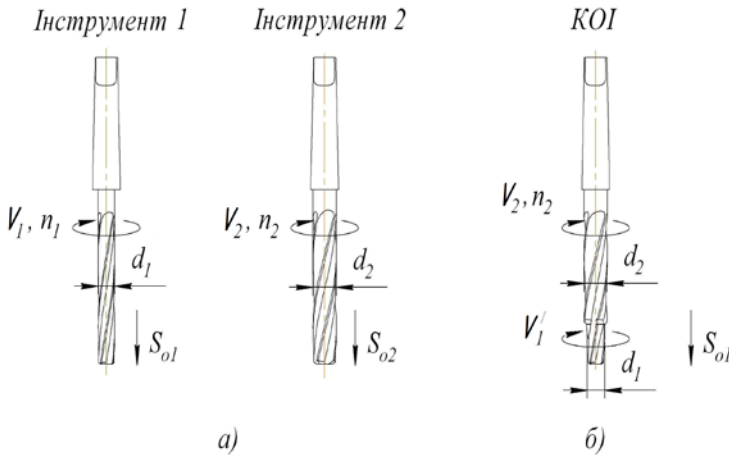


Рис. 3.20. Схеми режимів різання:  
а – стандартними інструментами; б – КОІ

Двоступінчастим КОІ з паралельним принципом роботи ступенів та діаметром першого ступеня  $d_1$ , а другого –  $d_2$  виконують обробку з подачею  $S_{o1}$ , швидкістю різання другим ступенем  $V_2$  та частотою обертання  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{1000 \cdot V_2}{\pi \cdot d_2},$$

де  $V_2$  – швидкість різання для другого ступеня двоступінчастого КОІ.

Швидкість різання першим ступенем КОІ

$$V_1' = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_2}{1000}.$$

Таким чином, другий ступінь КОІ діаметром  $d_2$ , працюючи з подачею  $S_{o1}$ , недовикористовується з подачі порівняно зі стандартним осьовим інструментом діаметром  $d_2$ .

У свою чергу, перший ступінь КОІ діаметром  $d_1$  має недовикористання зі швидкості різання порівняно зі швидкістю стандартного осьового інструмента того самого діаметра.

Нами проаналізовані ці втрати для нелімітуючих ступенів за режимами різання двоступінчастими КОІ за допомогою коефіцієнтів  $K_S$  (рис. 3.21 а) і  $K_V$  (рис. 3.21 б):

$$K_S = \frac{S_{o2}}{S_{o1}}; K_V = \frac{V_1}{V_1'}.$$

Режими різання розраховувалися з використанням математичних моделей для інструмента зі швидкорізальної сталі при обробці двоступінчастих отворів у сталевих заготовках.

Розрахунки показали, що зростання співвідношення діаметрів ступенів КОІ  $d_2/d_1$  впливає на коефіцієнт недовикористання нелімітуючих ступенів КОІ таким чином: втрати можливостей другого ступеня з подачі зростають до 1,5

раза, а втрати першого ступеня зі швидкості різання – до 3,5 раза.

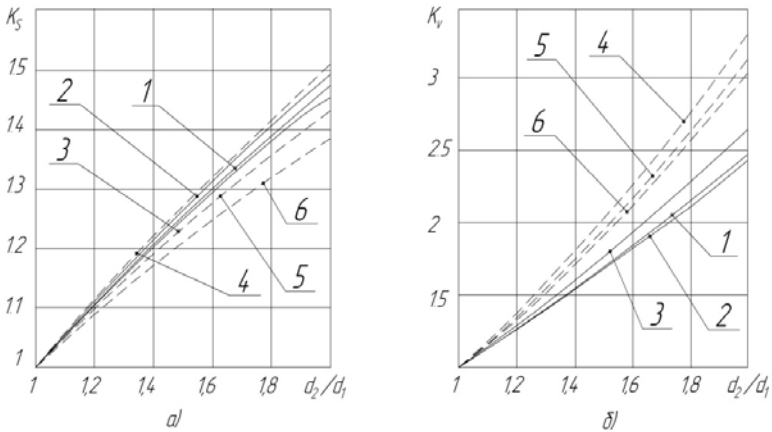


Рис. 3.21. Коефіцієнт недовикористання нелімітуючих ступенів КОІ за режимами різання порівняно зі стандартним інструментом того самого діаметра: а – з подачі; б – зі швидкості різання; 1, 2, 3 – зенкерування чистове, напівчистове, чорнове відповідно; 4, 5, 6 – розвертання чистове, напівчистове, чорнове відповідно

При послідовній роботі ступенів КОІ ефективність його використання збільшується, якщо кожний ступінь працює з режимами різання, які відповідають режимам різання стандартного інструмента того самого діаметра, тобто величини подачі, швидкості та частоти обертання змінюються при переході КОІ на роботу іншим ступенем. Однак цей спосіб вимагає наявності у верстатів можливості зміни режимів різання в процесі обробки.

Отже, актуальним завданням вибору таких параметрів режиму різання КОІ, які мінімізують недовикористання потенційних технологічних можливостей нелімітуючих ступенів.

Тому доцільно призначати режими різання для КОІ з урахуванням співвідношення діаметрів та довжин ступенів інструмента, які визначають його жорсткість.

Середньозважений діаметр  $d_{c3}$  як характеристика жорсткості визначається за формулою

$$d_{c3} = \left( \sum_{i=1}^m d_i \right) / \sum_{i=1}^m L_i,$$

де  $d_i$ ,  $L_i$  – діаметр та довжина  $i$ -го ступеня КОІ відповідно, мм;  
 $m$  – число ступенів КОІ.

Виконаємо вибір подачі для двоступінчастих свердел діаметрами ступенів  $d_1/d_2 = 5/10$  мм,  $d_1/d_2 = 10/20$  мм та  $d_1/d_2 = 15/30$  мм, виготовлених зі швидкорізальної сталі Р6М5, при свердлінні заготовки зі сталі 45.

Розбиття отвору  $\Delta D$  при свердлінні виникає внаслідок биття різальних кромки інструмента після установки інструментальних блоків у шпиндель верстата, а також внаслідок пружних переміщень осі  $\Delta_p$  інструмента під дією незрівноваженої складової радіальної сили різання  $\Delta P_y$ .

Величина биття різальних кромки інструмента після установки інструментального блока у шпиндель верстата залежить від биття конусів шпинделя та інструментального тримача, а також биття різальних кромки інструмента відносно осі його хвостовика, і не повинна перевищувати допустиме значення (56 мкм для свердел діаметром від 6 до 18 мм).

Незрівноважену складову радіальної сили різання  $\Delta P_y$  знаходимо за формулою [16]:

$$\Delta P_y = \frac{0,5 \cdot P_o}{1,03 \cdot \frac{K_{\gamma 1}}{K_{\gamma 2}} + 1} \cdot \left( 0,6249 - 0,5947 \cdot \frac{K_{\gamma 1}}{K_{\gamma 2}} \right),$$

де  $P_o$  – осьова сила різання, Н;

$K_{\gamma 1}$ ,  $K_{\gamma 2}$  – коефіцієнти, що враховують вплив передніх кутів різальних кромки свердла на осьову силу.

Під дією  $\Delta P_y$  відбуваються пружні переміщення  $\Delta_p$  осі КОІ. Допустиму величину пружних переміщень  $[\Delta_p]$  осі КОІ визначимо як половину різниці між допуском на оброблюваний отвір та допустимим биттям різальних кромки інструмента після установки інструментального блока у шпindelь верстата.

У табл. 3.1 наведені вихідні дані та результати розрахунків незрівноваженої радіальної сили різання  $\Delta P_y$ , що діє на перший ступінь, та величини пружних переміщень  $\Delta_p$  осі двоступінчастого свердла. У розрахунках використовувалися величини подач КОІ, які призначалися за діаметром першого ступеня  $S_{d1}$ , за діаметром другого ступеня  $S_{d2}$  та за середньозваженим діаметром  $S_{dc3}$  за нормативами.

Розрахунки показали (рис. 3.22), що при співвідношенні діаметрів  $d_2/d_1 = 2$  та довжин  $L_2/L_1 \geq 1$  ступенів КОІ величина пружних переміщень осі  $\Delta_p$  двоступінчастих свердл значно менша за допустиму.

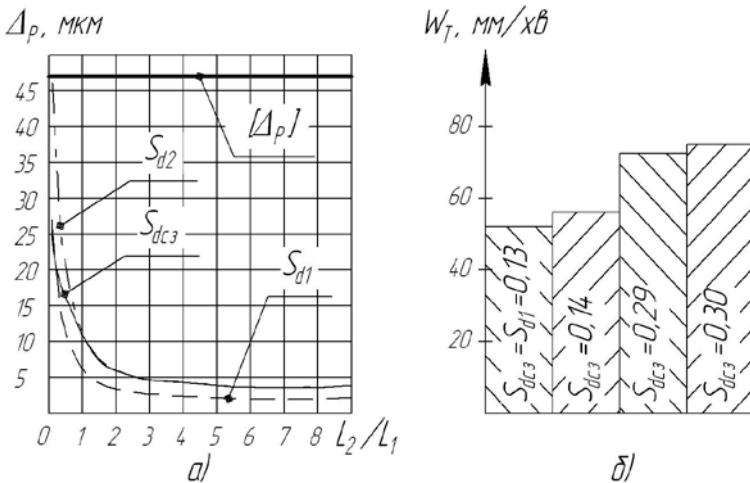


Рис. 3.22. Вплив величини подачі двоступінчастого свердла з діаметрами ступенів  $d_1/d_2 = 10/20$  мм на:  
 а – пружні переміщення  $\Delta_p$  осі;  
 б – технологічну інтенсивність формоутворення



Таблиця 3.1

Результати розрахунків незрівноваженої радіальної сили різання та пружні переміщення осі двоступінчастого свердла

№ KOI	Параметри KOI, мм					Подача, мм/об			Незрівноважена радіальна сила $\Delta P_y$ , Н			Зміщення осі $\Delta p$ , мкм				
	$d_1$	$d_2$	$L_1$	$L_2$	$d_{c3}$	$S_{d1}$	$S_{d2}$	$S_{dc3}$	$S_{d1}$	$S_{d2}$	$S_{dc3}$	$S_{d1}$	$S_{d2}$	$S_{dc3}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	5	10	5	45	9,5	0,07	0,18	0,14	2,74	5,30	4,45	1,41	2,74	2,74		
2			10	40	9							0,18	5,30	1,56	3,02	3,02
3			15	35	8,5							0,14	4,45	1,96	3,79	3,18
4			20	30	8							4,45	2,73	5,29	4,44	
5			25	25	7,5							4,00	7,76	6,51		
6			30	20	7							5,90	11,44	9,60		
7			35	15	6,5							8,56	16,58	13,91		
8			40	10	6							12,09	23,42	12,09		
9			45	5	5,5							0,07	2,74	16,63	33,20	16,63
10	10	20	10	90	19	0,13	0,3	0,3	8,45	15,2	15,2	2,18	3,91	3,91		
11			20	80	18							2,41	4,32	4,32		
12			30	70	17							3,12	5,42	5,42		

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13	10	20	40	60	16	0,13	0,3	0,29	8,45	15,2	14,8	4,21	7,56	7,38
14			50	50	15							6,14	11,09	10,83
15			60	40	14							9,11	16,36	15,97
16			70	30	13			13,20			23,71	23,15		
17			80	20	12			8,9			18,65	33,48	19,64	
18			90	10	11						25,64	46,05	27,01	
19	15	30	15	135	28,5	0,2	0,35	0,35	17,13	25,34	25,34	2,95	4,36	4,36
20			30	120	27							3,25	4,81	4,81
21			45	105	25,5							4,08	6,04	6,04
22			60	90	24			5,69			8,42	8,42		
23			75	75	22,5			23,80			8,35	12,4	11,6	
24			90	60	21						12,30	18,2	17,1	
25			105	45	19,5			22,75			17,8	26,4	23,7	
26			120	30	18			17,13			25,2	37,3	25,2	
27			135	15	16,5						34,7	51,3	34,7	

Це пояснюється більшою жорсткістю такого КОІ порівняно зі стандартним осьовим інструментом, і, враховуючи те, що при цих геометричних характеристиках КОІ величина  $d_{cz}$  наближається до  $d_2$ , можна призначати величину подачі за  $d_2$ .

При співвідношенні  $L_2/L_1 \leq 1$  спостерігається різке збільшення величини  $\Delta_p$  внаслідок наближення величини жорсткості КОІ до жорсткості стандартного осьового інструмента діаметром  $d_1$ , тому подачу потривно обирати за середньозваженим діаметром  $d_{cz}$ .

Швидкість різання при свердлінні двоступінчастими свердлами з урахуванням середньозваженого діаметра визначається за формулою [20]:

$$V = \frac{C_V \cdot d_2^q}{T^m \cdot S_{dcz}^y} \cdot K_V,$$

де  $C_V$  – сталий коефіцієнт, що враховує умови обробки;

$T$  – стійкість інструмента, хв;

$S_{dcz}$  – подача КОІ, призначена за середньозваженим діаметром, мм/об.;

$q, m, y$  – показники степеня;

$K_V$  – узагальнений поправковий коефіцієнт на швидкість різання, що враховує фактичні умови обробки.

Для оцінювання технологічної продуктивності запропонованого підходу до призначення режимів різання розрахуємо технологічну інтенсивність формоутворення  $W_T$  (табл. 3.2):

$$W_T = n \cdot S,$$

де  $S, n$  – подача та частота обертання інструмента відповідно.

З табл. 3.2 бачимо, що зі збільшенням величини подачі при обробці двоступінчастим КОІ технологічна інтенсивність формоутворення підвищується, незважаючи на відповідне зменшення величини швидкості різання, тобто для підвищення

продуктивності вигідно збільшувати подачу з урахуванням дотримання вимог до якості та точності оброблюваного отвору.

Таблиця 3.2  
Технологічна інтенсивність формоутворення КОІ

Параметри КОІ $d_1/d_2$ , мм	Подача $S$ , мм/об.	Швидкість різання $V$ , об./хв	Технологічна інтенсивність формоутворення $W_T$ , мм/хв
5/10	0,07	31,71	70
	0,14	19,79	88,2
	0,18	15,71	90
10/20	0,13	25,13	52
	0,14	25,13	56
	0,29	15,71	72,5
	0,30	15,71	75
15/30	0,20	23,56	50
	0,30	18,85	60
	0,32	18,85	64
	0,35	18,85	70

Також обираючи подачу за величиною середньозваженого діаметра  $d_{сз}$ , потрібно враховувати такі технічні обмеження:

а) за міцністю інструмента  $\tau_c \leq \frac{\sigma_\epsilon}{K_{зм}}$ ,

де  $\tau_c$  – сумарне напруження, яке дорівнює сумі нормального напруження від осьової сили  $P_o$  та дотичного напруження від крутного моменту  $M_{кр}$ , Па;

$K_{зм}$  – коефіцієнт запасу міцності ( $K_{зм} = 1,5 - 2$ );

$\sigma_\epsilon$  – межа міцності при розтягуванні, Па.

Сумарне напруження знаходимо за формулою

$$\tau_c = \frac{1,73 \cdot M_{кр}}{W},$$

де  $W$  – момент опору першого ступеня КОІ, м<sup>3</sup>:

$$W = 0,02 \cdot d^3,$$

де  $d$  – діаметр першого ступеня КОІ, м.

Для двоступінчастого свердла з діаметром ступенів  $d_1/d_2 = 10/20$  мм умова міцності робочої частини виконується:  $1020 \text{ МПа} \leq 1390 \text{ МПа}$ .

б) за жорсткістю інструмента  $P_o \leq [P_o]$ ,

де  $[P_o]$  – допустима осьова сила, яка визначається за формулою

$$[P_o] = \frac{K_y \cdot E \cdot J}{L^2},$$

де  $K_y$  – коефіцієнт усталеності, ( $K_y \approx 2,46$ );

$E$  – модуль пружності свердла, Па;

$L$  – довжина вильоту свердла, м;

$J$  – момент інерції першого ступеня КОІ, м<sup>4</sup>.

Для двоступінчастого свердла з діаметром ступенів  $d_1/d_2 = 10/20$  мм умова жорсткості КОІ також виконується:  $3498 \text{ Н} \leq 20147 \text{ Н}$ .

Таким чином, призначення режимів різання двоступінчастими свердлами за величиною середньозваженого діаметра дозволяє підвищити технологічну інтенсивність формоутворення зі збереженням точності діаметра обробки.

### **3.4. Аналіз інтенсивності формоутворення отворів комбінованим осьовим інструментом**

Одним із основних кількісних технічних показників ефективності засобів виробництва і технологічних систем, що дозволяє об'єктивно аналізувати закономірності технологічного прогресу, а також встановлювати причинно-наслідкові зв'язки і залежності у технологічних системах, є продуктивність. Однак суттєвим недоліком найпоширенішого технічного критерію «штучна продуктивність», який характеризує кількість придатної продукції, виготовленої за одиницю часу, є те, що він

не має абсолютного характеру, тобто дозволяє порівнювати продуктивність обробки лише однакових деталей.

У зв'язку з цим запропоновано кількісний інтегральний критерій – інтенсивність формоутворення, який забезпечує зіставність оцінок для різних видів металорізального обладнання і систем; враховує у явному вигляді інформацію про параметри обробки і структуру технологічного процесу; забезпечує можливість його використання як для аналізу існуючого технологічного обладнання і процесів з метою виявлення резервів підвищення їх продуктивності, так і для синтезу нових систем на всіх або більшості його етапів; оцінює як розрахункову, так і потенційну продуктивність; забезпечує наочність оцінки та простоту практичного застосування.

Інтенсивність формоутворення – це фіктивна швидкість розосередженого технологічного впливу на об'єкти обробки, який здійснюється кінематично або структурно пов'язаними різальними інструментами технологічної системи, визначена з урахуванням технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів.

Інтенсивність формоутворення є системним показником, який має ієрархічну структуру, що відповідає структурі технологічної системи, а також структурі показника «штучна продуктивність». У даному випадку нами розглядається технологічна та циклова інтенсивність формоутворення КОІ.

Технологічна інтенсивність формоутворення визначає величину технологічної продуктивності та є дійсною швидкістю поступального переміщення різального інструмента у напрямку робочої подачі (хвилинна подача).

Циклова інтенсивність формоутворення визначає величину циклової продуктивності обробки і розраховується з урахуванням допоміжного часу в циклі роботи верстата, який витрачається на керування верстатом, переміщення та зміну інструмента, встановлення, закріплення та зняття заготовки тощо.

Порівняльний аналіз технологічних систем виконується за допомогою показників питомої інтенсивності формоутворення, що припадає на один різальний інструмент.

На основі викладеного підходу проведений аналіз ефективності механічної обробки отворів.

Гладкий наскрізний отвір з фаскою можна обробити, використовуючи як набір стандартних інструментів (свердло, зенкер, зенківка), так і КОІ (свердло-зенкер-зенківка), що зображені на рис. 3.23. Режими різання (табл. 3.3) призначаються за довідниками [20].

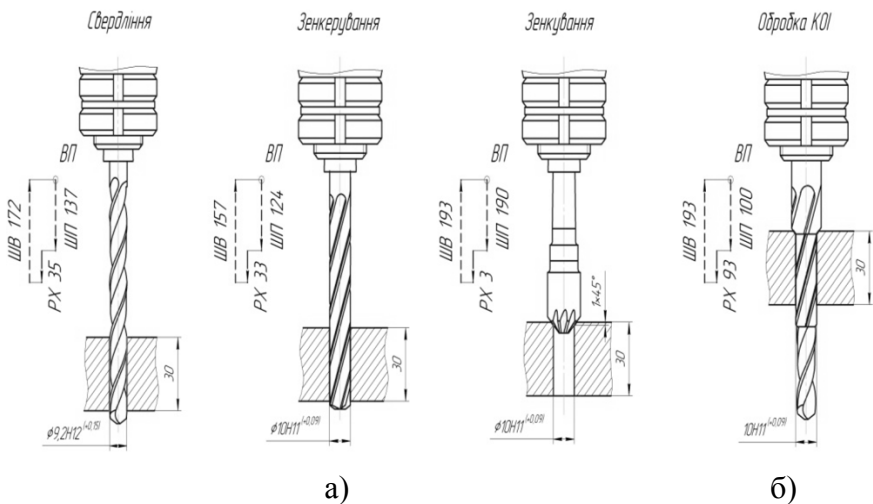


Рис. 3.23. Технологічні схеми обробки гладкого отвору:  
 а – стандартними інструментами;  
 б – КОІ свердло-зенкер-зенківка

Розрахункові формули питомих показників інтенсивності формоутворення для послідовної обробки отворів стандартними інструментами мають такий вигляд:

$$\bar{W}_T = \frac{\sum_{i=1}^{N_{nep}} n_i \cdot S_{oi}}{N_{nep}}; \bar{W}_{Ц} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{nep}} W_{Ti} \cdot t_{oi}}{N_{nep} \cdot t_{ца}}$$

де  $\bar{W}_T$  та  $\bar{W}_{Ц}$  – питомі показники технологічної та циклової інтенсивності формоутворення відповідно, мм/хв;

$n_i, S_{oi}$  – параметри режиму різання при виконанні  $i$ -го переходу;

$t_{oi}$  – основний час при виконанні  $i$ -го переходу, хв;

$t_{ца}$  – час автоматичної роботи верстата за керуючою програмою, хв;

$N_{пер}$  – кількість переходів, шт.

Показники інтенсивності формоутворення для КОІ (рис. 3.24):

$$W_T = n \cdot S_o; W_{Ц} = W_T \cdot \frac{t_o}{t_{ца}}$$

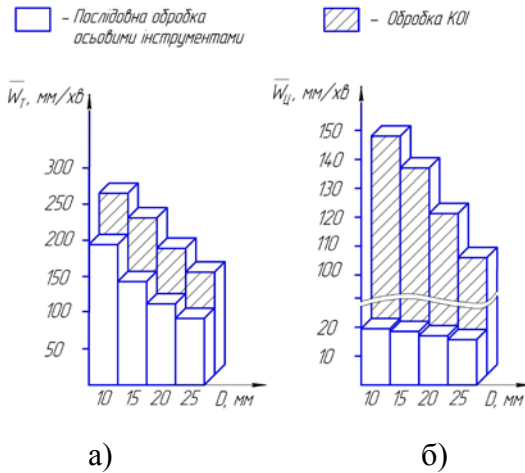


Рис. 3.24. Питомі показники інтенсивності формоутворення:  
 а – технологічної; б – циклової

Кількісну оцінку підвищення технологічної  $W_T$  та циклової  $W_{Ц}$  інтенсивності формоутворення при використанні КОІ виконуємо за допомогою коефіцієнтів  $K_{W_T}, K_{W_{Ц}}$  відповідно (рис. 3.25):



$$K_{W_T} = \frac{W_T}{W_T}; K_{W_{Ц}} = \frac{W_{Ц}}{W_{Ц}}.$$

Таблиця 3.3

Режими різання

Діаметр отвору D, мм	Інструмент		Подача S <sub>o</sub> , мм/об.	Швидкість різання V, м/хв	Частота обертання n, об./хв
10	1	Свердло	0,25	23,4	840
		Зенкер	0,33	33,284	1064
		Зенківка	0,05	15,4	490
	2	Свердло-зенкер-зенківка	0,25	33,3	1064
15	1	Свердло	0,39	19,2	455
		Зенкер	0,33	33	709
		Зенківка	0,07	15,5	333
	2	Свердло-зенкер-зенківка	0,33	33	709
20	1	Свердло	0,40	18	317
		Зенкер	0,37	32	518
		Зенківка	0,09	15,7	255
	2	Свердло-зенкер-зенківка	0,37	32	217
25	1	Свердло	0,42	17,6	238
		Зенкер	0,43	28,4	362
		Зенківка	0,11	14,4	184
	2	Свердло-зенкер-зенківка	0,42	28,4	362

Скорочення часу роботи верстата за керуючою програмою оцінюємо за допомогою коефіцієнта (рис. 3.26)

$$K_{t_{ua}} = \frac{t_{ua2}}{t_{ua1}},$$

де  $t_{ua1}$  та  $t_{ua2}$  – час циклу автоматичної роботи верстата за керуючою програмою при обробці комплектом стандартних інструментів та КОІ відповідно, хв.

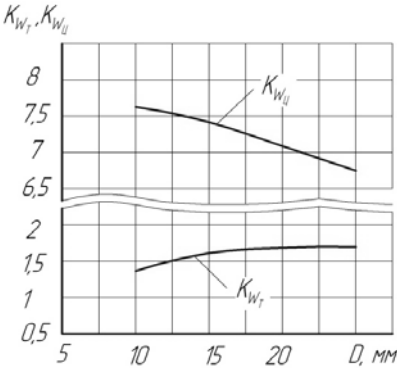


Рис. 3.25. Вплив діаметра оброблюваного отвору на коефіцієнти підвищення інтенсивності формоутворення

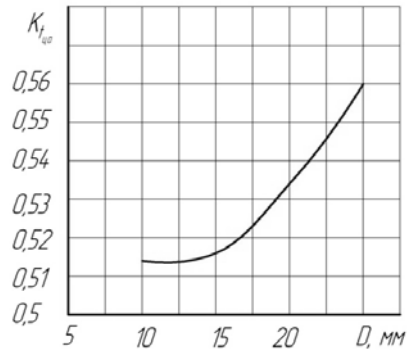


Рис. 3.26. Вплив діаметра оброблюваного отвору на коефіцієнт скорочення часу роботи верстата

Виконано аналіз інтенсивності формоутворення ступінчастого отвору комплектом стандартного осьового інструмента та КОІ (рис. 3.27). Режими різання, призначені за довідниками [20] (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Режими різання

Діаметр отвору $D$ , мм	Інструмент	Подача $S_o$ , мм/об.	Швидкість різання $V$ , м/хв	Частота обертання $n$ , об./хв	
10	1	Свердло	0,39	19,4	455
		Зенкер	0,19	46,2	980
		Зенківка	0,07	15,7	333
	2	КОІ	0,19	46,2	980

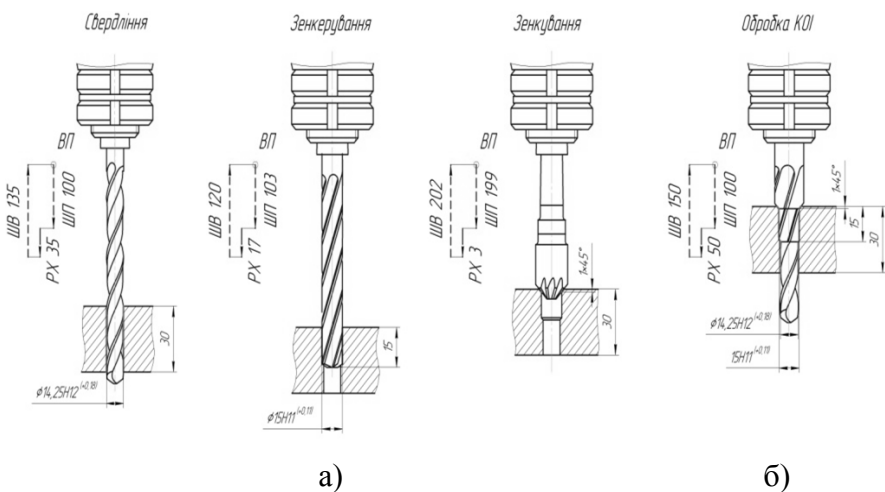


Рис. 3.27. Технологічні схеми обробки ступінчастого отвору:  
 а – стандартними інструментами;  
 б – КОІ (свердло-зенкер-зенківка)

Результати аналізу інтенсивності формоутворення при обробці ступінчастого отвору показані у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Показники інтенсивності формоутворення ступінчастого отвору

Інструмент		Інтенсивність формоутворення		Коефіцієнт підвищення інтенсивності формоутворення		Коефіцієнт скорочення часу роботи верстата
		$\bar{W}_T$	$\bar{W}_Ц$	$K_{W_T}$	$K_{W_Ц}$	$K_{t_{ца}}$
1	Стандартний	129	19	1,44	8,0	0,617
2	КОІ	186	120			

Таким чином, інтенсивність формоутворення обробки отворів, як технологічна  $\bar{W}_T$ , так і циклова  $\bar{W}_Ц$ , зменшуються зі збільшенням діаметра оброблюваного отвору. Використання

КОІ дозволяє підвищити технологічну інтенсивність формоутворення  $\bar{W}_T$  у 1,36–1,69 разів, а циклову  $\bar{W}_C$  – у 6,77–8 разів. Застосування КОІ для обробки отворів на верстатах із ЧПК дозволяє скоротити час циклу роботи верстата за керуючою програмою у 0,514–0,617 разів.

## **4. Підвищення ефективності обробки отворів на багатоцільових верстатах**

### **4.1. Аналіз технологічних можливостей сучасних багатоцільових верстатів**

Найбільш ефективним видом металорізального устаткування, що застосовується для обробки складних і трудомістких деталей в умовах багатомономенклатурного виробництва, є багатоцільові верстати (БВ). Багатоцільовий верстат – це автоматизований верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК) та високим ступенем інтеграції операцій, тобто верстат, що забезпечує виконання великої номенклатури технологічних операцій без перебазування виробів і з автоматичною зміною інструмента. Іноді такі верстати називають багатоопераційними верстатами або обробними центрами. За своїм призначенням БВ можна розділити на верстати для обробки корпусних деталей і верстати для обробки деталей типу тіл обертання.

За характером переважаючих переходів БВ можна розділити на три групи:

– свердлильно-фрезерно-розточувальні з головним рухом обертання інструмента та компонованням, аналогічним фрезерним, розточувальним, свердлильним верстатам;

– токарно-свердлильно-розточувальні, токарно-свердлильно-фрезерні з головним рухом обертання деталі та компонованням, аналогічним компонованням верстатів токарної групи;

– верстати з різнорідними операціями та оригінальним компонованням.

На багатоцільових верстатах свердлильно-фрезерно-розточувальної групи можуть здійснюватися такі операції, як свердління, зенкерування, розгортання, розточування, нарізання різьблення, фрезерування плоских і криволінійних поверхонь.

Головною характеристикою приводів головного руху БВ є рівень частот обертання, який залежить від типу верстата, його

розмірів, особливостей використання. Розрізняють нормальний (до 3000 об./хв), підвищений (до 4000–6000 об./хв) та високий (до 10000 і більше об./хв) рівні частот обертання.

Російські виробники, як правило, випускають БВ нормального та підвищеного рівнів частот обертання. Наприклад, Іванівський завод важкого верстатобудування, який є лідером російського верстатобудування, випускає верстати моделі ІР500ПМФ4 (рис. 4.1), ІР320ПМФ4 та ІР200ПМФ4, частота обертання шпинделів яких не перевищує 7100 об./хв.



Рис. 4.1. Багатоцільовий верстат мод. ІР500ПМФ4 Іванівського заводу важкого верстатобудування

Однією з найбільш помітних тенденцій у світі стало значне збільшення числа високошвидкісних верстатів, шпинделі яких обертаються з частотою 20–40 тисяч і більше об./хв. Поширення такої технології зумовлено насамперед тим, що при високошвидкісній обробці виникають незначні сили та невисокі температури в зоні різання, отримується висока якість поверхні з мінімальним утворенням задирок.

Іноземні фірми-виробники, орієнтуючись на потреби світового ринку, випускають БВ із високим рівнем частоти обертання. Так, японська фірма Toyota випускає горизонтальний БВ моделі FH80S 5 axis. У верстата передбачено три виконання діаметра шпинделя. За бажанням замовника може бути встановлений один з трьох шпинделів: діаметром 110 мм (із частотою обертання 6000 об./хв для обробки сталі і чавуна), діаметром 100 мм (із частотою обертання 15000 об./хв для високошвидкісної обробки сталі і чавуна) або діаметром 90 мм (із частотою обертання 14000 об./хв для високошвидкісної

обробки алюмінію) [21]. Для одержання частоти обертання до 40000 об./хв непрямі приводи використовувати не можна, тому шпindelні вузли виконують у вигляді мотор-шпindelя.

БВ, як правило, мають один шпindel або револьверну шпindelну головку, шпindelі якої працюють по черзі. Однак існують конструкції верстатів із кількома шпindelями. Один шпindel призначений для виконання важких робіт, а інші – для легких і більш точних. Наприклад, верстати моделей Ultrix 1000 і Xceeder 1200 італійської фірми Breton, призначені для високошвидкісного фрезерування, свердління і нарізання різьблень у корпусних деталях, а також вертикального точіння і шліфування. Для виконання операцій розточування на цих верстатах передбачений спеціальний шпindel потужністю 30 кВт і максимальною частотою обертання 500 об./хв, а для виконання інших операцій – два мотор-шпindelі: один потужністю 40 кВт і частотою обертання 18000 об./хв., другий потужністю 20 кВт і частотою обертання 24000 об./хв.

Іспанська фірма MТogges випускає гексаподний модуль серії Hermes. Цей модуль забезпечує одне переміщення і два обертання, що перетворює трикоординатний БВ у п'ятикоординатний. Мета його застосування – п'ятикоординатна обробка деталей складних форм. Крім стандартного шпindelя потужністю 40 кВт і частотою обертання 24000 об./хв він може оснащуватися мотор-шпindelем підвищеної потужності (70 кВт) з частотою обертання 40000 об./хв.

Фірма Chigon встановлює на свої БВ поворотні мотор-шпindelі з гідравлічним затисканням та охолодженням (рис. 4.2), які мають можливість повороту  $\pm 100$  градусів. За 0,5 секунди вони роблять поворот від 0 до 90 градусів. За один установ проводиться комплексна як горизонтальна, так і вертикальна обробка.

Конструкція приводів головного руху сучасних БВ, поряд із високими частотами обертання, забезпечує високу вібростійкість, що багато в чому визначає якість обробки і продуктивність верстата. Удосконалювання приводів головного руху БВ йде шляхом виключення або максимального спрощення

коробок швидкостей за рахунок застосування високомоментних регульованих електроприводів, підвищення жорсткості шпинделів, термостабілізації.

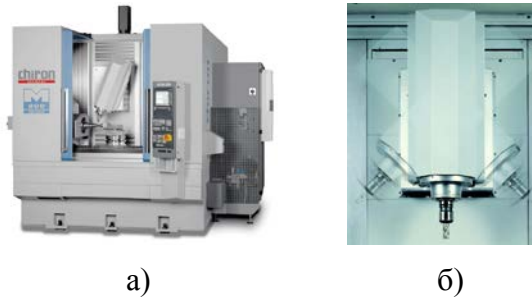


Рис. 4.2. Багатоцільовий верстат Mill 800 (а) фірми Chiron з поворотним мотор-шпинделем (б)

Підвищення продуктивності обробки на БВ досягається за рахунок збільшення частоти обертання інструмента та внаслідок скорочення витрат допоміжного і підготовчо-заключного часу. Автоматизація установлювальних переміщень деталей та інструментів і значне збільшення їх швидкостей істотно підвищують продуктивність обробки. Необхідно зазначити, що за останні 5 років швидкість переміщень робочих органів БВ досягла в середньому 30–40 м/хв, а середні значення прискорень збільшилися до 5 м/с<sup>2</sup>. Причому виробники БВ продовжують збільшувати швидкість переміщень робочих органів, і в деяких моделях БВ вона сягає 50–80 м/хв при використанні кулькогвинтових пар і 50–100 м/хв у верстатів, що обладнані лінійними двигунами. Прискорення робочих органів досягають 8–20 м/с<sup>2</sup>, а точність позиціонування  $\pm 2$  мкм.

Поступово збільшується число верстатів, оснащених лінійними двигунами. Лінійні приводи здатні забезпечити переміщення по осях зі швидкістю до 600 м/хв. Незважаючи на таку високу швидкість переміщень робочих органів, точність позиціонування у всьому робочому діапазоні висока і не перевищує 0,3 мкм.

Фірма Ingersoll Milling Machine випускає БВ моделі HVM 600А, оснащені лінійними двигунами. Їх робоча зона становить



630x630x600 мм. Лінійні двигуни забезпечують прискорення по осі  $Z = 14,7 \text{ м/с}^2$ , а по осях  $X$  та  $Y - 10 \text{ м/с}^2$ . Хоча швидкість переміщень по всіх осях сягає 80 м/хв, точність позиціонування у всьому робочому діапазоні досить висока і становить 5 мкм, що забезпечують скляні лінійки, встановлені по всіх осях координат.

Одна з найбільших світових фірм, що постійно працюють у галузі нових технологій, – Deckel Maho (Італія), випускає вертикальний БВ моделі DMC 85V linear. Сталева моноблочна станина оснащена вісьмома, розміщеними у визначеному порядку, лінійними двигунами фірми Etel. Це дозволяє використовувати швидкості переміщень по осях координат до 120 м/хв із прискореннями до  $20 \text{ м/с}^2$  і зусиллями подачі до 8 кН. Цього досить для обробки як незагартованої, так і загартованої сталі, а також легких сплавів і важкооброблюваних матеріалів.

При виборі БВ та під час розроблення технологічного процесу обробки необхідно брати до уваги: число інструментів, розташування та доступність інструментального магазину, наявність датчиків контролю спрацювання та поломки інструмента, а також час на заміну інструмента.

Останнім часом помітна тенденція до значного збільшення об'ємів інструментальних магазинів, які містять до 130 і більше інструментів. Заміна інструмента проходить автоматично за 0,2–5,0 с, що різко скорочує витрати допоміжного часу та підвищує частку машинного часу в обсязі часу обробки деталі. Так, у верстат моделі DMC 85V linear інструмент масою до 8 кг і довжиною до 140 мм замінюється з інструментального магазину, розрахованого на 30 інструментів за 3,9 с. Японська фірма Matsuura у своєму багатоцільовому верстаті моделі LX-1 здійснює заміну інструмента з шістнадцятипозиційного інструментального магазину всього за 0,2 с. На верстаті моделі Hypersonic1400L фірми Yamazaki Mazak зміна інструментів діаметром до 125 мм при заповнених сусідніх гніздах і до 210 мм при незаповнених, довжиною до 400 мм і масою до 20 кг здійснюється з тридцятипозиційного

інструментального магазину з довільною вибіркою за 4,8 с. У верстаті моделі STC1000 Symphony, фірми Starrag-Heckert, залежно від складності заготовки, передбачено два типи інструментальних магазинів – ланцюговий на 60/80 інструментів і баштовий на 120/180/240 інструментів діаметром до 450 мм і довжиною до 800 мм [21].

На рис. 4.3 зображено Pick-up систему виробництва фірми Chiron, яка використовується на БВ модельного ряду Mill і дозволяє виконувати заміну інструменту за 1,5 с. Ланцюговий магазин розраховано на 40 інструментів діаметром до 125 мм і довжиною до 280 мм.



Рис. 4.3. Pick-up система фірми Chiron: а – шпиндель із інструментом; б – ланцюговий інструментальний магазин; в – заміна інструмента

Напрямок розвитку механізмів зміни інструментів на БВ є пошук таких конструктивно-компонувальних рішень, що дозволили б здійснювати заміну інструмента при будь-якому положенні шпинделя, не затрачаючи час на його додаткове відведення в «нульову» точку.

Сучасні пристрої ЧПК мають великий обсяг програм обробки складної деталі багатьма інструментами та здатність забезпечити широкі діапазони регулювання швидкостей як приводів подач, так і приводів головного руху, містять велике число (до 7–8) керованих органів БВ.

За технологічними ознаками пристрої ЧПК поділяються на три основні типи: позиційні, контурні й комбіновані (контурно-позиційні). Для керування складними багатокординатними БВ більшість зарубіжних фірм

випускають пристрої ЧПК із широкими функціональними можливостями і великою обчислювальною потужністю.

Пристрій ЧПК NC-110 фірми «Балт-систем» (Росія), що встановлюється на БВ Іванівського заводу важкого верстатобудування. Пристрій обладнано процесорним модулем із частотою 133 МГц, RAM 4Mb, Flash 8 Mb. Має від 2 до 16 керованих осей з тактом керування 16 осями 1 мс. Підготовка керуючих програм може виконуватись одночасно з циклом обробки. Пристрій ЧПК має можливість встановлення по чотирьох каналах датчиків контролю за станом різального інструменту та по одному каналу датчик торкання. Габаритні розміри пристрою – 340x432x140 мм.

Під час використання системи ЧПК можна здійснювати облік параметрів верстата і процесу різання (автоматичний облік статичних і динамічних похибок кінематичних ланцюгів, контроль і оптимізація режимів різання, введення корекцій положення і розмірів інструмента, нуля верстата, люфтів і т.д.), а також вводити програми з різних носіїв автоматизованої підготовки і редагувати програми в режимі діалогу «оператор – система ЧПК». Сучасні пристрої ЧПК легко адаптуються до найскладніших БВ та дозволяють здійснювати високопродуктивну обробку з використанням усіх технічних можливостей верстатів.

Несвоєчасне виявлення поломок інструмента може мати найрізноманітніші наслідки – від появи браку до аварії верстата. У зв'язку з цим на БВ необхідно передбачати надійний контроль поточного стану різального інструмента, із заміною інструмента, що відмовив, резервним, а за необхідності заміною забракованої заготовки.

На сьогодні час використовуються прямі й непрямі методи активного контролю. Прямі методи полягають у безпосередньому вимірюванні параметрів інструмента або деталі. Недоліком прямих методів є те, що в умовах виробництва їх можна застосовувати тільки після припинення процесу різання, тому не виключається виникнення браку у виробі між контрольними операціями. Непрямі методи

активного контролю використовуються в процесі різання, що супроводжується рядом фізичних явищ.

При автоматичному виявленні порушення працездатності різального інструменту в процесі обробки система ЧПК зупиняє рух подачі, а потім виводить інструмент у позицію заміни і замінює інструментом-дублером.

Інструмент, що знаходиться на верстаті, обмінюється з приладом ЧПК верстата визначеною технологічною інформацією за допомогою узгоджувальної системи. Зокрема, від інструмента надходять дані про його припустимий час роботи, допустимі навантаження і т.д.

Одними з найбільш простих пристроїв є датчики, що реагують на потужність різання. На сучасних БВ широко використовують датчики сил, що вмонтовані у теплові вузли (підшипники, втулки й ін.). Це дозволяє контролювати стан різального інструменту без істотної зміни конструкції верстата. Для того щоб комплексно оцінити характер проходження робочого процесу і виявити аварійні ситуації, використовується одночасно кілька методів контролю. Імовірність виявлення пристроєм поломки свердла діаметром 5 мм і мітчиків діаметром 6 мм становить 70%.

Пристрої для контролю сил різання встановлюють як на механізм подачі, так і на інструментальний вузол. У таких приладах детектор реагує на поломку інструмента через 0,5 с, потім, унаслідок раптового збільшення сил різання, негайно формується команда на зупинку верстата. Команда на зупинку верстата подається, якщо контрольований параметр перевищує час 0–10 с, який задається оператором.

Майже всі сучасні БВ оснащені системами діагностики. Наприклад, на БВ моделі Mazak PowerCentre V-15N здійснюється контроль тривалості роботи кожного інструмента з автоматичною його заміною, якщо інструмент відробив період стійкості, на інструмент-дублер. Після закінчення обробки інструмент підводиться до контрольної головки, у разі його ушкодження автоматично замінюється на інструмент-дублер. Система безконтактного контролю стану інструменту NC1, що

розроблена фірмою Renishaw, має такі можливості: вимірювання статичної довжини (наприклад, свердла); визначення довжини рухомого шпинделя (наприклад, різця, фрезерної головки); високошвидкісний контроль поломки інструмента; автоматичне вимірювання інструмента; контроль геометрії різальної кромки; компенсація температурних впливів. Система має можливість підключення: тензодатчиків; сенсорів механічних шумів; шупів для контролю довжини деталей; приладів акустичного контролю розміру деталей; сенсорів безпосередньо на інструменті для більш надійного контролю зносу і поломки та ін. Звичайне керування процесом обробки здійснюється на підставі базових сигналів визначеної амплітуди. У процесі роботи вважається нормальним, якщо сигнал коливається в межах від 1-го до 2-го рівнів. Якщо сигнал за амплітудою переходить 1-й рівень, то від комп'ютерного приладу подається сигнал у блок приладу ЧПК верстата. За цією командою відбувається заміна зношеного інструмента.

У критичних ситуаціях (поломка інструмента) значення сигналів переходить на 3-й рівень, і система миттєво подає команду на зупинку процесу обробки і відведення інструмента від деталі. При виявленні поломки інструмента цикл обробки може бути перерваний відразу, а при зношеності більше допустимого цикл обробки може тривати до закінчення даної технологічної операції.

Дотепер досить велика кількість БВ із ЧПК є однопозиційними напівавтоматами, де завантаження і знімання виробу здійснюються вручну або за допомогою засобів малої механізації. При такому способі час завантаження та знімання не збігаються в часі з обробкою, а тривалість їх виконання безпосередньо впливає на продуктивність. Найпростішим способом скорочення допоміжного часу при завантаженні, відкріпленні, закріпленні та зніманні виробу є використання верстатів, оснащених двопозиційним столом (поворотним чи лінійним) або пристроєм зміни пристосувань. При цьому несумішеним виявляється лише допоміжний час на поворот або лінійне переміщення столів, що незалежно від типу виробу і

способів їх кріплення займає не більше 30–50 с, а це в багато разів менше, ніж в однопозиційних верстатах. Наприклад, БВ моделей ИР500ПМФ4, ИР320ПМФ4 та ИР200ПМФ4 Іванівського заводу важкого верстатобудування оснащені двома столами-супутниками, час зміни яких становить 40–45 с.

Таким чином, сучасний БВ – це високоавтоматизований верстат, оснащений потужною системою ЧПК, який дозволяє здійснювати обробку складних деталей з високим ступенем концентрації операцій, використовуючи сучасні різальні інструменти та передове технологічне оснащення. БВ забезпечують виконання великої номенклатури технологічних операцій з високою продуктивністю без перебазування виробів, здійснюючи автоматичну заміну інструменту та контроль за його станом, а також за якістю обробки.

Обробка деталей на БВ виконується при використанні великої кількості різноманітного інструменту. Іноді для обробки однієї деталі необхідно понад 100 інструментів. Складність інструментів, їх кількість і металоємність визначають те, що вартість інструментального оснащення БВ у деяких випадках може досягати вартості самого верстата. У багатьох випадках час обробки однієї деталі на БВ сягає кількох годин, тому для інструмента передбачають один або декілька дублерів.

Різальні інструменти, які використовують на сучасних БВ, характеризуються мінімальними габаритними розмірами і масою, збільшеною у порівнянні зі звичайними інструментами, стійкістю, точністю, жорсткістю, вібростійкістю та технологічністю конструкції, здатністю до стійкого стружкодроблення і полегшеного стружковідведення.

У середньому на БВ використовується 50–60 одиниць інструментів; від свердел і пальчикових фрез малого діаметра до розточувальних оправок і торцевих фрез великого діаметра, що призводить до великої кількості різноманітних перехідних оправок. Сучасні інструменти налічують 11 типорозмірів хвостовиків [22], які вимагають різних за конструкціями і розмірами приладів заміни інструмента, типів та розмірів отворів шпинделів. Таким чином, невід'ємною складовою БВ

стає комплект допоміжного інструменту, який складається із втулок і оправок різних конструкцій, призначених для закріплення різального інструменту. Для забезпечення точності й жорсткості закріплення різального інструменту, а також настроювання необхідного вильоту інструмента, використовують конструкції збірного допоміжного інструменту, який становить окремі елементи. Найбільш широке застосування на БВ отримали допоміжні інструменти, які встановлюються в шпindel верстата по конусній поверхні з конусністю 7:24. Так, на верстатах IP 500–IP 800 Іванівського заводу важкого верстатобудування (Росія) використовують підсистему допоміжного інструменту [18] з хвостовиками за ГОСТ 25827-93 (рис. 4.4).

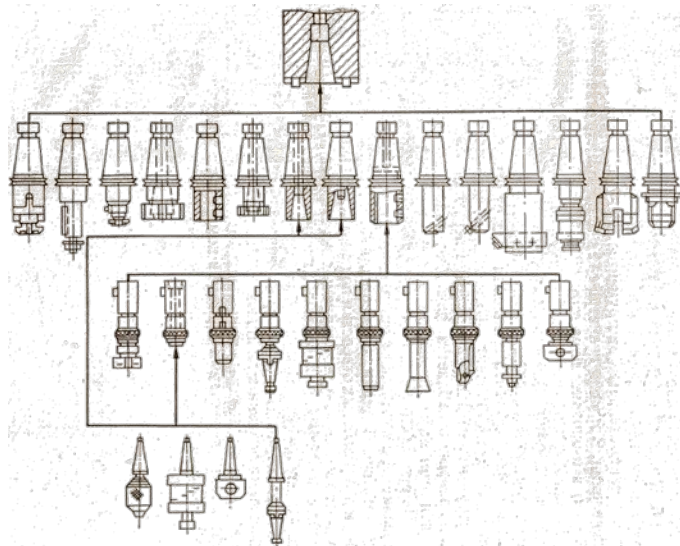


Рис. 4.4. Підсистема допоміжного інструменту для БВ свердлильно-фрезерно-розточувальної групи

Основою системи є уніфікація допоміжного інструменту, що забезпечує можливість широкого використання стандартних конструкцій різального інструменту. Перевагами використання такої оснастки є зменшення типів допоміжного інструмента, швидке переналагодження інструмента, зменшення

металоемності, скорочення номенклатури різального інструменту.

Свердління отворів діаметром до 20 мм на БВ виконують, як правило, без спрямування інструмента кондукторними втулками, а тому з метою запобігти зміщенню осі свердла під час врізання, вводять додатковий перехід зацентрування отвору. Для цього використовують більш жорсткі свердла короткої серії.

У деяких випадках, за рахунок більш глибокого врізання центрувального свердла, в отворі отримують фаску, яка може бути використана для полегшення врізання мітчика при нарізанні різьби. У процесі обробки свердло не має додаткового спрямування, як це відбувається при свердлінні з використанням кондукторів на універсальних верстатах, це призводить до зміщення осі свердла, розбиття отвору і змушує знизити режими різання, що значно зменшує продуктивність обробки. Обмеженість використання приладів для спрямування свердел під час свердління отворів на БВ пов'язана зі складністю організації автоматичної заміни громіздких конструкцій скальчастих кондукторів, відомі конструкції яких не можуть застосовуватися на БВ з автоматичною зміною інструментів.

Аналіз допоміжного інструменту, що використовується на БВ свердлильно-фрезерно-розточувальної групи, показав необхідність його подальшого удосконалення, уніфікації та створення нового допоміжного інструменту.

Обробка деталей на БВ має ряд особливостей, пов'язаних із широкими технічними можливостями цих прогресивних верстатів, тому технологічні процеси обробки основних отворів на них деякою мірою відрізняються від обробки на звичайних верстатах.

Основні отвори корпусних деталей у переважній більшості отримуються на заготівельних операціях з припуском на механічну обробку.

Відлиті в чавуні або прошиті у сталі основні отвори доцільно оброблювати розточуванням різцем, установленим у розточувальній оправці. Нерівномірність припуску при першому проході викликає відтискання й зміщення інструмента. Якщо



перший прохід виконувати зенкером, то внаслідок нерівномірного припуску радіальна та тангенціальна складові сили різання, які виникають на кожному лезі інструменту, будуть неоднакові, рівнодійна цих сил зміщується та відводить інструмент, а внаслідок і вісь оброблюваного отвору. При розточуванні отвору різцем нерівномірний припуск безперервно змінює силу різання, що діє на лезо, зміщуючи різець до осі. В такому випадку зсув і зміщення осі буде значно меншим. При чорновій обробці відлитих отворів необхідно віддавати перевагу розточуванню, а не зенкеруванню, хоча воно і продуктивніше за розточування.

Перший прохід при обробці отворів великого діаметра доцільно виконувати фрезеруванням кінцевими фрезами по контуру отворів. Нерівномірний припуск, що викликає перемінну по колу силу різання, зміщуватиме фрезу до осі, тим самим зменшуючи зсув осі отвору.

Напівчистову та чистову обробку основних отворів, як правило, виконують розточуванням. Найбільше поширення отримала схема однорізцевого розточування. Це пов'язано з простотою налагодження розточувального інструменту, а в деяких випадках, наприклад при обробці глухих отворів, можлива тільки однорізцева обробка. Недоліком цієї схеми обробки є її низька продуктивність, тож для чорнової та чистової обробки необхідно використовувати декілька розточувальних оправок. На рис. 4.5 та 4.6 наведено схеми, на яких суміщено чорнову та чистову обробку.

Використання зазначених схем обробки дозволяє за один прохід виконувати чорнову і чистову обробку. Недоліком таких схем є необхідність значного збільшення довжини розточувальних оправок, що ускладнює їх використання на верстатах з автоматичною зміною інструмента та негативно впливає на точність оброблюваних отворів. Для зменшення довжини розточувальних оправок використовують схему обробки (рис. 4.6), у якій різці працюють одночасно.

Відомі схеми обробки, в яких різці розміщені під кутом один до одного (рис. 4.7).

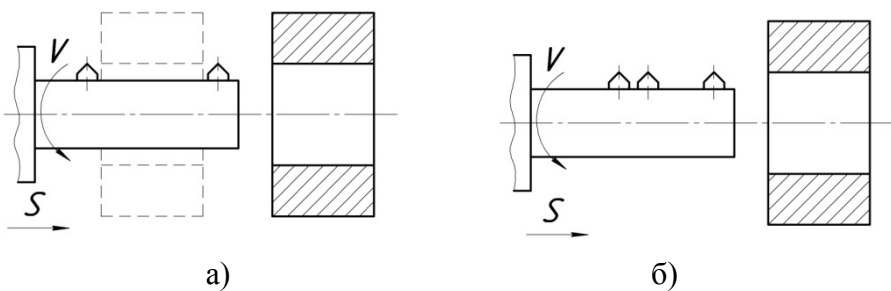


Рис. 4.5. Суміщення чорнової та чистової обробки:  
 а – дворізева послідовна чорнова та чистова обробка;  
 б – трирізева послідовна обробка одним чорновим та двома чистовими різцями

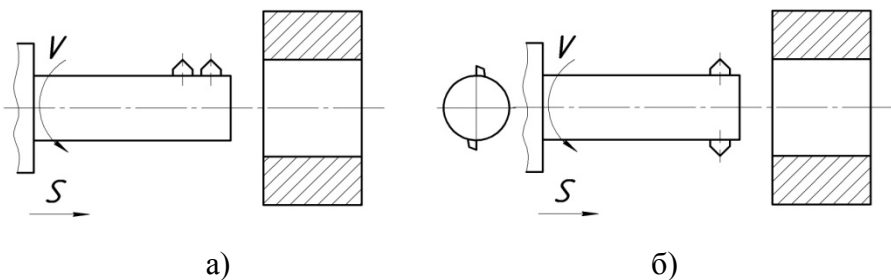


Рис. 4.6. Суміщення чорнової та чистової обробки:  
 а – дворізева послідовно-сполучена обробка чорновим і чистовим різцями; б – дворізева обробка чистовими різцями

Технологічні схеми обробки, наведені на рис. 4.5–4.7, передбачають різні варіанти сполученої обробки, при цьому різці ділять між собою припуск. Продуктивність зазначених схем досить висока, але подача інструменту при обробці таким способом обмежується висотою мікронерівностей, які утворюються після проходження чистового різця.

При методі поділу подачі, суть якого полягає у тому, що обидва різці виставлені на один і той самий розмір обробки, а їхні вершини зміщені одна відносно іншої в напрямі подачі на величину, яка дорівнює половині подачі. Роботу розточувальних оправок з малими перерізами зрізу детально розглянуто Маталіним А. А., Філоненком С. Н. та Ломакіним В. К.

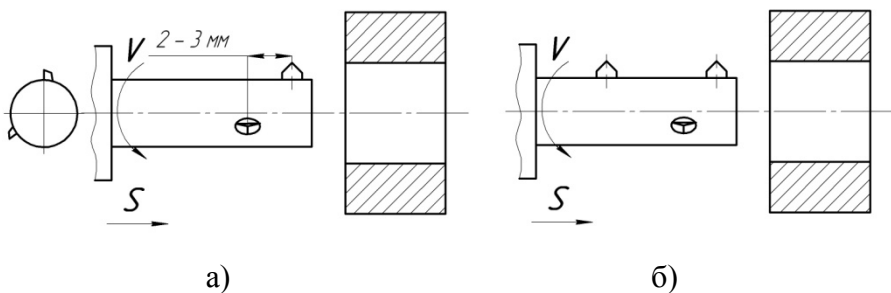


Рис. 4.7. Обробка з розміщенням різців під кутом:  
 а – дворіздева сполучена обробка чорновим і чистовим різцями;  
 б – триріздева сполучено-попередня обробка двома чорновими та одним чистовим різцями

При застосуванні методу поділу подачі між двома різцями при незмінній шорсткості поверхні подача може бути збільшена вдвічі, або шорсткість, при незмінній подачі, може бути зменшена вчетверо. Недоліком методу поділу подачі є складність налагодження оправки на оброблюваний розмір, що зумовлено проходженням процесу різання при малих глибинах різання та зв'язаний із цим різний темп зношування різців.

Одним із напрямків підвищення продуктивності за рахунок концентрації технологічних переходів при обробці отворів осьовими інструментами на БВ та свердлильно-фрезерних верстатах є використання багатошпindelних головок.

Багатошпindelні головки – це допоміжний інструмент, що встановлюється та закріплюється в шпинделі верстата і фіксується в необхідному кутовому положенні. Вони призначені для передачі обертового руху та крутного моменту від шпинделя верстата до кількох робочих шпинделів з РІ. Залежно від спеціалізації багатошпindelні головки можуть мати два та більше рухомих або нерухомих робочих шпинделів. У нерегульованих багатошпindelних головках, які не дозволяють змінювати положення РІ при переході на обробку іншої деталі, шпинделі розміщені безпосередньо в корпусі головки. Багатошпindelні головки з регульованими

шпинделями дозволяють обробляти системи отворів у різних деталях при зміні міжосьових відстаней.

Підвищити продуктивність обробки отворів шляхом концентрації технологічних переходів дозволяє запропонована багатошпindelна головка [24]. Вона забезпечує зменшення основного часу обробки за рахунок того, що процес формоутворення поверхонь заготовки здійснюється одночасно кількома РІ, а також скорочення витрат допоміжного часу на холості переміщення, тому що виключаються міжпозиційні переміщення РІ.

Шпинделі багатошпindelної головки встановлені у незалежних корпусах і мають можливість незалежного і повного кільцевого обертання в обидва боки навколо валів проміжних шестірень та забезпечуються незалежним фіксуванням у будь-якому кутовому положенні за допомогою болтів, що входять у Т-подібні кільцеві пази основного корпусу.

Багатошпindelна головка (рис. 4.8) складається з основного корпусу 1, що фіксується від повороту в позиціонуючому блоці 2, за допомогою упору 3. Центральна роздавальна вал-шестірня 4 має конічний хвостовик (конус Морзе), за допомогою якого вона встановлена у перехідну втулку, розміщену в шпинделі верстата. Центральна роздавальна вал-шестірня через проміжні шестірні 5, 6, 7 і вали 8 передає обертання робочим шпинделям 9, які змонтовані в незалежних корпусах 10.

Регулювання положення шпинделів при налагодженні їх на нові розміри обробки здійснюється шляхом повороту незалежних корпусів у необхідному напрямку на необхідний кут, відповідно до нової схеми обробки. Фіксація незалежних корпусів у встановленому положенні здійснюється за допомогою болтів 11, які вставлені в кільцеві Т-подібні пази основного корпусу.

На рис. 4.9 показана багатошпindelна головка [25], яка на відміну від наведеної на рис. 4.8 дозволяє проводити одночасне регулювання положення всіх робочих шпинделів у радіальному напрямку.

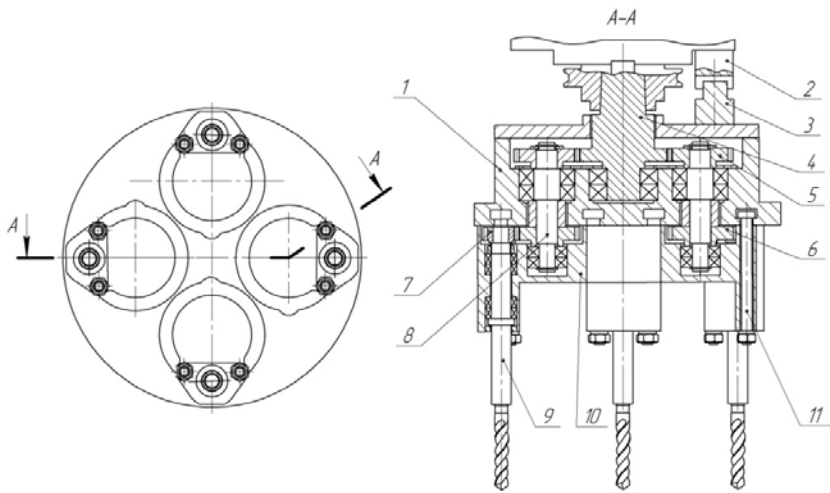


Рис. 4.8. Багатошпindelна головка (патент України № 31383)

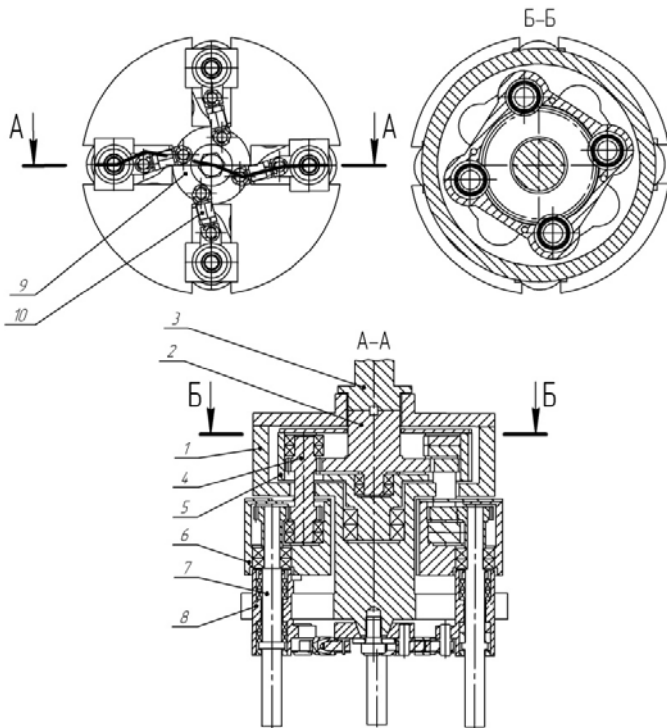


Рис. 4.9. Багатошпindelна головка (патент України № 36304)

При цьому радіальне положення кожного шпинделя відносно лінії центрів верстата регулюється незалежно одне від одного, що дозволяє швидко переналагоджувати головку на обробку деталей як із симетричним, так і з несиметричним розміщенням отворів.

Її конструктивною особливістю є наявність спільного поворотного блока з проміжними вал-шестірнями, поворотних втулок та кривошипного механізму, за допомогою якого відбувається регулювання положення шпинделів.

В основному корпусі багатошпиндельної головки 1 розміщується центральне роздавальне зубчасте колесо 2, що зв'язане з привідним валом 3. Від роздавального колеса обертовий момент через проміжні вал-шестірні 4, що розміщені у спільному поворотному блоці 5 та у незалежних поворотних втулках 6, передається робочим шпинделям 7, які розташовані в рухомих корпусах 8.

Регулювання положення шпинделів при зміні оброблюваної деталі здійснюється поворотом кривошипної шайби 9, яка через розсувні шатуни 10 переміщує їх по напрямних корпуса у радіальному напрямку. Під час повороту кривошипної шайби і переміщення робочих шпинделів відбувається одночасне повертання незалежних поворотних втулок і спільного поворотного блока з проміжними вал-шестірнями, що забезпечує постійний кінематичний зв'язок привідного вала з робочими шпинделями. Положення кожного шпинделя відносно лінії центрів верстата встановлюється шляхом регулювання довжини розсувних шатунів.

Запропоновані багатошпиндельні головки можуть застосовуватися при обробці отворів осьовими інструментами на свердлильно-фрезерних верстатах як із ручним керуванням, так і з ЧПК для підвищення їх продуктивності.

Використання запропонованих багатошпиндельних головок на вертикально-свердлильних верстатах із вітчизняним РІ та режимами різання згідно з рекомендаціями загальномашинобудівних нормативів у порівнянні з одноінструментною обробкою дозволяє підвищити

інтенсивність формоутворення та зменшити трудомісткість у разі обробки двох, трьох та чотирьох отворів у 1,68, 2,42 та 3,05 рази, а на БВ та свердлильно-фрезерних верстатах із ЧПК відповідно у 1,52, 2,24 і 2,95 рази. У разі їх використання з РІ і режимами різання фірми Sandvik Coromant на вертикально-свердлильних верстатах продуктивність підвищується у 1,7, 2,45 та 3,08 рази, а на БВ і свердлильно-фрезерних верстатах із ЧПК – відповідно 1,85, 2,47 та 3,25 рази.

Упровадженням у виробництво сучасних РІ для обробки отворів провідних світових виробників і високошвидкісних верстатів із ЧПК не тільки підвищує рівень продуктивності їх обробки, а й підвищує ефективність використання багатошпindelних головок.

## **4.2. Оправки для свердління отворів на верстатах із ЧПК**

Підвищити продуктивність обробки і запобігти зміщенню осі інструмента при свердленні отворів дозволяє оправка для свердлення отворів [26]. У цій оправці для направлення різального інструмента у процесі обробки застосовується кондукторна втулка, яка має можливість обертання навколо своєї осі (рис. 4.10). Зазор між кондукторною втулкою та оброблюваною деталлю становить 0,2–0,5 мм.

Кондукторна втулка обертається разом із різальним інструментом, що запобігає її розбиттю і збільшенню внутрішнього діаметра, а отже, підвищує точність оброблених отворів.

Оправка виготовляється на базі стандартної, яка застосовується на верстатах із автоматичною зміною інструментів, що дозволяє здійснювати її заміну на БВ, оснащених автооператором. Для подрібнення стружки на оправці передбачений ніж, що дозволяє поліпшити умови обробки і використовувати оправку при обробці матеріалів, які дають зливну стружку.

Оправка складається з корпусу 1, у якому за допомогою стопорного гвинта 2 закріплена штанга 3. У штанзі 3 стопорним гвинтом 4 кріпиться цанговий патрон, що складається з корпусу цанги 5, змінної розрізної цанги 6, гайки 7 і регулювального гвинта 8. У цанзі 6 закріплюється різальний інструмент 9.

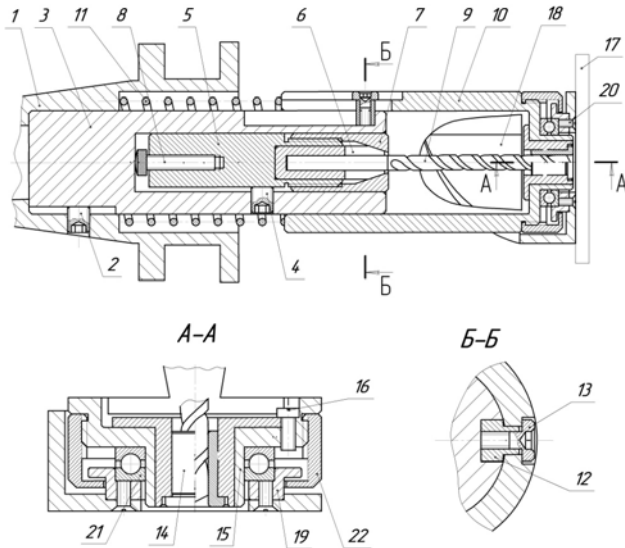


Рис. 4.10. Оправка для обробки допоміжних отворів свердлінням (патент України № 16601)

По штанзі 3 переміщується гільза 10, яка підтиснута пружиною 11. Переміщення обмежується шпонкою 12, що закріплена на гільзі 10 гвинтом 13. Різальний інструмент направляється по кондукторній втулці 14 ДСТ 18430-73, що запресована в змінну проміжну втулку 15, вставлену в гільзу 10. Змінна проміжна втулка 15 закріплена до гільзи 10 гвинтом 16. Гільза 10 упирається в оброблювану деталь 17 основою ножа 18, що закріплена до п'яти 19 гвинтами 20, через підшипник 21. П'ята 19 утримується кришкою 22. Налаштування оправки на оброблюваний розмір відбувається поза верстатом у такий спосіб. Різальний інструмент 9 встановлюється у відповідного розміру цангу 6, яка вставляється в корпус цанги 5 і закріплюється гайкою 7. Регулювальним гвинтом 8



виставляється необхідний осьовий розмір інструмента. Налагоджений на розмір цанговий патрон з інструментом вставляють до упора в штангу 3 і закріплюють стопорним гвинтом 4. У гільзу 10 вставляють проміжну втулку 15 із запресованою в неї кондукторною втулкою 14 відповідного розміру. Проміжна втулка затискається гвинтом 16. Для зручності установки проміжної втулки 15 на її фланці виконано дві лиски, що дозволяють знімати і встановлювати проміжну втулку, не викручуючи повністю гвинт 16. На штангу 3 вдягається пружина 11 і в паз штанги вставляється шпонка 12 із гвинтом 13. Гільза 10 вдягається на штангу 3 у такий спосіб, щоб шпонка 12 потрапила в паз гільзи. Гільза 10 переміщується в осьовому напрямку по штанзі 3 доти, поки різальний інструмент 9 не виявиться на одному рівні з нижньою частиною кондукторної втулки 14, після чого гвинтом 13 затискається шпонка 12. Оправка готова до установки в магазин верстата.

Оправка працює в такий спосіб. Автооператор бере її з інструментального магазину і встановлює в шпindelь верстата. Оправка підводиться до оброблюваної заготовки і основою ножа 18 упирається в поверхню оброблюваної деталі. Обертання від шпинделя передається на корпус оправки 1 і штангу 3. Від штанги 3 через шпонку 12 обертання передається на гільзу 10, проміжну втулку 15 і кондукторну втулку 14, а також на цанговий патрон із закріпленим у ньому різальним інструментом 9. Нерухомими залишаються тільки притиснуті до оброблюваної деталі ніж 18 та п'ята 19, які через підшипник 21 і гільзу 10 притискає пружина 11. Різальний інструмент 9 направляється по кондукторній втулці 14. При подальшому опусканні шпинделя штанга 3 переміщується в осьовому напрямку всередині гільзи 10, стискається пружина 11, забезпечуючи необхідне зусилля притиснення ножа для запобігання його обертанню. Різальний інструмент проводить обробку отвору. Стружка, проходячи по канавках інструмента і через кондукторну втулку 14, видаляється через вікна в гільзі 10. При утворенні зливної стружки вона дробиться, потрапляючи між ножем 18 і гільзою 10. Після обробки отвору на задану

глибину шпindel піднімається, штанга 3 виводиться з гільзи 10, яка залишається нерухомою під дією пружини 11 доти, поки шпонка 12 не досягне кінця паза в штанзі. Вся оправка відводиться від оброблюваної заготовки.

Розглянута вище оправка може застосовуватися лише при обробці отворів, конструкція яких не передбачає одержання фаски, тоді як близько 60% отворів необхідно виконувати з фаскою. При обробці таких отворів на БВ необхідно виконувати додатковий перехід – центрування або зенкування отвору. При центруванні фаску одержують за рахунок більш глибокого врізання центрального свердла.

З метою усунути додаткові переходи й уникнути пов'язаних з їх виконанням витрати часу, розроблено оправку для обробки отворів під нарізку кріпильної різі, що дозволяє одночасно виконувати свердління отвору та обробку фаски.

У запропонованій оправці, як і в оправці, розглянутій вище, інструмент направляється по кондукторній втулці, що обертається у процесі обробки разом із різальним інструментом, тим самим запобігає розбиттю і збільшенню внутрішнього діаметра, а, отже, підвищує точність обробки (рис. 4.11).

На кондукторній втулці 14 виконана різальна частина, що призначена для обробки фаски в отворі. Кришка 16 кондукторної втулки кріпиться до гільзи 10 гвинтами 17. Гільза 10 впирається в оброблювану деталь 18 основою ножа 19, що закріплена до п'яти 20 гвинтами 21, через підшипник 22. П'ята 20 утримується кришкою 23. Обертючий момент на кондукторну втулку передається запресованою в неї шпонкою 24. На гайку 7 встановлений упор 25, що фіксується контргайкою 26.

Налагодження оправки на оброблювані розміри відбуваються поза верстатом у такий спосіб: різальний інструмент 9 встановлюється у відповідного розміру цангу 6, що вставляється в корпус цанги і закріплюється гайкою 7. Регулювальним гвинтом 8 виставляється необхідний осьовий розмір інструмента. Обертанням упора 25 налагоджують лінійний розмір від перемички свердла до торця упора, від

точності настроювання даного розміру залежатиме точність автоматичного одержання фаски. Для запобігання самозгвинчування упор фіксується контргайкою 26.

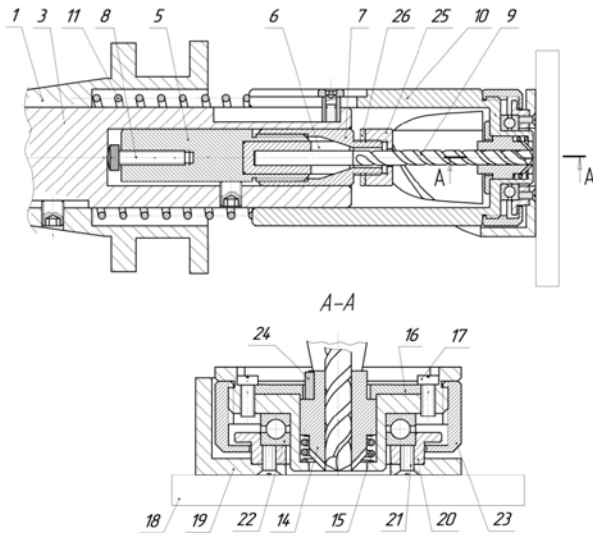


Рис. 4.11. Оправка для обробки отворів під нарізання кріпильної різі (патент України № 16598)

Налагоджений на розмір цанговий патрон з інструментом вставляють у штангу і закріплюють стопорним гвинтом. У гільзу 10 встановлюють пружину 15, кондукторну втулку 14, фіксують кришкою 16 і гвинтами 17. На штангу 3 вдягається пружина 11 і в паз штанги вставляється шпонка 12 із гвинтом 13. Гільза 10 вдягається на штангу 3 у такий спосіб, щоб шпонка 12 потрапила в паз гільзи. Гільза 10 переміщується в осьовому напрямку по штанзі 3 доти, поки різальний інструмент 9 не виявиться на одному рівні з нижньою частиною кондукторної втулки 14, після чого гвинтом 13 затискається шпонка 12.

Оправка працює в такий спосіб. Автооператор бере оправку з інструментального магазину і встановлює в шпиндель верстата. Оправка підводиться до оброблюваної заготовки і основою ножа 19 упирається в поверхню оброблюваної деталі. Обертання від шпинделя передається на корпус оправки 1 та

штангу 3. Від штанги 3 через шпонку 12 обертання передається на гільзу 10, кришку 16 і через шпонку 24 на кондукторну втулку 14, а також на цанговий патрон із закріпленим у ньому різальним інструментом 9. Нерухомими залишаються лише притиснуті до оброблюваної деталі ніж 19 та п'ята 20, які через підшипник 22 і гільзу 10 притискає пружина 11. Різальний інструмент 9 направляється по обертовій кондукторній втулці 14. При подальшому опусканні шпинделя штанга 3 переміщається в осьовому напрямку всередині гільзи 10. Різальний інструмент виконує обробку отвору. Не доходячи до необхідної глибини отвору на величину, що дорівнює величині фаски, упор 25 натискає на кондукторну втулку 14, що призводить до її осьового переміщення. Кондукторна втулка 14 вривається в оброблювану деталь 18 різальною частиною. Відбувається обробка фаски отвору на задану глибину. Після обробки отвору на задану глибину шпиндель піднімається, штанга 3 виводиться з гільзи 10, що залишається нерухомою під дією пружини 11 доти, поки шпонка 12 не досягне кінця паза в штанзі.

Порівняльний аналіз технологічних операцій свердління 20 отворів у деталі типу «кришка» показав, що застосування запропонованих свердлильних оправок дозволяє підвищити продуктивність обробки допоміжних отворів у порівнянні з технологічним процесом обробки за традиційною схемою: центрування – свердління; центрування – свердління – зенкування. Підвищення продуктивності обробки отворів за рахунок скорочення переходу зацентровки становить близько 3%, за рахунок скорочення переходів зацентрування та зенкування – близько 7%.

### **4.3. Вибір режимів максимальної продуктивності свердління отворів на багатоцільових верстатах**

Об'єктивний аналіз закономірностей технічного прогресу, засобів виробництва і технологічних процесів, виявлення причинно-наслідкових зв'язків і залежностей,

кількісний їх опис, оцінка ефективності технологічних систем, а також вирішення часткових питань їх проектування й експлуатації здійснюється за допомогою різних критеріїв оптимальності.

Для вибору режимів різання, що відповідають максимальній продуктивності обробки допоміжних отворів, як критерій оптимальності доцільно використовувати критерій «інтенсивність формоутворення» [27], який має ієрархічну структуру, що складається, стосовно процесу обробки на багатоцільових верстатах, з рівнів технологічної, циклової і нормативної інтенсивності формоутворення [28].

Технологічна інтенсивність формоутворення  $W_T$ , мм/хв, комплектом різальних інструментів, необхідних для обробки деталі, характеризує фіктивну продуктивність верстата без урахування витрат часу на неформоутворювальні рухи і дії:

$$W_T = \sum_{i=1}^{N_{II}} n_i \cdot S_{oi} ,$$

де  $n_i$ ,  $S_{oi}$  – параметри режиму різання для  $i$ -го технологічного переходу;

$N_{пер}$  – число технологічних переходів, необхідних для обробки деталі, шт.

Циклова інтенсивність формоутворення  $W_{Ц}$ , мм/хв, обчислюється з урахуванням циклових витрат часу на швидкі переміщення деталі чи інструмента, зміну інструмента, установку і зняття деталі та ін., що оцінюються за допомогою коефіцієнта циклової інтенсивності формоутворення  $K_{Ц}$  :

$$W_{Ц} = W_T \cdot K_{Ц} ,$$

$$K_{Ц} = \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} / \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{БПi} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{CTj} + \sum_{j=1}^{N_K} \frac{T_{CЛj}}{T_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{oi} + T_{C3} \right) ,$$

де  $T_{oi}$  – основний (технологічний) час виконання  $i$ -го переходу, хв;

$T_{БП}$  – час швидких переміщень деталі чи інструмента, пов'язаний з виконанням  $i$ -го переходу, хв;

$T_{СТj}$  – час зміни  $j$ -го інструмента після виконання технологічної задачі, хв;

$T_{СЛj}$  – час зміни  $j$ -го інструмента після випадкової відмови, хв;

$T_j$  – розрахунковий період стійкості  $j$ -го інструмента, хв;

$N_k$  – кількість інструментів у технологічно необхідному для обробки деталі комплекті, шт.;

$T_{СЗ}$  – час зміни заготовки, хв.

Нормативна інтенсивність формоутворення  $W_H$ , мм/хв визначається з урахуванням позациклових витрат часу на технологічне й організаційне обслуговування робочого місця, на відпочинок та особисті потреби в процентах від оперативного часу ( $a_{mex}$ ,  $a_{орг}$ ,  $a_{відп}$  відповідно), а також підготовчо-заклучного часу  $T_{ПЗ}$ .

$$W_H = W_T \cdot K_H,$$

де  $K_H$  – коефіцієнт нормативної інтенсивності формоутворення.

$$K_H = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Pi}} T_{O_i}}{\left( 1,08 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} T_{O_i} + \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} T_{БП_i} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{СТj} + \sum_{j=1}^{N_K} \frac{T_{СЛj}}{T_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} T_{O_i} + T_{СЗ} \right) + \frac{T_{ПЗ}}{N_{Д}} \right)},$$

де  $N_{Д}$  – число деталей у партії, шт.

При розрахунку режимів різання на БВ необхідно враховувати ряд факторів, які діють у процесі обробки деталі, й обмеження, що накладаються на режими різання, тобто технічні обмеження.

До технічних обмежень належать:

1. Потужність електродвигуна привода головного руху верстата

$$M_{кр} = C_z \cdot K_z \cdot S_z^y \cdot D_z^z \cdot HB^{n_z}.$$

Крутний момент на шпинделі верстата, що відповідає потужності електродвигуна головного привода верстата і числу обертів шпинделя:

$$M_{крдоп} = \frac{975 \cdot 10^3 \cdot N_H \cdot \eta}{n}.$$

Обмеження за потужністю електродвигуна привода головного руху верстата  $M_{кр} \leq M_{крдоп}$ .

## 2. Найменша допустима швидкість різання.

Швидкість різання не може бути меншою за деяку визначену величину  $V_{тп}$ , тому що при надмірному її зниженні змінюються і погіршуються умови стружкоутворення, на різальних кромках з'являється наріст, підсилюються викришування і зношеність різального інструменту  $V \geq V_{\min}$ . Число обертів шпинделя не може бути меншим, ніж число обертів, передбачених кінематикою верстата,  $n \geq n_{вер.\min}$ .

## 3. Найбільша можлива швидкість різання.

Для багатьох інструментів чистової і напівчистової обробки отворів швидкість різання не може бути більшою за деяку величину, обумовлену для кожного інструмента на підставі практичних даних  $V \leq V_{\max}$ . При значному збільшенні швидкості різання за припустимі межі спостерігається швидка втрата інструментом розміру внаслідок підвищеного зносу різальних кромок і розбивання діаметра отвору.

Число обертів шпинделя не може бути більшим, ніж число обертів, передбачених кінематикою верстата,  $n \leq n_{вер.\min}$ .

4. Найбільша подача, що допускається міцністю чи жорсткістю інструмента і оброблюваної деталі, умовами розміщення стружки в канавках інструментів, вимогами до шорсткості оброблюваної поверхні й міцністю механізмів подачі верстата.

Під час використання максимальної подачі значення осьової сили різання не повинне перевищувати силу подачі, що допускається міцністю механізму подачі верстата  $P_x \leq P_{\text{дон.вер}}$  :

$$P_x = C_x \cdot K_x S^y x D^z x HB^{n_x}.$$

5. Найменша подача, припустима кінематикою верстата. Визначена вище технологічно припустима подача не може бути меншою за найменшу подачу, що може бути встановлена на верстаті  $S \geq S_{\text{вер.min}}$  .

6. Найбільша подача, припустима кінематикою верстата. Очевидно, що технологічно припустима подача не може бути більшою за найбільшу подачу, що може бути встановлена на верстаті  $S \leq S_{\text{вер.max}}$  .

До числа розглянутих обмежень можуть бути додані й інші, якщо є можливість виразити їх у вигляді функцій від елементів режиму різання. Однак наведені обмеження є основними, які впливають на вибір режимів різання найбільш істотно. Оскільки ті чи інші обмеження в більшості випадків знижують ефективність процесу, їх необхідно по можливості усувати шляхом виконання різних технологічних, конструктивних та організаційно-виробничих заходів. При розрахунку режимів різання необхідно враховувати мінімум технічних обмежень, які неможливо чи недоцільно усунути.

З урахуванням технічних обмежень математична модель вибору режимів різання, що забезпечує максимальну інтенсивність формоутворення свердління отворів на БВ:

$$W_H = \sum_{i=1}^{N_H} n_i \cdot S_{o_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_H} T_{o_i}}{\left( 1,08 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_H} T_{o_i} + \sum_{i=1}^{N_H} T_{\text{БП}i} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{\text{СТ}j} + \sum_{j=1}^{N_K} \frac{T_{\text{СЛ}j}}{T_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_H} T_{o_i} + T_{\text{СЗ}} \right) + \frac{T_{\text{ПЗ}}}{N_D} \right)}.$$



$$\begin{aligned}
 V &\geq V_{\min}, \\
 V &\leq V_{\max}, \\
 n &\geq n_{\text{вер min}}, \\
 n &\leq n_{\text{вер max}}, \\
 S &\geq S_{\text{вер.min}}, \\
 S &\leq S_{\text{вер max}}, \\
 M_{\text{кр}} &\leq M_{\text{крдоп}}.
 \end{aligned}$$

Використовуючи як критерій оптимальності показник нормативної інтенсивності формоутворення, розв'язувалася задача вибору найвигідніших періодів стійкості інструментів, що забезпечують максимальну продуктивність обробки. При цьому використовувалася стійкісна залежність Тейлора, що має для свердління такий вигляд:

$$V = \frac{C_V \cdot D^{q_V} \cdot K_V}{T^m \cdot S_O^{y_V}},$$

де  $C_V$  – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу, матеріалу інструмента, його геометричних параметрів та ін.;

$D$  – діаметр оброблюваного отвору, мм;

$K_V$  – поправковий коефіцієнт;

$m$ ,  $q_V$ ,  $y_V$  – показники степеня, що залежать від умов обробки.

Для свердління отворів у заготовках з різних матеріалів нами досліджено вплив стійкості свердел на технологічну інтенсивність формоутворення та коефіцієнт нормативної інтенсивності формоутворення (рис. 4.12). Вихідні дані:  $N_{\text{П}}=N_{\text{К}}=25$  шт.;  $T_{\text{СТ}}=0,2$  хв;  $T_{\text{БП}}=0,1$  хв;  $T_{\text{СЗ}}=3$  хв;  $T_{\text{ПЗ}}=25$  хв;  $N_{\text{Д}}=500$  шт.; параметри оброблюваних отворів:  $D=10$  мм;  $L=30$  мм.

Різна динаміка зміни характеру кривих  $W_{\text{T}}=f(T)$  і  $K_{\text{Н}}=f(T)$  зумовлює наявність екстремуму кривої  $W_{\text{Н}}=W_{\text{T}} \cdot K_{\text{Н}}$ , що відповідає максимальній інтенсивності формоутворення і продуктивності обробки деталі на БВ.

На рис. 4.13 наведені графіки залежності  $W_H=f(T)$  при свердлінні отворів різних розмірів у заготовках із сірого чавуна твердосплавними свердлами.

Як бачимо, параметри отвору не впливають на положення екстремуму ( $T_{\text{опт}}=24$  хв), тобто можна оперувати поняттям «стійкість комплекту однотипних інструментів».

Істотний вплив на величину оптимального періоду стійкості має кількість інструментів у комплекті. Графіки, наведені на рис. 4.14, підтверджують, що зі збільшенням числа інструментів у комплекті оптимальна стійкість зростає.

Це також доводять графіки залежності оптимальної стійкості інструментів від їх числа для різних видів обробки і різних матеріалів заготовки та інструмента, зображені на рис. 4.15.

Зі збільшенням часу зміни одного інструмента оптимальний період стійкості зростає (рис. 4.16 і 4.17).

На підставі отриманих оптимальних значень періодів стійкості для різних сполучень матеріалів заготовки і різальних інструментів розраховані швидкості різання та частоти обертання інструментів, графіки залежності яких від діаметрів отворів показані на рис. 4.18.

Рівні запропонованих режимів різання значно перевищують рекомендовані загальномашинобудівними нормативами. Так, при обробці алюмінію для свердел діаметром 8–12 мм швидкість різання зростає на 30–55% залежно від часу зміни і числа інструментів у комплекті; для свердел діаметром 12–24 мм на 45–70%. При обробці сталі швидкість різання зростає для свердел діаметром 8–12 мм на 39–70%; 12–24 мм – на 63–100%.

До найбільш застосовуваних економічних критеріїв належать собівартість і зведені витрати.

Звичайно, оперують технологічною собівартістю, що враховує лише ті статті витрат, величина яких змінюється при переході від одного технологічного процесу до іншого, оскільки інші цехові витрати, як правило, при цьому не змінюються.

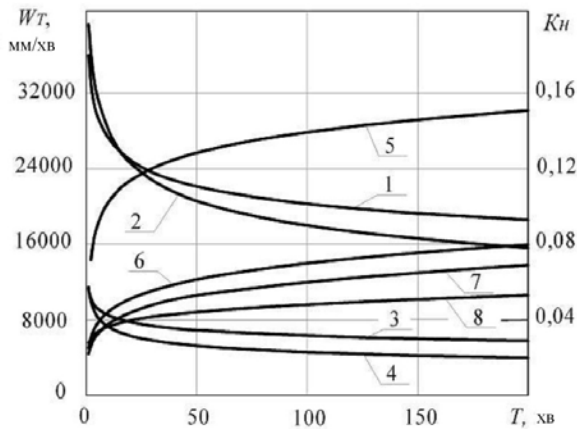


Рис. 4.12. Графіки залежності технологічної інтенсивності формоутворення (криві 1–4) і коефіцієнта нормативної інтенсивності формоутворення (криві 5–8) від стійкості свердел при таких сполученнях оброблюваного й інструментального матеріалу:  
 1 – алюмінієвий сплав (АС), Р6М5;  
 2 – сірий чавун (СЧ), ВК6; 3 – СЧ, Р6М5;  
 4 – сталь конструкційна (СК), Р6М5

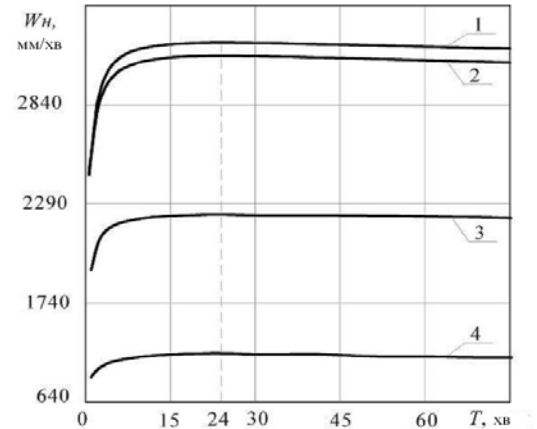


Рис. 4.13. Графіки залежності нормативної інтенсивності формоутворення від стійкості інструментів і розмірів оброблюваних отворів при свердлінні заготовок із СЧ твердосплавними свердлами:  
 1 – D=5 мм; L=100 мм;  
 2 – D=25 мм, L=100 мм;  
 3 – D=25 мм, L=60 мм;  
 4 – D=25 мм, L=30 мм.

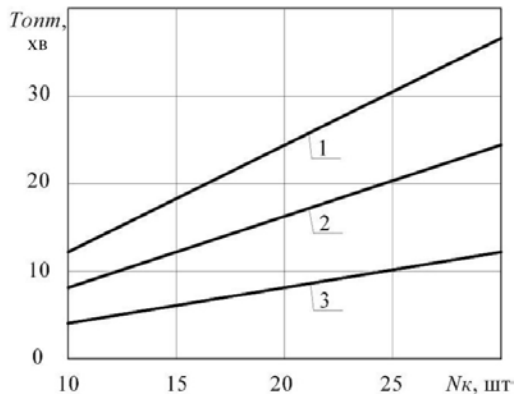


Рис. 4.14. Графіки залежності оптимальної стійкості свердел із ВК6 від числа різальних інструментів при обробці заготовки із СЧ:  
 1 –  $T_{СЛ}=0,1$  хв; 2 –  $T_{СЛ}=0,2$  хв;  
 3 –  $T_{СЛ}=0,3$  хв.

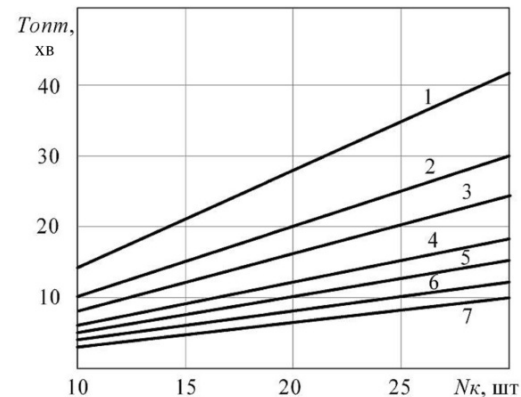


Рис. 4.15. Графіки залежності оптимальної стійкості інструмента від числа різальних інструментів:  
 1 – свердління СЧ, Р6М5; свердління АС, Р6М5; зенкерування СЧ, Р6М5; 2 – свердління СК, Р6М5; розточування СЧ, ВК6; розточування СК, Т15К6; 3 – свердління СЧ, ВК8; 4 – фрезерування СЧ 20, Р6М5; 5 – розточування АС, Р18; зенкерування СК, Р6М5; 6 – фрезерування СК, Р6М5, фрезерування АС, Р6М5; 7 – фрезерування СК, Т15К6

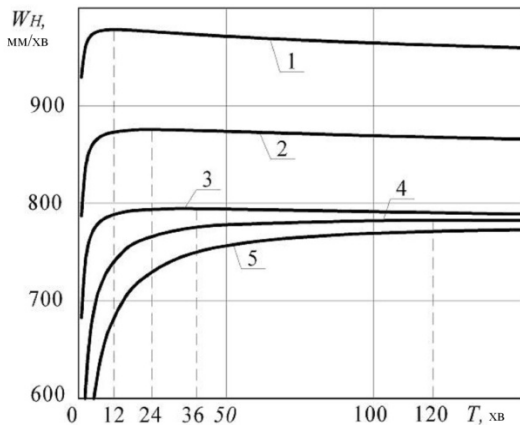


Рис. 4.16. Графіки залежності нормативної інтенсивності формоутворення від стійкості та часу зміни одного інструмента (матеріал заготовки СЧ, інструментів ВК8):

1 –  $T_{сл}=0,1$  хв; 2 –  $T_{сл}=0,2$  хв;  
 3 –  $T_{сл}=0,3$  хв; 4 –  $T_{сл}=1$  хв; 5 –  $T_{сл}=2$  хв

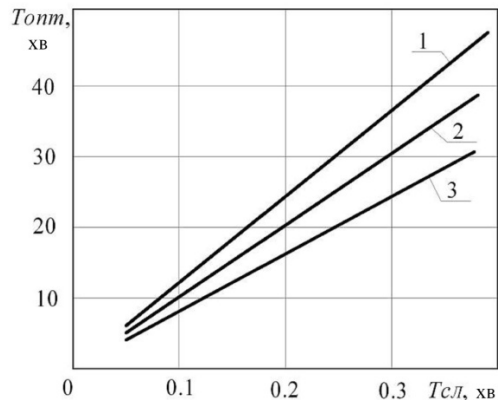
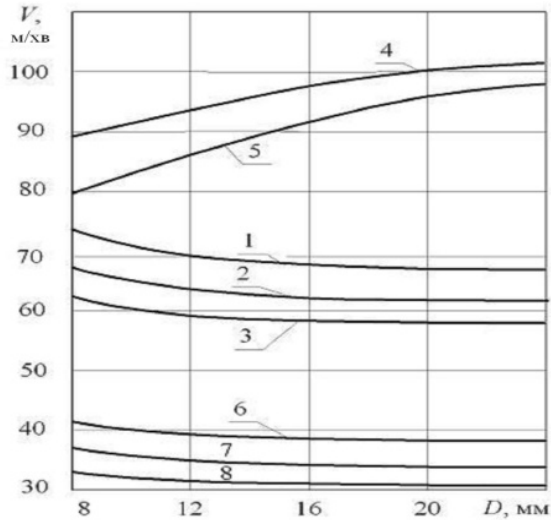
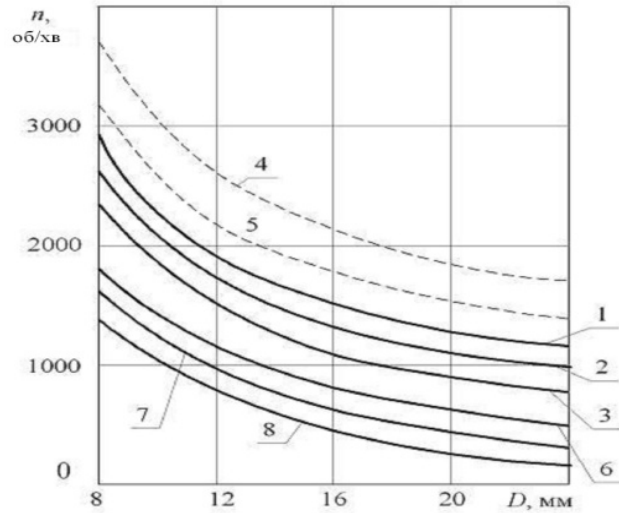


Рис. 4.17. Графіки залежності оптимальної стійкості свердел від часу зміни одного інструмента при свердлінні СЧ свердлами з

ВК8: 1 –  $N_к=30$  шт.; 2 –  $N_к=25$  шт.;  
 3 –  $N_к=20$  шт.



а)



б)

Рис. 4.18. Графіки залежності швидкості різання (а) та частоти обертання (б) при свердлінні від діаметра оброблюваного отвору, матеріалу заготовки й інструмента, часу зміни інструмента й числа інструментів у комплекті:

- 1 – АС, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=10$ ; 2 – АС, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=20$ ;
- 3 – АС, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,4$  хв,  $N_K=20$ ; 4 – СЧ, ВК8,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=10$ ;
- 5 – СЧ, ВК8,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=20$ ; 6 – СК, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=10$ ;
- 7 – СК, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,2$  хв,  $N_K=20$ ; 8 – СК, Р6М5,  $T_{СЛ}=0,4$  хв,  $N_K=20$

Технологічна собівартість операції  $C_D$ , грн,

$$C_D = Z_i + C_o + T_{умк},$$

де  $Z_i$  – витрати на різальний інструмент, грн;

$C_o$  – вартість однієї хвилини роботи верстата, грн;

$T_{умк}$  – штучно-калькуляційний час виконання операції, хв [28]:

$$T_{умк} = 1,08 \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_{II}} \frac{l_i}{n_i \cdot S_{O_i}} + \sum_{i=1}^{N_{II}} T_{БПi} + \sum_{j=1}^{N_K} T_{CTj} + \frac{\sum_{j=1}^{N_K} T_{CПj}}{T} + \sum_{i=1}^{N_{II}} \frac{l_i}{n_i \cdot S_{O_i}} + T_{C3} \right) + \frac{T_{ПЗ}}{N_D}.$$

Витрати на різальний інструмент  $Z_i$ , грн,

$$Z_i = \sum_{j=1}^{N_K} \left( \frac{\left( \frac{z_j}{p_j} + 1 \right) \cdot \sum_{i=1}^{N_{II}} \frac{l_i}{n_i \cdot S_{O_i}}}{T} \right),$$

де  $z_j$  – витрати, що припадають на  $j$ -й інструмент, грн;

$p_j$  – кількість переточувань  $j$ -го інструмента;

$l_i$  – довжина робочого ходу інструмента, мм.

З урахуванням технічних обмежень математична модель вибору економічних режимів різання при обробці допоміжних отворів на БВ за мінімумом технологічної собівартості деталі має вигляд

$$C_D = Z_i + C_o + T_{умк} \rightarrow \min.$$

$$V \geq V_{\min},$$

$$V \leq V_{\max},$$

$$n \geq n_{вер. \min},$$

$$n \leq n_{вер. \max},$$

$$S \geq S_{\text{вер. min}},$$

$$S \leq S_{\text{вер. max}},$$

$$M_{\text{кр}} \leq M_{\text{крдоп}},$$

$$Z_i \leq Z_{i \text{ max}}.$$

Якщо технологічні процеси, що порівнюються, пов'язані з різними за величиною капітальними витратами, то найвигідніші розв'язки знаходимо за мінімальною величиною зведених витрат  $C_{np}$ , грн:

$$C_{np} = C_x + \varepsilon_n \cdot K_n,$$

де  $C_x$  – повна собівартість річного обсягу випуску продукції, грн/рік;

$K_n$  – сумарна величина капітальних вкладень, грн;

$\varepsilon_n$  – норма ефективності додаткових капітальних вкладень.

$$C_x = c_x \cdot Q_p,$$

де  $c_x$  – повна собівартість виробу, грн/шт.;

$Q_p$  – річний обсяг випуску продукції, шт./рік.

$$c_x = C_{\text{вир}} + C_{\text{нев}},$$

де  $C_{\text{вир}}$ ,  $C_{\text{нев}}$  – виробнича собівартість деталі та витрати, не пов'язані з виробництвом.

$$C_{\text{вир}} = C_{\text{ц}} + C_{\text{осв}} + C_{\text{бр}} + C_{\text{нз}},$$

де  $C_{\text{ц}}$  – цехова собівартість виробу;  $C_{\text{осв}}$  – витрати на підготовку й освоєння виробництва;  $C_{\text{бр}}$  – витрати через брак;

$C_{\text{нз}}$  – загальнозаводські витрати.

$$C_{\text{ц}} = C_{\text{м}} + C_{\text{т}},$$

де  $C_{\text{м}}$  – витрати на матеріали;  $C_{\text{т}}$  – технологічна собівартість.



Математична модель вибору економічних режимів різання при обробці допоміжних отворів на БВ за величиною зведених витрат має вигляд

$$\begin{aligned}
 C_{зв} &= C_x + \varepsilon_n \cdot K_n \rightarrow \min. \\
 V &\geq V_{\min}, \\
 V &\leq V_{\max}, \\
 n &\geq n_{вер.\min}, \\
 n &\leq n_{вер.\max}, \\
 S &\geq S_{вер.\min}, \\
 S &\leq S_{вер.\max}, \\
 M_{кр} &\leq M_{крдон}, \\
 Z_i &\leq Z_{i\max}.
 \end{aligned}$$

Ці критерії були покладені в основу функціональних методик розрахунків економічної ефективності нової техніки і технологій.

У сучасних умовах дії законів ринкової економіки і конкурентної боротьби метою виробничої діяльності підприємств є одержання максимального прибутку, тому доцільно використовувати критерії, що характеризують величину прибутку. Наприклад, величина прибутку, одержана підприємством за одиницю часу експлуатації технологічної системи, характеризує інтенсивність прибутку і може розглядатися як техніко-економічний критерій оптимальності.

Інтенсивність прибутку  $I_{II}$ , грн/хв,

$$I_{II} = \frac{C_o - C_z - Z_i - C_o \cdot T_{штк.}}{T_{штк.}},$$

де  $C_o$  – ціна деталі, грн;  $C_z$  – ціна заготовки, грн.

Математична модель вибору оптимальних режимів різання на підставі критерію інтенсивності прибутку

$$I_{II} = \frac{C_{\partial} - C_{з} - Z_i - C_o \cdot T_{штк}}{T_{штк}}$$

$$V \geq V_{\min},$$

$$V \leq V_{\max},$$

$$n \geq n_{\text{вер. min}},$$

$$n \leq n_{\text{вер. max}},$$

$$S \geq S_{\text{вер. min}},$$

$$S \leq S_{\text{вер. max}},$$

$$M_{кр} \leq M_{кр\text{доп}},$$

$$C_{\partial} \geq C_{\partial \min},$$

$$C_{з} \leq C_{з \max},$$

$$Z_i \leq Z_{i \max}.$$

Виконані аналітичні дослідження процесів обробки отворів у корпусних деталях із сірого чавуна спіральними свердлами, які оснащені різальною частиною із твердого сплаву ВК6 [29], показали, що значення оптимальної стійкості різальних інструментів, розраховані з використанням різних критеріїв оптимальності, істотно різняться між собою (рис. 4.19).

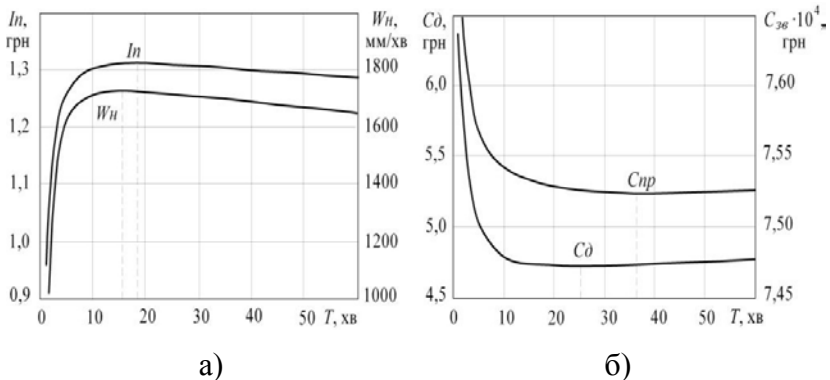


Рис. 4.19. Визначення оптимальної стійкості свердел за різними критеріями оптимальності: а –  $W_H$ ,  $I_{II}$ ; б –  $C_{зв}$ ,  $C_{\partial}$

Стійкість інструментів, що забезпечує максимальну інтенсивність формоутворення і найбільш високу інтенсивність прибутку, становить відповідно 16 та 18 хв, тоді як стійкість інструментів, що забезпечує мінімальну собівартість виробу і мінімальні зведені витрати, становить відповідно 37 та 61 хв.

Нижче розглядаються різні параметри, що впливають на критерії оптимальності й оптимальний період стійкості інструментів. Так, зі збільшенням діаметрів інструментів зростають собівартість деталі й зведені витрати, тоді як інтенсивність прибутку й інтенсивність формоутворення падають (рис. 4.20).

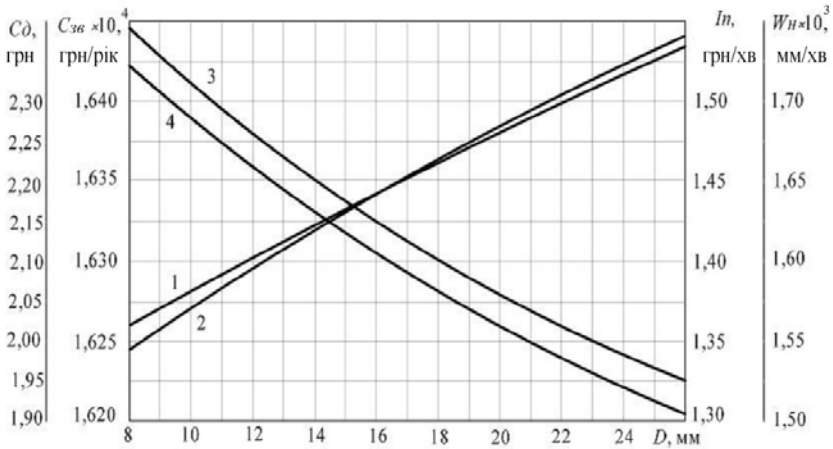


Рис. 4.20. Вплив діаметрів свердел на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_n$ ; 4 –  $W_H$

На рис. 4.21 наведені графіки залежності оптимальної стійкості інструментів від їхнього діаметра для різних критеріїв оптимальності. Діаметр інструментів не впливає на значення оптимальної стійкості при його визначенні за критеріями інтенсивності прибутку й інтенсивності формоутворення, що дає можливість використовувати поняття «стійкість комплексу інструментів» і призначати однаковий період стійкості для всього комплексу однотипних інструментів.

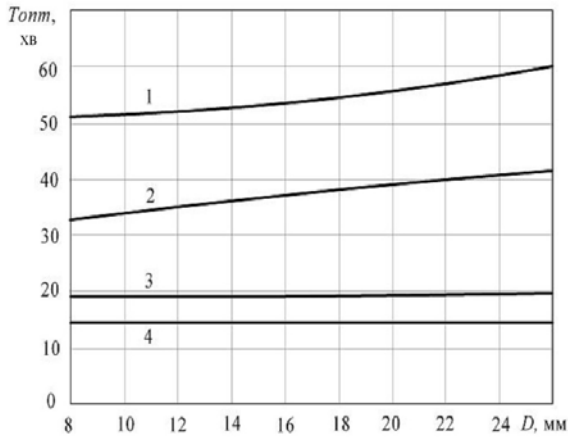


Рис. 4.21. Залежність оптимальної стійкості свердел від їх діаметрів, розрахована за критеріями оптимальності:

1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_o$ ; 3 –  $I_п$ ; 4 –  $W_H$

Зі збільшенням числа інструментів, необхідних для обробки деталі, збільшується основний і допоміжний час, а також економічні витрати. Це призводить до зростання собівартості деталі, збільшення зведених витрат і зниження інтенсивності прибутку (рис. 4.22). До того ж збільшення кількості інструментів призводить до значного збільшення періодів оптимальної стійкості інструментів, розрахованих за всіма критеріями оптимальності, що спричинює істотне зниження швидкості різання і продуктивності обробки (рис. 4.23).

Визначення оптимального періоду стійкості інструментів за критерієм інтенсивності прибутку дозволяє одержувати максимальну інтенсивність прибутку при досить високій продуктивності обробки.

Зі збільшенням часу зміни одного інструмента збільшуються витрати часу, не пов'язані з формоутворювальними рухами, внаслідок чого відбувається істотне зниження інтенсивності формоутворення та інтенсивності прибутку, в той час як собівартість деталі збільшується (рис. 4.24). Це особливо

актуально, коли для обробки деталі необхідно використовувати велику кількість різальних інструментів.

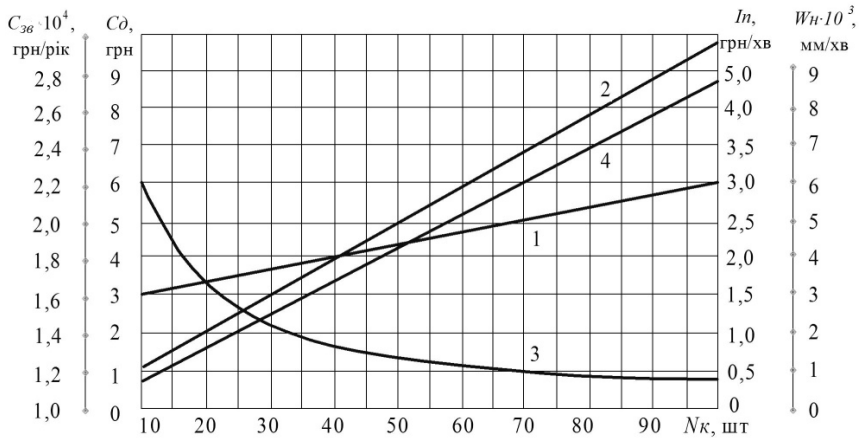


Рис. 4.22. Вплив числа інструментів у комплекті на величину критеріїв оптимальності:

1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_p$ ; 4 –  $W_n$

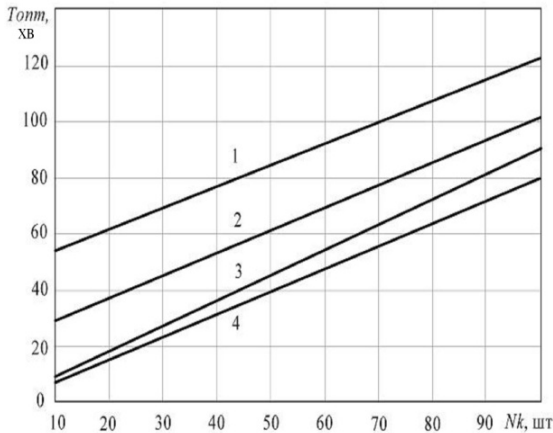


Рис. 4.23. Залежність оптимальної стійкості свердел від числа інструментів у комплекті, розрахована за критеріями оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_p$ ; 4 –  $W_n$

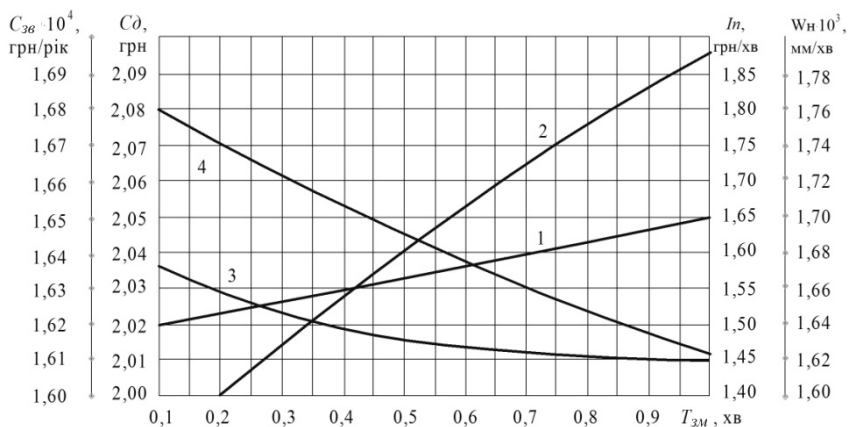


Рис. 4.24. Вплив часу зміни інструмента на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_o$ ; 3 –  $I_{п}$ ; 4 –  $W_{н}$

Оптимальна стійкість комплексу інструментів, розрахована за всіма критеріями оптимальності, збільшується зі збільшенням часу зміни одного інструмента (рис. 4.25), внаслідок чого знижується продуктивність обробки. При розрахунку періоду оптимальної стійкості за критерієм інтенсивності прибутку його значення найбільш близьке до значення максимальної інтенсивності формоутворення.

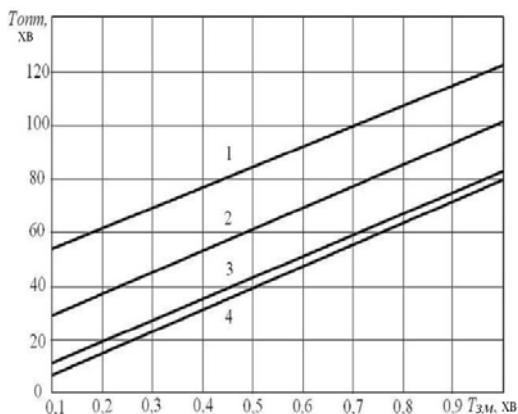


Рис. 4.25. Залежність оптимальної стійкості свердел від часу зміни одного інструмента, розрахована за критеріями оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_o$ ; 3 –  $I_{п}$ ; 4 –  $W_{н}$

Для збільшення продуктивності устаткування й інтенсивності прибутку, а також для зниження собівартості деталі необхідно, по можливості, максимально скорочувати кількість інструментів у комплекті й час, затрачуваний на заміну інструмента. Для цього доцільно використовувати технологічне оснащення, що дозволяє скоротити час заміни та число інструментів, комбінований різальний інструмент, а також максимально використовувати уніфіковані й стандартизовані елементи конструкції деталі.

Зі збільшенням вартості верстатохвилини збільшуються економічні витрати, пов'язані з виробництвом, що приводить до збільшення собівартості деталі, зростання зведених витрат і зниження інтенсивності прибутку (рис. 4.26 і 4.27).

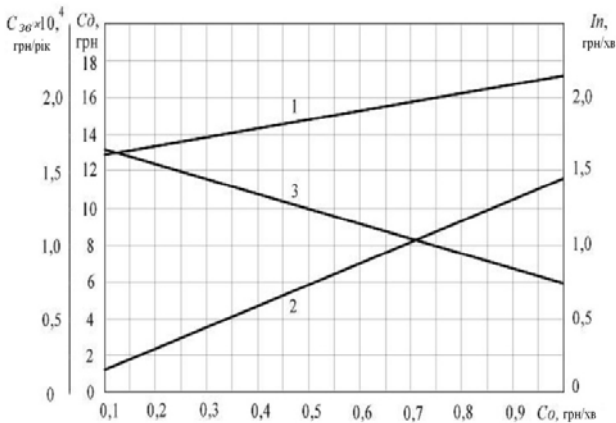


Рис. 4.26. Вплив вартості верстатохвилини на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_0$ ; 3 –  $I_P$

Оптимальна стійкість при визначенні її за економічними критеріями також істотно знижується зі збільшенням вартості верстатохвилини і наближується до значення оптимальної стійкості, що забезпечує максимальну інтенсивність прибутку. При використанні складного і дорогого устаткування з високою вартістю верстатохвилини розрахунок режимів різання доцільно проводити за критерієм інтенсивності прибутку. Значення

оптимальної стійкості, обумовлені критерієм максимальної інтенсивності прибутку, залишаються незмінними для будь-якої вартості верстатохвилини і забезпечують поряд із максимальною інтенсивністю прибутку високу продуктивність обробки.

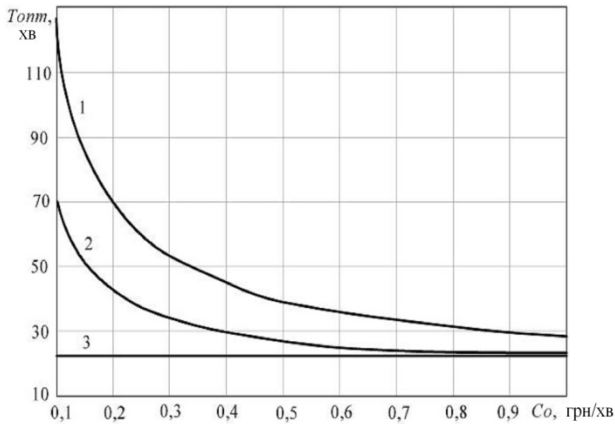


Рис. 4.27. Залежність оптимальної стійкості свердел від вартості верстатохвилини, розраховані за критеріями оптимальності: 1 –  $C_{ze}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_P$

Значно впливає на рівні критеріїв оптимальності ціна інструмента, зміна якої впливає на всі критерії оптимальності (рис. 4.28).

Зі зміною ціни інструмента значення оптимальної стійкості також змінюється (рис. 4.29), але на відміну від значень періодів оптимальної стійкості, розрахованих за критеріями технологічної собівартості й зведених витрат, зміна оптимальної стійкості, розрахована за критерієм інтенсивності прибутку, істотно менша.

Це дозволяє одержувати максимальну інтенсивність прибутку, не вносячи значних змін у технологічний процес, а лише незначно змінюючи швидкість різання залежно від коливань цін на різальний інструмент, забезпечуючи найбільшу продуктивність і максимальну інтенсивність прибутку в порівнянні з іншими критеріями оптимальності.



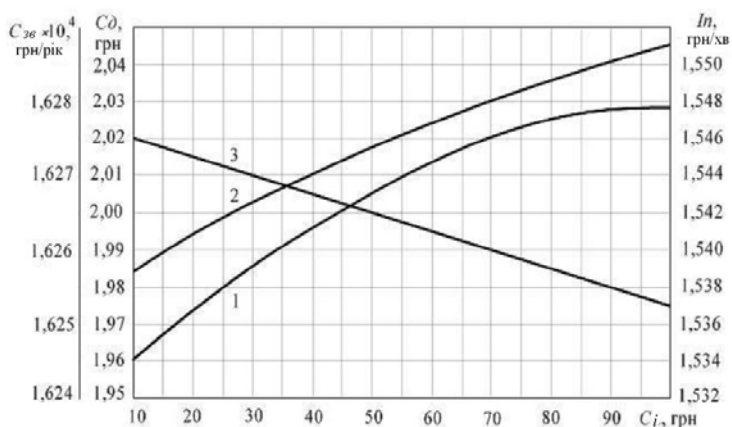


Рис. 4.28. Вплив ціни інструмента  $C_i$  на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{ze}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_{п}$

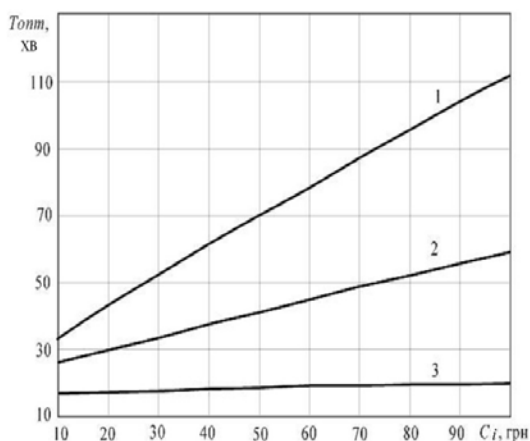


Рис. 4.29. Залежність оптимальної стійкості інструментів від ціни інструмента, розрахована за критеріями: 1 –  $C_{ze}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_{п}$

Значний вплив на економічні витрати, пов'язані з виробництвом деталі, має вартість технологічного устаткування (рис. 4.30), із зростанням якої збільшуються собівартість деталі, зведені витрати і знижується інтенсивність прибутку.

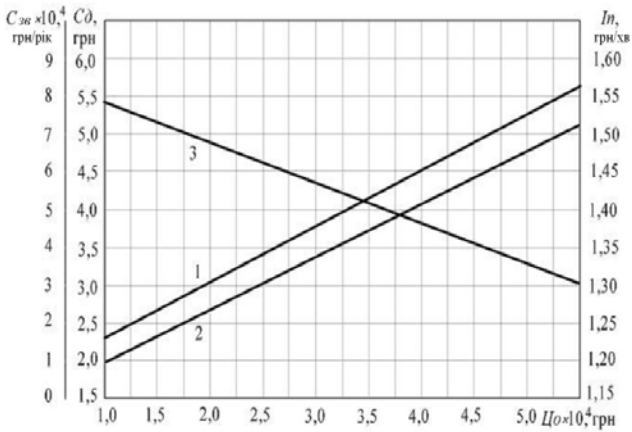


Рис. 4.30. Вплив ціни устаткування на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{зб}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_p$

Для дорогого устаткування, яким є БВ, оптимальна стійкість, розрахована за економічними критеріями оптимальності, наближається до значень оптимальної стійкості, розрахованої за критерієм інтенсивності прибутку, що не залежить від ціни устаткування і забезпечує максимальну інтенсивність прибутку при будь-якому його значенні (рис. 4.31).

На рис. 4.32 і 4.33 показані графіки залежності рівнів критеріїв оптимальності й періоду оптимальної стійкості від вартості виробничої площі, що впливає на період оптимальної стійкості інструментів.

При збільшенні річної програми випуску деталей знижуються економічні витрати, які приходяться на обробку однієї деталі, що приводить до зниження собівартості деталі й збільшення інтенсивності прибутку (рис. 4.34). У свою чергу, зведені витрати зростають, тому що збільшується число необхідних для обробки інструментів і матеріалів.

Зміна річної програми випуску не впливає на значення періодів оптимальної стійкості інструментів (рис. 4.35), розрахованих за критерієм інтенсивності прибутку і дозволяє

призначати режими різання, що не залежать від зміни кількості оброблюваних деталей.

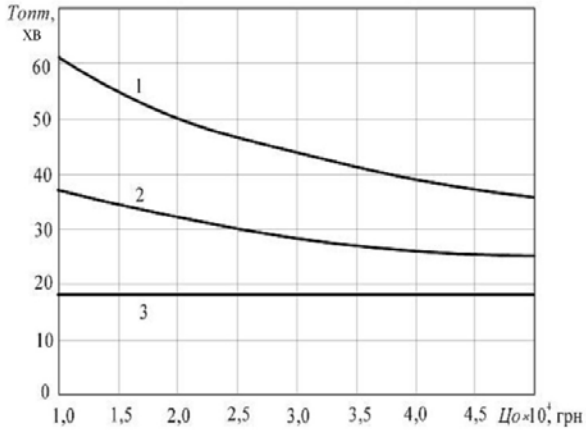


Рис. 4.31. Залежність оптимальної стійкості свердел від ціни устаткування, розрахована за критеріями оптимальності:

1 –  $C_{36}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_{II}$

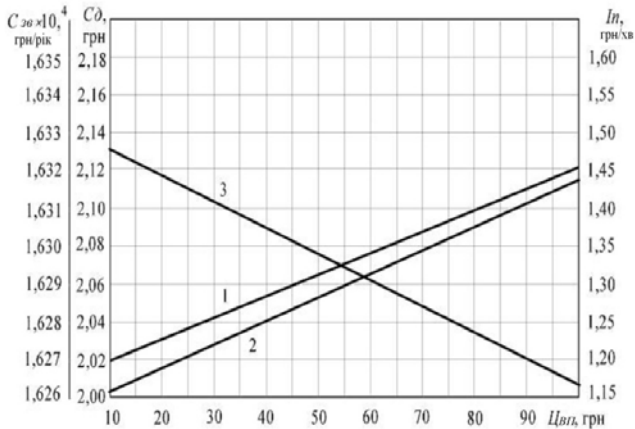


Рис. 4.32. Вплив вартості виробничої площі на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{36}$ ; 2 –  $C_d$ ; 3 –  $I_{II}$

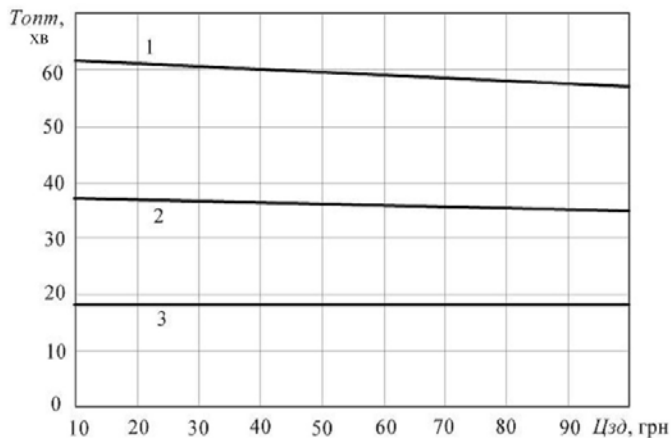


Рис. 4.33. Залежність оптимальної стійкості свердел від вартості виробничої площі, розрахована за критеріями оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_{д}$ ; 3 –  $I_{п}$

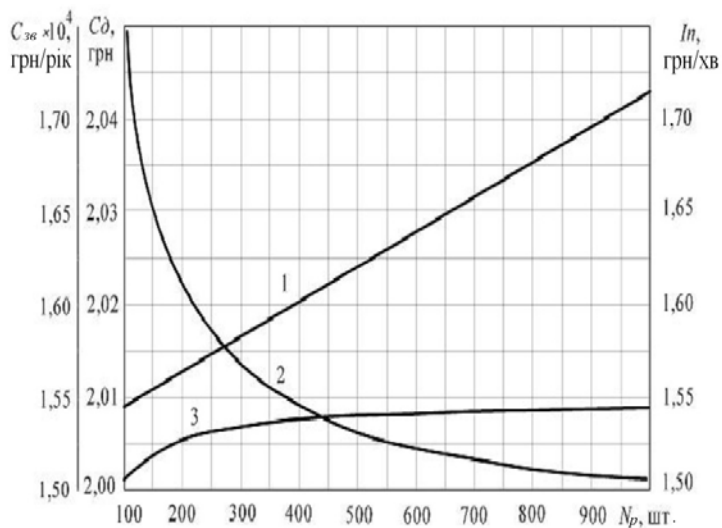


Рис. 4.34. Вплив річної програми випуску на величину критеріїв оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_{д}$ ; 3 –  $I_{п}$

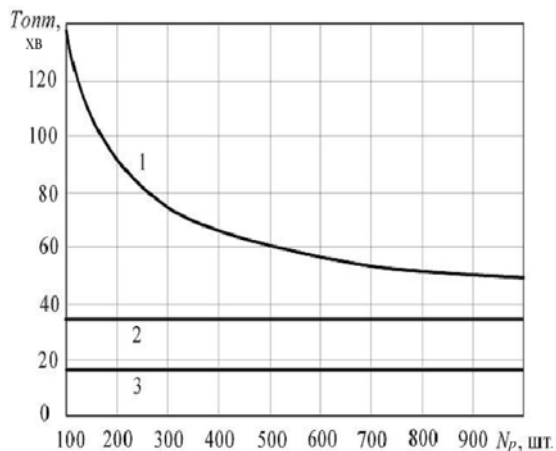


Рис. 4.35. Залежність оптимальної стійкості свердел від річної програми випуску, розрахована за критеріями оптимальності: 1 –  $C_{зв}$ ; 2 –  $C_{д}$ ; 3 –  $I_{п}$

Значно впливають на інтенсивність прибутку ціна деталі та ціна заготовки (рис. 4.36).

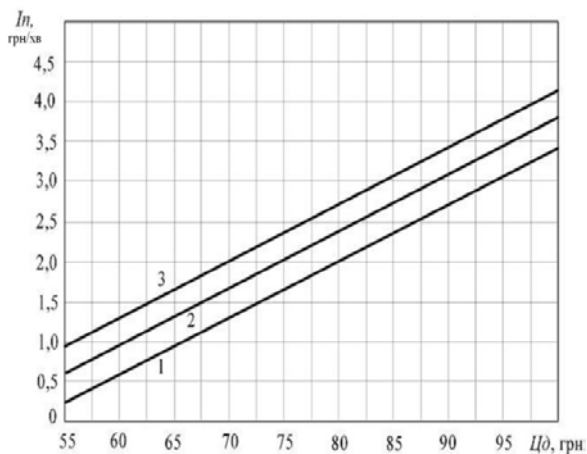


Рис. 4.36. Вплив ціни деталі й ціни заготовки на інтенсивність прибутку: 1 –  $Цз=50$  грн; 2 –  $Цз=45$  грн; 3 –  $Цз=40$  грн

Критерій оптимальності «інтенсивність прибутку» дозволяє визначати режими різання залежності від ситуації, що склалася на ринку, й адекватно реагувати на зміну ринкових цін.

Збільшення попиту на виріб приводить до зростання його ринкової ціни. Оптимальна стійкість зі зростанням ціни виробу зменшується (рис. 4.37). При цьому режими різання збільшуються і наближаються до режимів, що відповідають максимальній продуктивності устаткування.

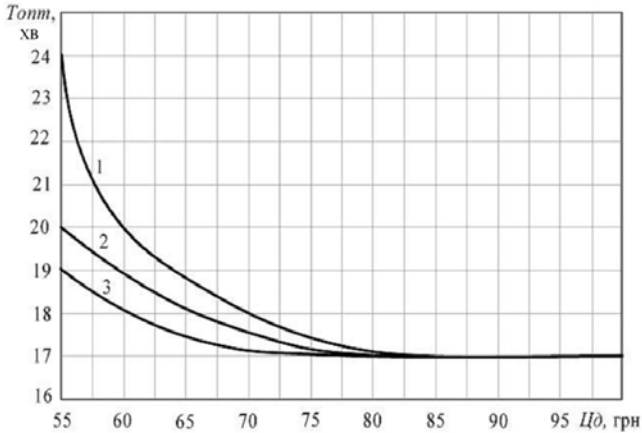


Рис. 4.37. Залежність оптимальної стійкості свердел від ціни деталі й ціни заготовки, розрахована за критерієм інтенсивності прибутку:  
1 – Цз=50 грн; 2 – Цз=45 грн; 3 – Цз=40 грн

У свою чергу, зі збільшенням ціни заготовки оптимальна стійкість збільшується, що приводить до зниження собівартості деталі, утримуючи тим самим максимальну інтенсивність прибутку.

#### 4.4. Дворізцева розточувальна оправка для обробки основних отворів

Підвищити якість поверхні основних отворів, збільшити продуктивність їх обробки дозволяє дворізцева розточувальна оправка.

З метою зменшення взаємного впливу різців і підвищення точності обробки перший різець розташований у розточувальній оправці таким чином, що діюча на нього сила різання  $P_1$  спрямована перпендикулярно до радіуса, проведеного через вершину другого різця та вісь оправки (рис. 4.38). У цьому випадку вплив переміщень першого різця на переміщення другого різця і, як наслідок, на точність обробки виявляється мінімальним [30, 31].

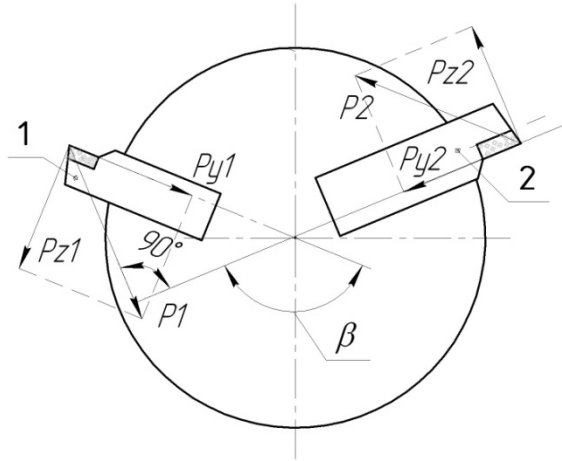


Рис. 4.38. Схема розташування різців в оправці:  
 $P_1, P_2$  – результуюча сила різання на різці 1 і 2 відповідно;  
 $P_{y1}, P_{z1}, P_{y2}, P_{z2}$  – складові сили різання на різці 1 і 2  
 відповідно

Кут  $\beta$  розташування різців один відносно іншого визначається за формулою

$$\beta = 180^\circ - (90^\circ - \alpha) = 90^\circ + \alpha ,$$

де  $\alpha$  – кут між векторами радіальної складової сили різання, що діє на чорновий різець, і рівнодійної  $P = P_z + P_y$ ;

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_z}{P_y} .$$

Конструктивно розточувальні різці в оправці розташовуються в такий спосіб: їх вершини встановлені на розмір обробки з урахуванням пружних деформацій в оправці, що виникають під час різання і зміщення один відносно іншого в напрямку подачі на величину  $S$ :

$$l_s = \left( n + \frac{1}{2} \right) S_o,$$

де  $l_s$  – відстань між вершинами різців уздовж осі оправки, мм;  
 $n$  – будь-яке ціле число, в тому числі й нуль (рис. 4.39).

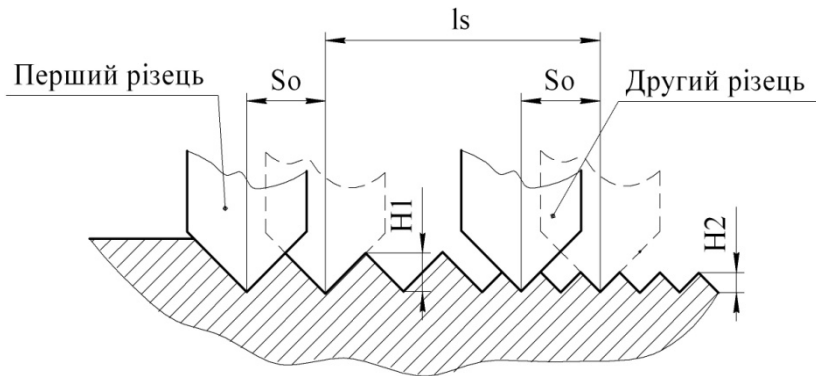


Рис. 4.39. Схема утворення нерівностей на оброблюваній поверхні під час роботи дворізевої розточувальної оправки

Різець 1 знімає основний шар матеріалу. Після нього залишаються нерівності висотою  $H1$ . Різець 2, відстаючи від першого на величину, що дорівнює половині подачі, не копіює гвинтову поверхню, що залишилася після проходу першим різцем, а зрізує її та формує нерівності висотою  $H2$ . При цьому різець 2 виконує обробку з малими перерізами зрізу.

Якщо враховувати розташування різців під кутом  $\beta$ , маємо

$$l_s = \left( \frac{1}{2} - \frac{\beta}{360} \right) \cdot S_o .$$



Як правило, на практиці, незалежно від оброблюваного матеріалу і режимів різання, беруть кут  $\beta = 135^\circ$ . У запропонованій оправці різці також розміщені під кутом  $\beta = 135^\circ$ , тому можна записати

$$l_s = \left( \frac{1}{2} - \frac{135}{360} \right) \cdot S_o = 0,125 \cdot S_o.$$

Повзун 2 оправки сполучений з корпусом 1 за допомогою з'єднання «ластівчин хвіст» (рис 4.40). У корпус і повзун вставлені відповідно перший 3 і другий 4 різці, виконані за ГОСТ 9795-84. Для налагодження різців на розмір обробки передбачені гвинти 11 і 12. Фіксуються різці гвинтами 5 і 6.

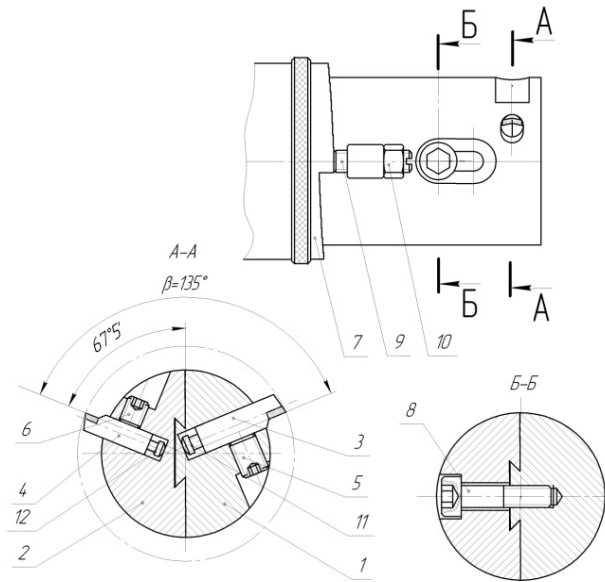


Рис. 4.40. Ескіз дворізцевої розточувальної оправки (патент України № 13672)

Для точної установки різців один відносно іншого в осьовому напрямку передбачене регульовальне кільце 7, яке має східчасту поверхню одного з торців відповідно до використовуваних подач.

Кожний ступінь зміщений відносно попереднього в осьовому напрямку на величину. Повзун фіксується на корпусі гвинтом 8. Налагодження нульового положення, при якому відсутній зсув різців, виконується мікрометричним гвинтом 9, що фіксується контргайкою 10.

Оправка працює в такий спосіб. Перший різець 3 і другий різець 4 (рис. 4.40) за допомогою гвинтів 15 і 16 встановлюються на оброблюваний розмір отвору. Регулювальне кільце 7 встановлюється на «нульовий» ступінь, при якому зміщення різців  $l_s = 0$ . Гвинтом 9 домагаються відсутності зміщення різців в осьовому напрямку.

Для налагодження оправки на певну величину подачі відпускають гвинт 8, регулювальне кільце 7 встановлюють на ступінь, що відповідає подачі, встановленій на верстаті, і затискають гвинт 8. У такий спосіб другий різець буде зміщений щодо першого на величину  $l_s$ . Під час роботи перший різець знімає основний припуск, а другий зрізує нерівності, що утворилися після обробки першим різцем, забезпечуючи зменшення шорсткості.

На рис. 4.41 показано дворізцеву розточувальну оправку, виготовлену зі сталі 18ХГТ, що призначена для встановлення в шпинделі БВ з конусністю 7:24.



Рис. 4.41. Дворізцева розточувальна оправка

Запропонована конструкція дворізевої розточувальної оправки дозволяє зменшити шорсткість обробленої поверхні та підвищити продуктивність розточування за рахунок використання одночасної дворізевої обробки.

#### **4.5. Експериментальні дослідження процесу обробки дворізевою оправкою**

Для перевірки адекватності аналітичних розрахунків зміщення вершин різців дворізевої розточувальної оправки було проведено експериментальне визначення пружних деформацій, що виникають у розточувальній оправці під впливом складової сили різання  $P_y$ . Розточувальна оправка встановлювалася в шпindelь вертикально-фрезерного верстата 6P13Ф3 і навантажувалася за схемою, наведеною на рис. 4.5. Вимір сили навантаження здійснювався динамометром. Навантаження проводилося за допомогою машинних лещат у діапазоні від 1000 Н до 5000 Н. Контроль деформації оправки здійснювався індикатором годинникового типу ИЧ10 ГОСТ 577-68 через кожні 1000 Н. Було проведено чотири серії дослідів щодо кожного з різців оправки. На рис. 4.42, 4.43 зображені схема експериментальної установки та експериментальна установка для визначення зміщення вершин різців розточувальної оправки під впливом сили  $P_y$ . Результати вимірювання подані у табл. 4.1.

На рис. 4.44 зображені графіки залежності зміщення вершин різців оправки, визначені за методом скінченних елементів й експериментально.

Порівняння результатів експериментальних досліджень та результатів отриманих аналітичними дослідженнями за методом скінченних елементів показали, що похибка визначення зміщення вершин різців за методом скінченних елементів не перевищує 12%. Розроблена скінченноелементна модель розточувальної оправки може з достатньою достовірністю описувати роботу реальної розточувальної оправки.

Таблиця 4.1

Експериментальні дані навантаження розточувальної оправки

Навантаження $F_z$ , Н	$L_1$ , мм	$L_2$ , мм	$L_3$ , мм	$L_4$ , мм	$L_{cp}$ , мм
Перший різець					
1000	0,245	0,235	0,150	0,175	0,201
2000	0,400	0,415	0,320	0,340	0,369
3000	0,580	0,560	0,490	0,520	0,538
4000	0,785	0,685	0,670	0,700	0,710
5000	1,000	0,865	0,860	0,880	0,901
Другий різець					
1000	0,265	0,255	0,250	0,255	0,256
2000	0,490	0,480	0,475	0,480	0,481
3000	0,720	0,715	0,710	0,715	0,715
4000	0,950	0,945	0,970	0,965	0,958
5000	1,200	1,180	1,190	1,185	1,189

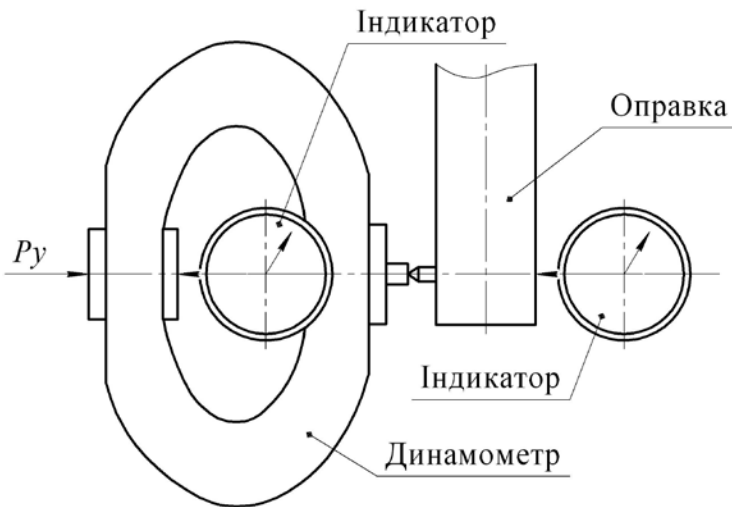


Рис. 4.42. Схема експериментальної установки визначення зміщення вершин різців розточувальної оправки

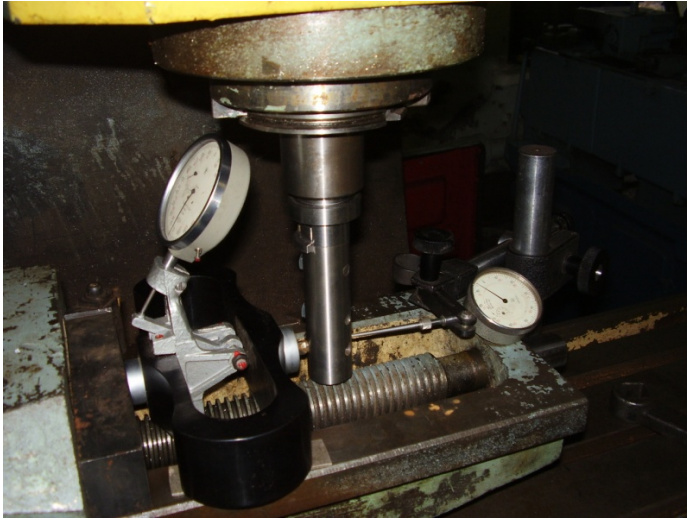


Рис. 4.43. Експериментальна установка визначення зміщення вершин різців розточувальної оправки

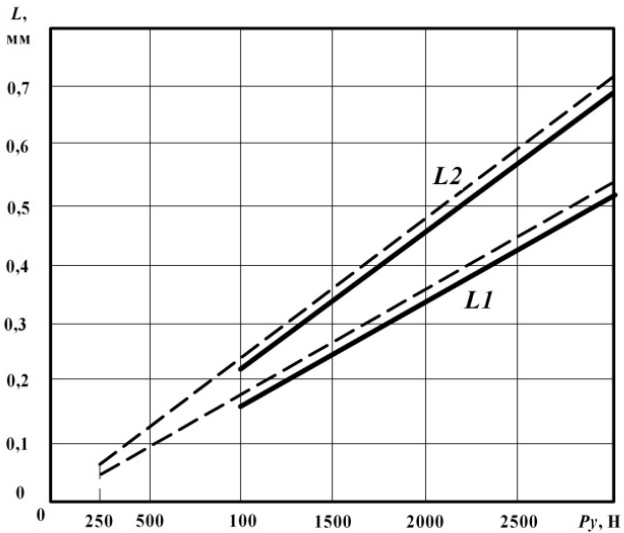


Рис. 4.44. Залежності зміщення вершин різців оправки від сили  $P_y$  визначені: ———— – експериментально; - - - - - за методом скінченних елементів:  $L1$  – деформації по першому різцю;  $L2$  – по другому різцю

У результаті проведення експерименту було отримано три математичні моделі, що описують вплив швидкості різання  $V$ , глибини різання  $t$  і подачі  $S_o$  на шорсткість обробленої поверхні  $Rz$  при розточуванні отворів стандартною розточувальною оправкою, запропонованою оправкою з двома різцями та запропонованою оправкою з одним різцем.

Модель, що описує формування шорсткості поверхні у процесі різання стандартною розточувальною оправкою:

$$Rz = 5,45 + 0,05 \cdot V + 60,7 \cdot S_o + 11,5 \cdot t.$$

Модель, що описує формування шорсткості поверхні у процесі різання запропонованою розточувальною оправкою з двома різцями:

$$Rz = 0,94 + 0,075 \cdot V + 44,19 \cdot S_o + 10,14 \cdot t.$$

Модель, що описує формування шорсткості поверхні у процесі різання запропонованою розточувальною оправкою з одним різцем:

$$Rz = 4,79 + 0,05 \cdot V + 72,67 \cdot S_o + 12,3 \cdot t.$$

Встановлено, що використання запропонованої дворіцевої оправки дозволяє при збереженні нормативної шорсткості поверхні збільшити швидкість різання на 15–20% (рис. 4.45 а) або знизити шорсткість обробленої поверхні у порівнянні з одноріцевою обробкою на 4–8 мкм по параметру  $Rz$ , що становить 15–30%. Суттєве зменшення шорсткості спостерігається при обробці на подачі, яка перевищує 0,1–0,2 мм/об. При подачі менше 0,1 мм/об. зниження шорсткості поверхні незначне. При забезпеченні нормативної шорсткості можна збільшити або подачу на 40–90% (рис. 4.45 б), або глибину різання на 20–40%.

Одноріцева обробка запропонованою оправкою показала значення шорсткості дещо гірше, ніж при обробці стандартною оправкою, що пов'язано з недостатньою жорсткістю даної конструкції оправки.

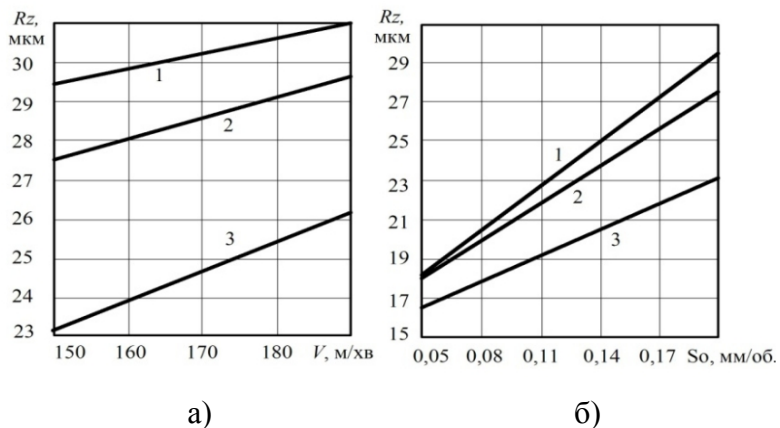


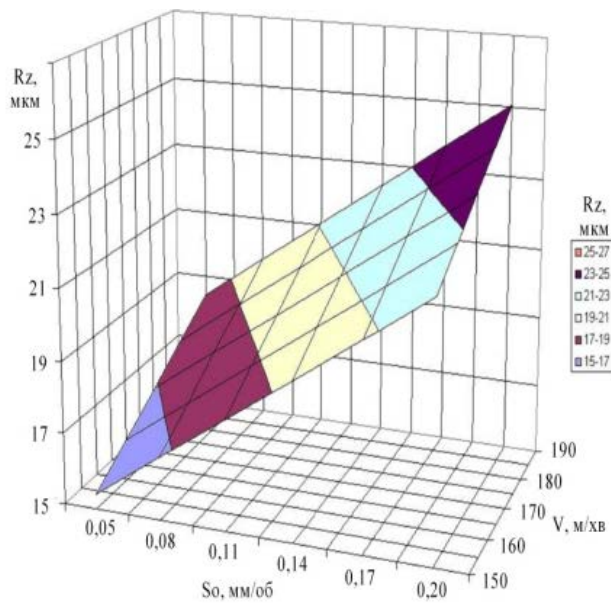
Рис. 4.45. Вплив режимів різання на шорсткість поверхні при розточуванні отвору в заготовках із сірого чавуна марки СЧ20 різцями ВК8: а –  $R_z=f(V)$ , ( $S_o=0,2$  мм/об.;  $t=0,2$  мм); б –  $R_z=f(S_o)$ , ( $V=150$  м.хв;  $t=0,2$  мм):

- 1 – однорізева обробка запропонованою оправкою;
- 2 – однорізева обробка стандартною оправкою;
- 3 – дворізева обробка запропонованою оправкою

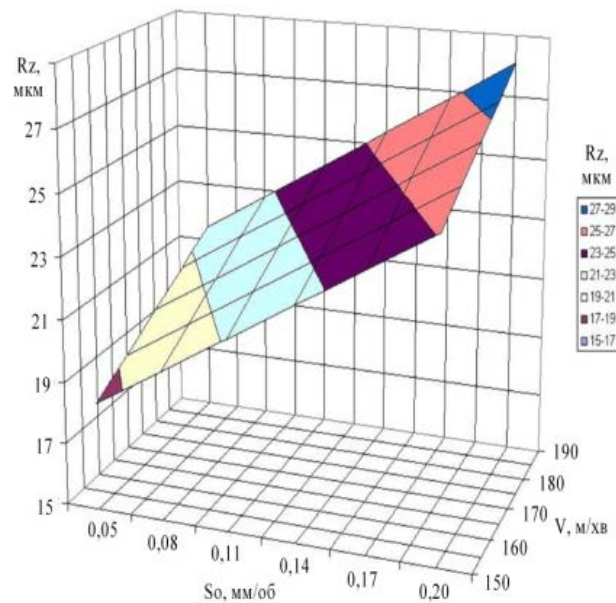
Виходячи з цього, можна зробити висновок, що застосування дворіцевої обробки дозволяє поліпшити якість обробленої поверхні, незважаючи на те, що жорсткість такої оправки нижча, ніж жорсткість стандартної оправки. Зі збільшенням жорсткості дворіцевої оправки якість обробленої поверхні поліпшиться.

За математичною моделлю, що описує процес різання запропонованою розточувальною оправкою з двома різцями, розраховані залежності шорсткості поверхні від параметрів режимів різання (рис. 4.46).

На підставі отриманої математичної моделі були розроблені рекомендації з вибору режимів різання для чистового та напівчистового розточування отворів у чавунних деталях запропонованою дворіцевою оправкою залежно від необхідної шорсткості поверхні отвору (табл. 4.2).



а)



б)

Рис. 4.46. Залежності шорсткості поверхні від швидкості різання і подачі:  
 а –  $t = 0,1$  мм; б –  $t = 0,4$  мм



Таблиця 4.2

Режими різання, що рекомендуються для обробки отворів дворізцевою розточувальною оправкою

<i>t</i> , мм	<i>V</i> , м/хв	<i>Rz</i> , мкм						
		16	18	20	22	24	26	28
		<i>So</i> , мм/об.						
0,1	150	0,063	0,109	0,154	0,199	0,244	0,290	0,335
	160	0,046	0,092	0,137	0,182	0,227	0,273	0,318
	170	0,029	0,075	0,120	0,165	0,210	0,256	0,301
	180	0,012	0,058	0,103	0,148	0,193	0,239	0,284
	190	–	0,041	0,086	0,131	0,176	0,222	0,267
0,2	150	0,040	0,086	0,131	0,176	0,221	0,267	0,312
	160	0,023	0,069	0,114	0,159	0,204	0,250	0,295
	170	0,006	0,052	0,097	0,142	0,187	0,233	0,278
	180	–	0,035	0,080	0,125	0,170	0,216	0,261
	190	–	0,018	0,063	0,108	0,153	0,199	0,244
0,3	150	0,017	0,063	0,108	0,153	0,198	0,244	0,289
	160	0,004	0,046	0,091	0,136	0,181	0,227	0,272
	170	–	0,029	0,074	0,119	0,164	0,210	0,255
	180	–	0,012	0,057	0,102	0,147	0,193	0,238
	190	–	–	0,040	0,085	0,131	0,176	0,221
0,4	150	–	0,04	0,085	0,130	0,175	0,221	0,266
	160	–	0,023	0,068	0,113	0,158	0,204	0,249
	170	–	0,005	0,051	0,096	0,142	0,187	0,232
	180	–	–	0,034	0,079	0,125	0,170	0,215
	190	–	–	0,017	0,062	0,108	0,153	0,198

Результати моделювання напружено-деформованого стану розточувальної оправки методом скінченних елементів, а також експериментальні дослідження підтверджують забезпечення високої якості поверхні при дворізцевому розточуванні отворів на БВ.

На підставі проведених аналітичних та експериментальних досліджень процесу розточування подані рекомендації з налагодження різців дворізцевої розточувальної оправки та вибору режимів різання, що дозволяє підвищити продуктивність обробки основних отворів на 30–50% при нормативній шорсткості поверхні, або на 15–30% зменшити шорсткість поверхні порівняно з однорізцевою обробкою.

## **5. Синтез технологічних компоновань багатомономенклатурного агрегатного металорізального обладнання**

### **5.1. Структура гнучкості багатомономенклатурного агрегатного металорізального обладнання**

Призначення та область раціонального використання багатомономенклатурного агрегатного металорізального обладнання – це випуск виробів обмеженої номенклатури (орієнтовно 2–10 найменувань) великими серіями (не менше 10–50 тис. штук), тобто з виробничої точки зору ставляться вимоги забезпечення високої продуктивності обробки при обмеженій гнучкості [32].

Обробка трудомістких великогабаритних КД виконується в АВС, функціональними підсистемами яких є основне і допоміжне обладнання; автоматизована транспортно-накопичувальна система; система автоматичного контролю; система видалення відходів (стружки та змащувально-охолоджувальної рідини); система керування та ін.

Характер зв'язків між елементами АВС визначається насамперед заданою продуктивністю та ступенем гнучкості системи за умови забезпечення необхідної якості виробу. Підвищення продуктивності АВС супроводжується ускладненням зв'язків між окремими одиницями обладнання та збільшенням його кількості. При цьому найбільше ускладнюється конструкція транспортно-накопичувальної системи та системи керування.

Основною класифікаційною ознакою АВС є ступінь гнучкості, що визначає структуру основного технологічного обладнання, транспортно-накопичувальної системи, системи керування та ін.

За ступенем гнучкості АВ і АВС поділяються на однономенклатурні та багатомономенклатурні. До однопоточних АВ і АВС відносять жорстке та придатне для перебудови агрегатне металорізальне обладнання. Жорсткі АВ і АВС

призначені для обробки деталей тільки одного типорозміру. Перехід до обробки деталей іншого типорозміру пов'язаний з корінною реконструкцією верстата або системи.

Однак агрегатне металорізальне обладнання, що складається на 80–85% із уніфікованих агрегатів і деталей, за своєю природою є оборотним, тобто до категорії жорсткого воно може бути віднесене лише тоді, коли конструктивно-технологічні характеристики деталі іншого типорозміру настільки відрізняються від комплексної (базової), що перебудова АВ (АВС) економічно не вигідна.

Придатні для перебудови АВ (АВС) вигідно використовувати для обробки нових однотипних деталей, але при цьому потрібні додаткові капітальні вкладення і поточні витрати, пов'язані з перебудовою верстата або системи, причому доцільність такої перебудови повинна бути економічно обґрунтованою.

Зважаючи на те, що жорсткі та придатні до перебудови АВ (АВС) принципівих конструктивно-технологічних відмінностей не мають, а спільною у них є властивість непереналагоджуваності, то вони можуть бути віднесені до категорії однономенклатурних.

До багатноменклатурних належать переналагоджувані та гнучкі АВ (АВС). Переналагоджувані допускають перехід до обробки деталей іншого типорозміру без додаткових капітальних вкладень, а лише за рахунок збільшення поточних витрат, пов'язаних із роботами з переналагодження. У конструкціях таких систем уже врахована можливість обробки кількох однотипних деталей, наприклад, на заводі-виробнику виготовлено і передано замовнику необхідне додаткове обладнання, пристрої, оснастка та ін.

Гнучке агрегатне металорізальне обладнання при переході на обробку деталей іншого типорозміру не вимагає ні зупинення виробництва, ні додаткових капітальних вкладень, ні збільшення поточних витрат, оскільки процес переналагодження автоматизований, суміщений із роботою обладнання і

закладений у керуючу програму, введена в систему керування ще на стадії технічної підготовки виробництва.

На робочих позиціях АВС може здійснюватись як послідовна, так і паралельно-послідовна концентрація технологічних переходів. Це пов'язано з тим, що час обробки на нелімітуючих позиціях становить звичайно 0,3–0,8 часу обробки на лімітуючих, за умови, що для всіх РІ обрані режими різання, що відповідають максимальній інтенсивності формоутворення. Прийнята форма концентрації технологічних переходів на робочих позиціях зумовлює склад основного технологічного обладнання. До АВС можуть входити однопозиційні та багатопозиційні АВ, АВС зі змінними шпиндельними коробками, АВ із ЧПК та ін.

За видом зв'язку між верстатами (дільницями) АВС розподіляється на системи із жорстким та гнучким зв'язком між обладнанням. У випадку жорсткого зв'язку обладнання за допомогою транспортної системи і системи керування блокується до купи і працює у єдиному ритмі, тобто відмова будь-якого елемента призводить до відмови і простою АВС в цілому. При гнучкому зв'язку між кожною парою верстатів або між групами ( дільницями ) зблокованих верстатів, об'єднаних у АВС, є автоматичні накопичувачі наробків, які частково компенсують простої обладнання. У першому випадку рух оброблюваних заготовок між суміжними робочими позиціями (дільницями) АВС здійснюється синхронно, а у другому – несинхронно.

За видом структури транспортної системи АВС розподіляються на однопоточні, розгалужені та багатопоточні. Продуктивність однопоточних АВС визначається величиною робочого циклу лімітуючої робочої позиції. Розгалужена структура, що утворюється шляхом розміщення верстатів, які виконують лімітуючі операції, паралельно у кілька потоків дозволяє підвищити продуктивність АВС. Багатопоточні АВС використовуються для виконання видів обробки, що характеризуються великими довжинами робочих ходів, наприклад фрезерування.

За відсутності на заготовках поверхонь, оброблених до їх надходження у АВС і здатних забезпечувати надійне базування і транспортування, а також за неможливості обробки цих поверхонь на вбудованому в АВС багатопозиційному АВ з поворотно-ділильним столом застосовують пристрої-супутники (палети), які переміщуються разом із закріпленими на них заготовками. У супутникових АВС передбачені конвеєри повернення пристроїв-супутників на позиції завантаження, а також мийні станції для очищення супутників від стружки.

У транспортних системах АВС можуть використовуватися промислові роботи, наприклад для переміщення заготовок із багатопозиційного верстата на конвеєр дільниці однопозиційних АВ.

Якщо габаритні розміри заготовок дозволяють, то за необхідності досягнення високої продуктивності можуть застосовуватися багатомісні верстатні пристрої.

Нарівні з традиційними системами керування, побудованими на базі релейної електроавтоматики, для керування багатомісними АВС використовують програмовані контролери, ЧПК або комбінації різних типів взаємозв'язаних систем керування. Залежно від рівня автоматизації виробництва АВС можуть бути включені до автоматизованої системи керування виробництвом.

Зміст і структура поняття гнучкості ТС визначаються двома основними факторами: техніко-економічними та виробничими вимогами, що визначають доцільність створення системи, і технічними можливостями обладнання. Відповідно до конструкторсько-технологічної практики застосування принципу агрегування у верстатобудуванні на АВ неможливо реалізувати багатоваріантні технологічні маршрути обробки деталей, а також оперативно змінювати режими різання. Разом з тим, враховуючи, що виробничі вимоги до технологічної гнучкості АВ і АВС мінімальні, можна допустити, що вони перекриваються гнучкістю обладнання.

Під гнучкістю обладнання розуміємо властивість, що характеризується здатністю структурних елементів

компонування багатоміномклатурних АВ і АВС адаптуватися до змін виробничих умов, пов'язаних з переходом на обробку деталі іншого типорозміру. Гнучкість обладнання визначається гнучкістю силових агрегатів, технологічної оснастки системи керування.

Стосовно багатоміномклатурних АВ і АВС доцільно розглядати також гнучкість обсягу випуску виробів та гнучкість розвитку системи. Гнучкість обсягу випуску характеризується мінімальним розміром виробничої партії деталей, при якому обробка залишається економічно вигідною. Гнучкість обсягу випуску пов'язана з рівнем автоматизації процесу переналагодження обладнання, оскільки мінімальний розмір виробничої партії деталей зменшується зі скороченням витрат часу на переналагодження обладнання. Для ТС, які переналагоджуються на обробку деталі іншого типорозміру автоматично без зупинки обладнання, проблема гнучкості обсягу випуску відсутня, тому що деталі можуть оброблятися у будь-якій послідовності й у будь-якій кількості.

Гнучкість розвитку багатоміномклатурних АВ і АВС характеризує можливість збільшення випуску продукції та включення до групи нових деталей у процесі експлуатації, а також здатність убудовуватись у ТС більш високого рівня.

Обґрунтування потрібної гнучкості створюваних багатоміномклатурних АВ і АВС базується, у першу чергу, на конструктивно-технологічних характеристиках реально існуючих деталей, що входять до групи виробів, які підлягають виготовленню на розроблених ТС. Однак за період експлуатації багатоміномклатурних АВ і АВС до конструкції оброблюваних деталей можуть вноситися зміни, а у зв'язку зі зміною номенклатури продукції може виникнути необхідність включення до групи нових деталей. Залежно від ступеня достовірності конструкторсько-технологічної інформації про об'єкти доцільно розглядати базову і резервну гнучкість ТС.

Базова гнучкість визначається на основі відомостей, що містяться у робочих кресленнях та технічних умовах на обробку

деталей, які входять до групи, і заданих характеристик виробничого процесу.

Резервування гнучкості основного технологічного обладнання поділяється на конструкторське і технологічне та носить прогностичний або ймовірнісний характер. Конструкторське резервування гнучкості базується на прогнозуванні конструкторсько-технологічних характеристик перспективних виробів, які, можливо, будуть оброблятися на даному обладнанні, стохастичними методами інженерного прогнозування.

Найбільш ефективним є прогнозування на основі аналізу патентної інформації. У сучасних умовах патенти – це документи, що відображають у концентрованій формі найновіші досягнення науки і техніки, які визначають основні напрямки у формуванні технічного процесу. Рішення про конструкторський резерв гнучкості багатоміністерських АВ і АВС приймається на основі аналізу перспективних виробів, обраних за допомогою системи критеріїв, що дозволяють кількісно оцінити інженерно-технічну значущість патенту, технічні потенціали груп патентів (конкуруючі технічні напрямки), сформованих за функціонально-однорідними ознаками. Відповідно до отриманих результатів вносяться корективи до базових конструкцій багатоміністерських АВ і АВС.

На етапі технологічного резервування гнучкості аналізується можливість реалізації додаткових завдань і за необхідності вносяться зміни до структурно-технологічної схеми багатоміністерських АВ і АВС, спрямованих на розширення їх технологічних можливостей.

Базова та резервна гнучкість, установлені при створенні багатоміністерських АВ і АВС, становлять проектну гнучкість обладнання. Аналізуючи гнучкість діючого обладнання у різні періоди його експлуатації, доцільно використовувати термін «фактична гнучкість».



## **5.2. Система структурно-параметричного синтезу технологічних компоновань багатоміністерського агрегатного металорізального обладнання**

У загальному випадку припускається, що структурний синтез передує параметричному, тобто розроблення технічного об'єкта починається з формування структури об'єкта (структурний синтез) та подальшого вибору значень внутрішніх параметрів (параметричний синтез). При обраних значеннях внутрішніх параметрів перевіряються умови працездатності. У разі невиконання цих умов здійснюється корекція значень внутрішніх параметрів. Якщо при обраній структурі об'єкта не вдається знайти значень внутрішніх параметрів, задовільних з точки зору умов працездатності, то виконують структурну корекцію, тобто переходять до нового варіанта структури.

Технологічне компоновання багатоміністерського агрегатного металорізального обладнання – це порядок виконання технологічних переходів, необхідних для формоутворення поверхонь об'єкту обробки згідно із заданими вимогами і характеристиками, та розподіл їх за багатоміністерськими налагодженнями і позиціями, що допускає конструкторсько-технологічну реалізацію на базі існуючих агрегатів і пристроїв, які забезпечують задану гнучкість і продуктивність.

Задачі, які розв'язуються у процесі синтезу структурно-технологічних багатоміністерських схем АВ і АВС, настільки взаємозв'язані, що виділити етапи структурного і параметричного синтезу практично неможливо. Наприклад, вибір числа позицій, потоків, технологічних переходів, що виконуються послідовно або паралельно на одній позиції, та ін., не можна здійснювати без урахування параметрів режимів різання та силових характеристик процесу різання, а також часових, співвідношень різних елементів робочого циклу окремих верстатів і системи в цілому.

Синтез технологічних компоновань багатоміністерських АВ (АВС) здійснюється поетапно відповідно до ієрархічної структури останніх. На кожному етапі

послідовно розв'язуються задачі як структурного, так і параметричного синтезу. Особливістю запропонованої методики синтезу є поступове нарощування кількості врахованих факторів, причому розглядаються тільки ті параметри, які можуть бути оцінені на даному етапі з максимальною достовірністю.

Отже, проектне рішення формується, починаючи з нижніх рівнів його ієрархії, тобто рішення на наступних етапах приймається, виходячи з результатів, отриманих на попередньому. Причому обмін інформацією між підзадачами здійснюється в обох напрямках з метою послідовного уточнення проектного рішення. Процес синтезу технологічних компонентів багатоміжурних АВ (АВС) має розгалужений характер: кожне рішення попереднього етапу ініціює кілька рішень на наступному етапі [33].

Таким чином, у компонентів АВ (АВС) відбувається нарощування апріорної інформації: рішення, прийняті на попередньому етапі, вводяться до складу початкових умов наступного етапу, в результаті чого вони розширюються в процесі синтезу системи. Наприклад, на етапі параметричного синтезу багатопозиційної системи до складу початкових умов вводяться ті рішення, що прийняті на етапі структурного синтезу багатоміжурної обробки.

Для забезпечення достовірності вибору оптимального варіанта технологічного компонентів АВ (АВС) на кожному етапі синтезу необхідно комплексно розглядати всі допустимі варіації врахованих факторів. Однак практична реалізація такого підходу ускладнюється тим, що необхідно генерувати й аналізувати велику кількість структурно-технологічних варіантів системи. Тому за об'єкт варіації доцільно прийняти єдиний комплексний показник, який одночасно може служити і критерієм оптимальності на всіх етапах синтезу, тобто головною властивістю цього критерію повинна бути ієрархічність, що відповідає ієрархії структури ТС. За такий критерій доцільно використовувати інтенсивність формоутворення, яка є комплексним критерієм, що інтегрально враховує вплив

технологічних, конструктивних і експлуатаційних факторів на продуктивність ТС.

Відповідно до прийнятої схеми декомпозиції у процесі синтезу багатомономенклатурних АВ (АВС) вирішуються такі взаємозв'язані завдання:

1) формування технологічно мінімального комплекту РІ, взаємозв'язаних кінематично або структурно і призначених для вирішення спільного технологічного завдання, на основі маршрутів обробки поверхонь деталей, що входять до групи;

2) вибір вихідних режимів різання технологічним комплектом РІ;

3) формування технічно можливих варіантів структури багатоінструментної обробки;

4) формування технічно можливих варіантів структури багатопозиційної обробки;

5) прогнозування ймовірності виконання виробничої програми випуску виробів;

6) визначення локальних критеріїв оптимальності для кожного варіанта технологічного компонування системи;

7) багатокритеріальна структурно-параметрична оптимізація технологічного компонування багатомономенклатурних АВ (АВС).

На рис. 5.1 показана структура процесу синтезу технологічних компонувань багатомономенклатурних АВ (АВС). Формування технологічно мінімального комплекту РІ виконується з урахуванням технологічних особливостей виконання різних видів обробки на агрегатному металорізальному обладнанні та рекомендованих типових технологічних маршрутів обробки поверхонь стандартними РІ. Число комплектів відповідає кількості деталей у групі.

За вихідні режими різання комплектом РІ обираються режими, що відповідають максимальній інтенсивності формоутворення. На цьому етапі проектування з необхідною достовірністю можна врахувати лише параметри, що характеризують різальні властивості РІ, а також витрати часу на заміну і технічне обслуговування комплекту РІ.

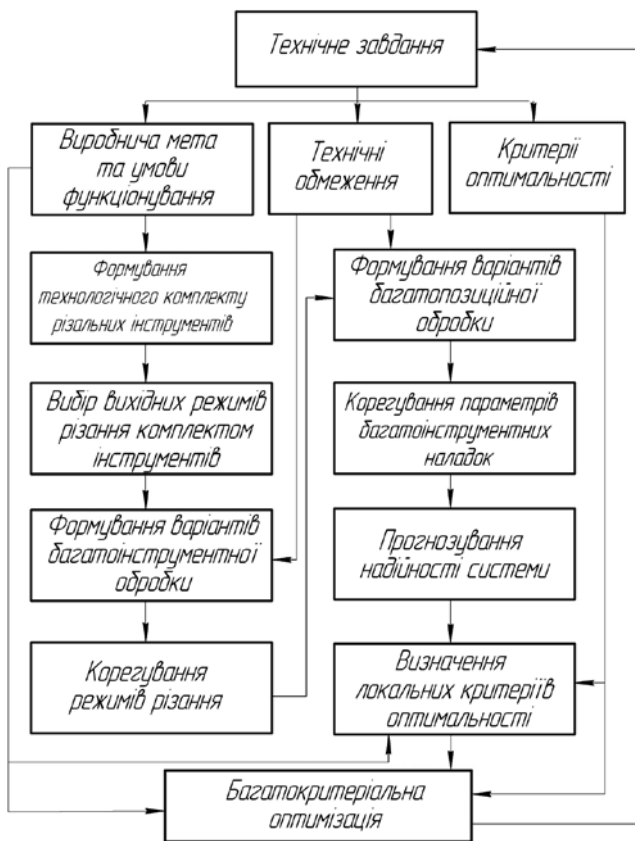


Рис. 5.1. Структура системи синтезу технологічних компонентів багатомоделюваних АВС

Групування РІ у багатоінструментні наладки здійснюється з урахуванням технічних обмежень на сумісність та послідовність технологічних переходів, технічних характеристик силових агрегатів і шпиндельної оснастки, потрібної гнучкості системи та ін. Формування комплектів багатоінструментних наладок виконується шляхом варіації допустимої величини поля розсіювання інтенсивності формоутворення одиничними РІ в межах однієї багатоінструментної наладки. Внаслідок наявності у багатоінструментних наладок лімітуючих РІ та призначення спільних хвилинних подач для РІ в межах однієї наладки

необхідно скоректувати режими різання одиничними РІ при їх сумісній роботі у багатоінструментній наладці.

Формування варіантів багатопозиційної обробки передбачає об'єднання багатоінструментних наладок на робочих позиціях АВС відповідно до характеристик існуючих одно- та багатономенклатурних АВ, а також розроблення структурних схем транспортної системи (однопотокова, гілляста, багатопотокова), що відповідають заданим виробничим цілям та умовам функціонування. Залежно від вибору лімітуючої робочої позиції здійснюється корекція параметрів багатоінструментних наладок на решті позицій.

Шляхом математичного моделювання процесу функціонування АВС розв'язується задача поділу системи на дільниці, вибір місця розміщення накопичувачів заробків та їх місткість, а також уточнюються значення кількісних показників АВС.

На останніх етапах синтезу розраховуються локальні критерії оптимальності для конкуруючих варіантів технологічних компонувань АВС і здійснюється багатокритеріальний вибір оптимального технологічного компонування.

### **5.3. Визначення оптимальних вихідних режимів багатоінструментної обробки комплектом різальних інструментів**

Особливістю обробки комплектом РІ, що є сукупністю інструментів, взаємозв'язаних кінематично або структурно і призначених для заданої обробки деталі, є взаємний вплив РІ: заміна або технічне обслуговування одного РІ примушує простоювати всі РІ комплекту, тому вихідні режими різання комплектом РІ при проектуванні АВ і АВС потрібно обирати з урахуванням сумарних витрат часу на зміну РІ у комплекті. Рекомендується в цьому разі призначати період стійкості РІ, від якої в основному залежить швидкість різання, таким, що дорівнює 100–150 хв, незалежно від числа РІ, працюючих на АВ

і АВС. За деякими даними, період стійкості обирається залежно від числа РІ в налазці (не більше 15 шт.). Отже, актуальною є задача визначення оптимальної стійкості РІ під час проектування технологічних компонувань АВ (АВС), на яких одночасно працює велика кількість інструментів, що обробляють допоміжні отвори.

Усю різноманітність осьових РІ можна поділити на дві групи. До першої доцільно віднести РІ, які не допускають зміни режимів різання в широких межах (розвертки, зенківки, цеківки, мітчики). До другої групи входять свердла, зенкери, а також розточувальні різці. Режими різання для РІ першої групи потрібно обирати за нормативами, які розроблені з урахуванням технологічних умов й особливостей процесу різання. Для РІ другої групи визначаються оптимальні режими різання, причому подача вибирається максимально допустима за технічними обмеженнями, а швидкість різання – відповідно до оптимальної стійкості РІ [34].

У разі багатоінструментної обробки, особливо при великому числі РІ у комплекті, що характерно для АВ (АВС), доцільно використовувати узагальнену стійкісну залежність, отриману з урахуванням запропонованої М. І. Клушиним характеристики різання.

Нами досліджений вплив стійкості РІ на інтенсивність формоутворення і витрати часу на зміну інструментів комплекту. Технологічна інтенсивність формоутворення комплектом РІ розраховується за формулою

$$W_T = \sum_{i=1}^{N_k} n_i \cdot S_{oi}.$$

Витрати часу на зміну комплекту РІ оцінюються за допомогою коефіцієнта  $K_u$  обслуговування інструментів:

$$K_u = 1 / (1 + \sum_{i=1}^{N_k} t_{zi} \cdot K_{pi} / T_i),$$

де  $t_{zi}$  – час зміни  $i$ -го РІ, хв;

$K_{pi}$  – коефіцієнт різання, що є відношенням часу різання  $i$ -м РІ до максимального часу різання серед РІ налагодження;  
 $T_i$  – стійкість  $i$ -го РІ, хв.

На рис. 5.2 показано криві, що характеризують вплив стійкості  $T$  інструментів та матеріалу заготовки на технологічну інтенсивність формоутворення  $W_T$ , а також вплив стійкості  $T$  інструментів і часу  $t_3$  зміни одного РІ на значення  $K_u$ .

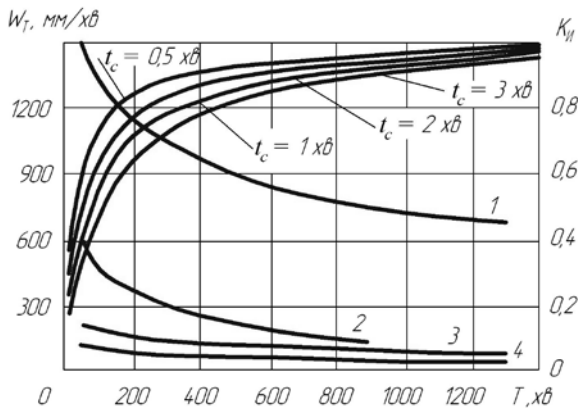


Рис. 5.2. Вплив стійкості інструментів на технологічну інтенсивність формоутворення та коефіцієнт обслуговування інструментів: 1 – алюміній, швидкорізальна сталь (ШС); 2 – сірий чавун (СЧ), твердий сплав (ТС); 3 – СЧ, ШС; 4 – сталь, ШС

Комплексно врахувати зміни цих показників можна за допомогою критерію інтенсивності формоутворення  $W_K$  комплектом РІ:

$$W_K = \sum_{i=1}^{N_k} n_i \cdot S_{oi} / (1 + \sum_{i=1}^{N_k} t_{zi} \cdot K_{pi} / T_i).$$

Результати аналізу залежностей  $W_K = f(T)$  (рис.5.3) для різних умов обробки показали, що оптимальна стійкість РІ, які входять до одного комплекту, що відповідає максимальній

інтенсивності формоутворення комплектом РІ, не залежить від матеріалу заготовки, виду і параметрів обробки, а визначається матеріалом різальної частини РІ, часом зміни одного інструмента та їх кількістю у комплекті. Таким чином, оскільки ці фактори є спільними для усіх РІ, то й оптимальний період стійкості буде однаковий для РІ цього комплекту.

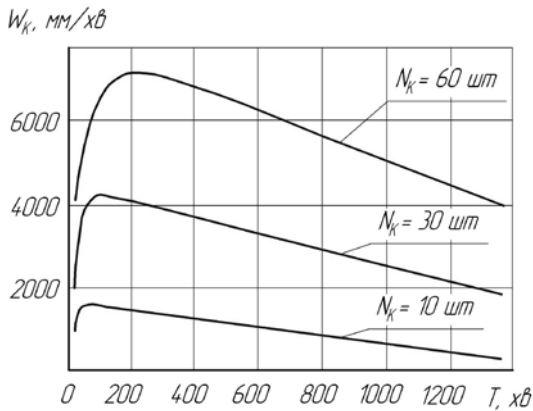


Рис. 5.3. Вплив стійкості інструментів на інтенсивність формоутворення комплектом різальних інструментів при обробці сірого чавуну

Аналіз впливу часу зміни одного РІ на оптимальну стійкість комплекту інструментів показав, що зі збільшенням часу  $t_3$  від 0,5 до 3 хв значення  $T_{opt}$  збільшується у 4 рази, що істотно зменшує розрахункову інтенсивність формоутворення. Отже, актуальним є застосування швидкодіючого допоміжного інструмента, а також упровадження планово-попереджувальної системи обслуговування РІ. На рис. 5.4 наведено залежності оптимальної стійкості комплекту РІ від перелічених параметрів.

У результаті аналізу впливу стійкості РІ на величину економічних витрат, які залежать від режиму різання, встановлено, що у зоні стійкостей, які відповідають максимальній інтенсивності багатоінструментної обробки на АВ (АВС), економічні витрати зі зміною стійкості змінюються несуттєво. Так, підвищенню стійкості у 3 рази (від 200 до



600 хв) відповідає зміна економічних витрат на 25%. Таким чином, рішення, що приймають на основі критерію інтенсивності формоутворення, не входять у суперечності з економічними показниками.

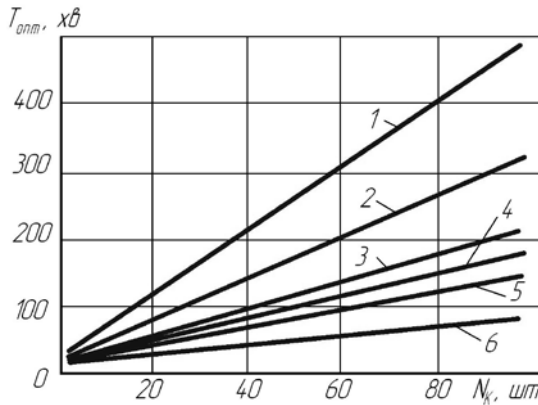


Рис. 5.4. Вплив умов багатоприладної обробки на оптимальну стійкість комплексу різальних інструментів:  
 1 – ШС,  $t_3 = 2xв$ ; 2 – ШС,  $t_3 = 1xв$ ; 3 – ТС,  $t_3 = 2xв$ ; 4 – ШС,  $t_3 = 0,5xв$ ; 5 – ТС,  $t_3 = 1xв$ ; 6 – ТС,  $t_3 = 0,5xв$

Відповідно до викладених теоретичних положень розроблена автоматизована система вибору вихідних режимів різання для комплексу РІ, схему алгоритму якої наведено на рис. 5.5.

Система складається з двох підсистем, перша з яких призначена для вибору режимів різання для розверток, мітчиків, зенківок і цеківок за нормативами, а друга – для оптимізації режимів обробки свердлами і зенкерами.

Цільова функція має такий вигляд:

$$W_K = \sum_{i=1}^{N_{k2}} n_i \cdot S_{oi} / (1 + \sum_{i=1}^{N_k} t_{zi} \cdot K_{pi} / T_i) \rightarrow \max,$$

де  $N_{k2}$  – сумарна кількість свердел і зенкерів у комплекті РІ, шт.

Математична модель оптимізації вихідних режимів різання комплектом РІ містить також технічні обмеження.

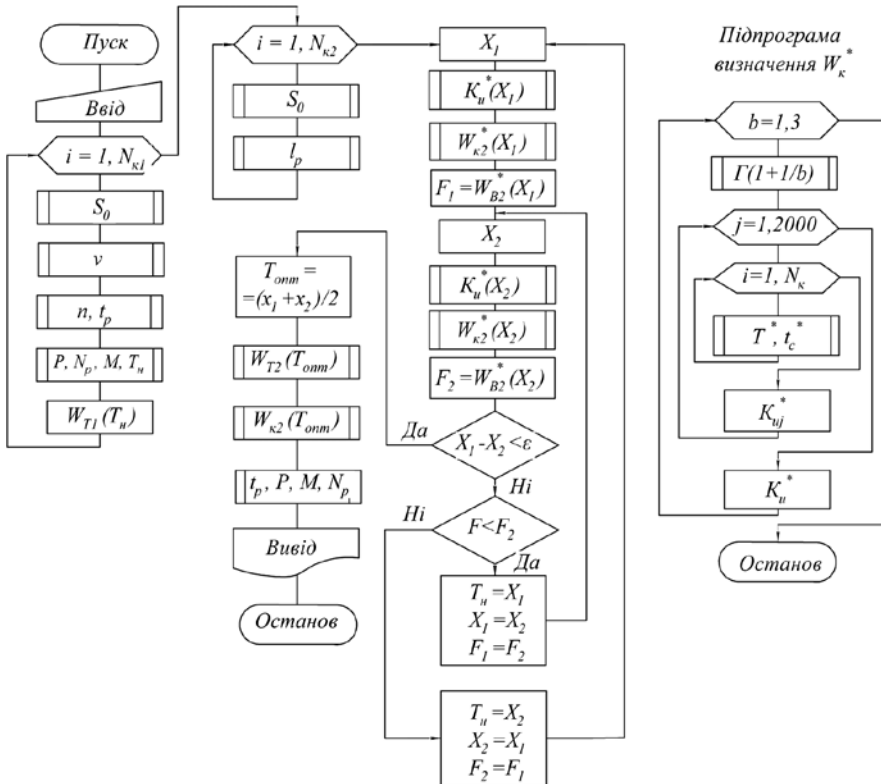


Рис. 5.5. Схема алгоритму автоматизованої системи вибору вихідних режимів різання комплектом різальних інструментів

Зважаючи на те, що функція  $W_K = f(T)$  недиференційована, то аналітично визначити параметр оптимізації, не можна. При невеликому числі РІ у комплекті задачу можна розв'язати методом простого перебору. Проте при великій кількості РІ, що характерно для АВС, доцільно застосовувати метод золотого перерізу, який для унімодальної функції  $W_K = f(T)$  у межах  $[T_n; T_k]$  реалізується таким чином.

Нехай  $x_1 = T_n + (T_k - T_n) / \tau$  (тут  $\tau = (\sqrt{5} - 1) / 2$  – відношення

золотого перерізу). Точка  $x_2$  обирається симетрично точці  $x_1$  відносно середини відрізка  $x_2 = T_n + (T_k - T_n) / \tau^2$ . Порівнявши значення функції  $W_K(x_1)$  і  $W_K(x_2)$ , знаходимо відрізок локалізації мінімуму:  $[T_n; x_1]$  або  $[x_2; T_k]$ . Точка, що лежить усередині відрізка локалізації, де обчислення вже проведене, ділить відрізок у відношенні золотого перерізу. Довжина відрізка  $\varepsilon$  локалізації максимуму функції  $W_K(T)$  після  $m$  обчислень дорівнює  $\varepsilon = (T_k - T_n) / \tau^{m-1}$ . Призначивши величину похибки  $\varepsilon$  визначення оптимального періоду стійкості, можна розрахувати число  $N$  обчислень за формулою

$$N = 2,08 \cdot \ln(T_k - T_n) / \varepsilon + 1.$$

Період стійкості  $T$  (час безвідмовної роботи) РІ та тривалість одиничного простою системи через раптову відмову РІ (час  $t_3$  зміни) є випадковими величинами з відповідними законами розподілу. Очевидно, що показники ефективності процесу багатоінструментної обробки, в тому числі інтенсивність формоутворення, отримані в результаті детермінованих розрахунків, будуть менш достовірними, ніж визначені за допомогою ймовірнісного моделювання.

За результатами такого моделювання процесу функціонування комплексу РІ, що працюють у АВС для обробки блок-картера двигуна СМД-31, отримані середні значення перемінної частини функції  $W_K = f(T) - K_i^*$ , наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Середні значення перемінної частини функції  $W_K = f(T) - K_i^*$

Параметр $b$ закоу Вейбула	Значення $K_i^*$ при $t_3$ , хв			
	0,5	1,0	1,5	2,0
1	0,08	0,10	0,11	0,11
2	0,27	0,35	0,38	0,39
3	0,31	0,41	0,43	0,45
Без моделювання	0,35	0,45	0,49	0,50

Отже, інтенсивність формоутворення комплектом РІ, обчислена без урахування розсіювання  $T$  і  $t_3$ , буде завищеною, особливо у випадках низької надійності РІ.

На рис. 5.6 показано вплив надійності  $N_k$  РІ на оптимальну стійкість  $T_{opt}$  комплекту РІ. Зниження надійності РІ вимагає збільшення розрахункової стійкості при розрахунках вихідних режимів різання.

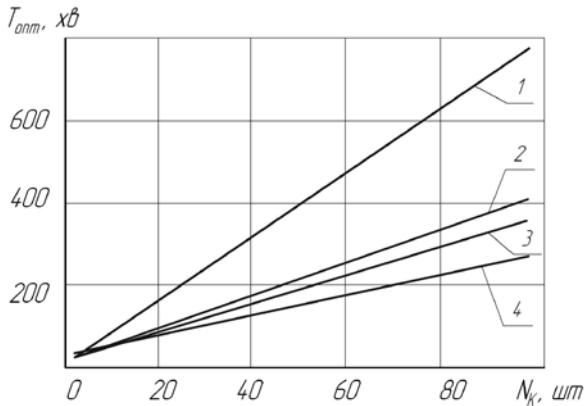


Рис. 5.6. Вплив надійності різальних інструментів на оптимальну стійкість комплекту різальних інструментів при таких значеннях параметра  $b$  закону розподілу випадкових величин Вейбула: 1 –  $b = 1$ ; 2 –  $b = 2$ ; 3 –  $b = 3$ ; 4 – без моделювання

#### 5.4. Формування варіантів структури багатоінструментної та багатопозиційної обробки

Формування комплектів багатоінструментних наладок багатономенклатурних АВС виконується з урахуванням вихідних режимів різання, значень технологічної інтенсивності формоутворення одиничними РІ, осьових сил, потужності різання, а також геометричних параметрів оброблюваних поверхонь, вимог щодо їх точності та ін. При цьому враховуються технологічні можливості та характеристики

існуючого одно- і багатомноменклатурного агрегатного металорізального обладнання, а також обмеження на послідовність та суміщення технологічних переходів.

Перш за все виконується групування технологічних переходів, необхідних для виготовлення всіх деталей, що підлягають обробці в даній АВС, з урахуванням гнучкості та технологічних можливостей базового агрегатного обладнання і шпіндельної оснастки. При обробці допоміжних отворів, що характерно для багатомноменклатурних АВС, усю множину РІ комплекту поділяють на підмножини РІ, що обробляють отвори з паралельними осями з одного боку деталі. Потім у кожній підмножині формується ряд груп РІ.

У першу групу об'єднують РІ, що обробляють однакові отвори в усіх або в більшості деталей. Другу групу складають РІ, які обробляють отвори з однаковими геометричними параметрами, але по-різному розташовані на однойменних боках обробки. До третьої групи входять РІ, що обробляють отвори з однаковими координатами, але різними параметрами. До четвертої групи входять РІ, які обробляють отвори, що відрізняються як параметрами, так і координатами. Окремо розглядається обробка глибоких отворів та отворів з похилими осями.

Технологічні переходи, що виконуються РІ першої групи, доцільно реалізувати на однономенклатурних АВ, тому формування варіантів багатоінструментної обробки в цьому разі здійснюється з урахуванням характеристик уніфікованих агрегатів й оснастки із жорстким налагодженням. Із РІ першої групи формується множина варіантів базових багатоінструментних налагоджень (рис. 5.7).

Для цього поле розсіювання технологічних інтенсивностей  $\Delta W_T$  формування одиничними РІ розбивається на інтервали  $\Delta W_{T1}$ ,  $\Delta W_{T2}$ ,  $\Delta W_{T3}$  і т.д., збільшуючи кожний наступний інтервал на сталу величину. Для розглянутого прикладу отримали відповідно чотири, три і два інтервали.

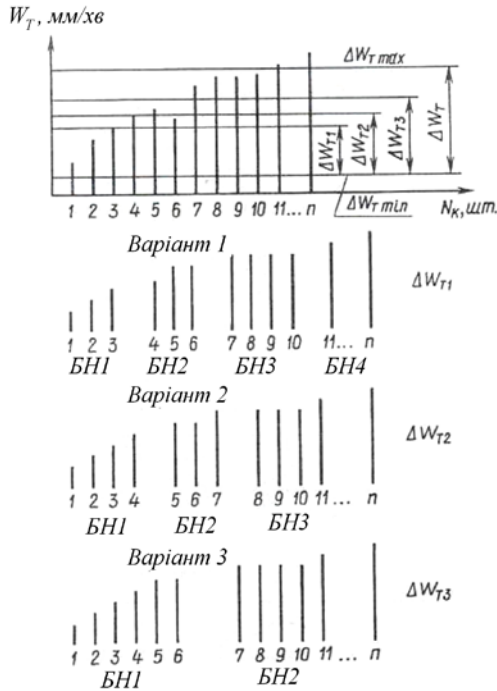


Рис. 5.7. Схема формування комплектів багатоінструментних налагоджень

Комплекти багатоінструментних налагоджень формуються шляхом об'єднання в налагодження РІ, що потрапили в один інтервал з урахуванням технічних обмежень: на послідовність та суміщення переходів; на можливість установлення шпindelних коробок на уніфікованих силових столах; на жорсткість деталі; на обмеження за потужністю та зусиллям подачі силових агрегатів. Далі аналізуємо можливість та доцільність розміщення у базових багатоінструментних налагодженнях РІ із інших груп з використанням шпindelів, рухомих в осьовому напрямку, поворотних шпindelних блоків та ін.

При формуванні багатоінструментних налагодок із РІ другої групи доцільно орієнтуватися на використання АВ з пристроями для переміщення силових агрегатів, шпindelних коробок з

поворотними блоками, переміщуваними шпинделями, револьверними головками та ін. у різних напрямках [32].

РІ третьої групи звичайно розміщуються у базових багатоінструментних налагодженнях. При переході на обробку деталей іншого типорозміру установлення і зняття необхідних РІ виконується вручну.

Для конструкторської реалізації багатоінструментної обробки РІ четвертої групи використовують АВ зі змінними шпиндельними коробками, переналагоджувану шпиндельну оснастку та ін. Обробку окремих глибоких отворів здійснюють за допомогою силових головок, здатних виконувати проміжні виведення РІ.

РІ, об'єднані в одну багатоінструментну наладку, працюють зі спільною хвилинною подачею, яка приймається, звичайно, такою, що дорівнює мінімальній хвилинній подачі серед РІ багатоінструментного налагодження. При цьому частота обертання і швидкість різання решти РІ зменшуються, а стійкість збільшується. Отже, збільшується і значення коефіцієнта, який враховує витрати часу на зміну РІ, але зменшується сумарна технологічна інтенсивність. Таким чином, при об'єднанні РІ у багатоінструментне налагодження відбувається зниження інтенсивності багатоінструментної обробки в результаті вирівнювання інтенсивності формоутворення РІ в межах одного багатоінструментного налагодження до рівня лімітуючого РІ, а також вирівнювання циклу роботи цих РІ.

Для того щоб ці витрати були мінімальними, необхідно вибирати значення хвилинної подачі багатоінструментних налагоджень, які відповідають максимальній інтенсивності формоутворення. Цільова функція має вигляд

$$W_{KH} = \left( \sum_{i=1}^{N_n} n_i \cdot S_{oi} \cdot t_{pi} / \tau_n \right) / \left( 1 + \sum_{i=1}^{N_n} t_{zi} \cdot K_{pi} / T_i \right),$$

де  $t_{pi}$  – час обробки  $i$ -м РІ, хв;

$\tau_n$  – цикл багатоінструментного налагодження, хв;

$N_n$  – число РІ у налагодженні, шт.

На базі кожного із комплектів багатоінструментних налагоджень, відібраних для подальшого аналізу, проектуються можливі варіанти структури багатопозиційної обробки заданої номенклатури деталей. На цьому етапі розробляються технологічні компонування багатомономенклатурних АВ, необхідних для виконання заданої обробки, проектуються варіанти структурних схем багатомономенклатурних АВС, розраховуються їх основні характеристики (такт, показники надійності й продуктивності, капітальні витрати, собівартість обробки). У АВС звичайно здійснюється двостороння обробка, щоб був доступ до обладнання й установлювально-затискних пристроїв для технічного обслуговування, контролю, ремонту тощо. Тому на одній робочій позиції об'єднуються два багатоінструментних налагоджень, які призначені для обробки заготовок із протилежних боків і мають близькі за тривалістю робочі цикли. При цьому враховуються технічні обмеження на можливість суміщення багатоінструментних налагоджень на одній позиції. Послідовність обробки визначається відповідно до типових технологічних маршрутів обробки корпусних деталей.

Для виконання технологічних переходів РІ другої, третьої, четвертої груп проектуються конкуруючі варіанти на базі різних типів багатомономенклатурних АВ. Щоб забезпечити необхідну гнучкість системи і вирішити поставлені технологічні завдання, до складу багатомономенклатурних АВС можуть входити багатоцільові верстати і верстати з ЧПК для контурного фрезерування.

Конкуруючі варіанти структурних схем багатомономенклатурних АВС розробляються для кожної сукупності багатомономенклатурних АВ, упорядкованих відповідно до групового технологічного маршруту обробки деталей заданої номенклатури. З цією метою по черзі беруть за лімітуючу всі позиції, починаючи з тієї, що має більш тривалий робочий цикл. На позиціях із циклом обробки більшим, ніж на лімітуючій, підвищуються режими різання або додаються паралельні позиції (рис. 5.8).



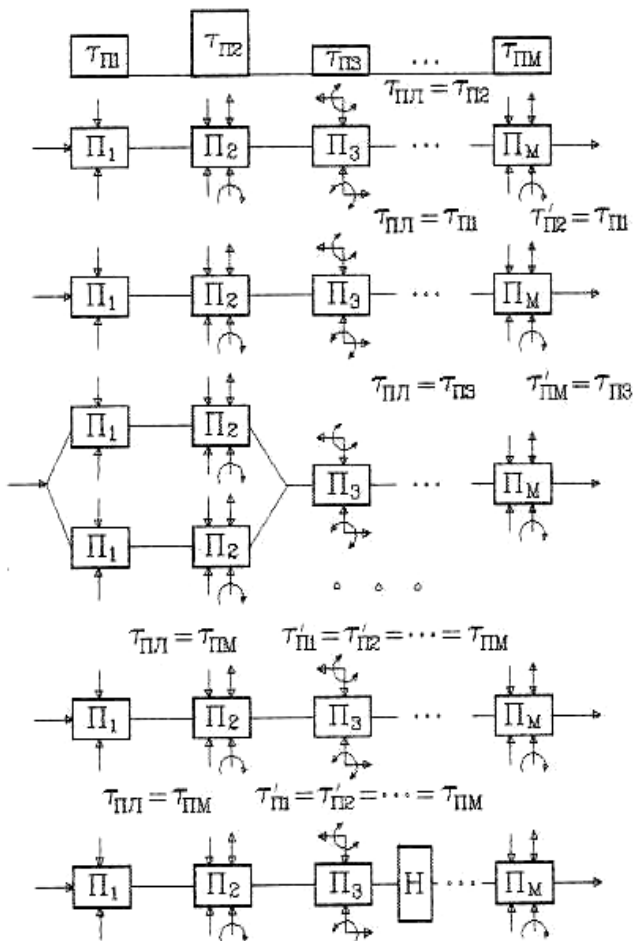


Рис. 5.8. Схема формування варіантів структури багатопозиційної обробки:  $\Pi_1 \dots \Pi_M$  – позиції АВС;  $H$  – накопичувач заробків

Якщо за лімітуючу взята позиція  $\Pi_2$  з найдовшим робочим циклом  $\tau_{nl} = \Pi_2$ , то отримаємо однопоточну АВС. У разі, коли  $\tau_{nl} = \tau_{n3}$ , можна вводити додаткові паралельно працюючі позиції, які можуть розміщуватися послідовно в одному потоці або утворювати розгалужену структуру. Друге

рішення ускладнює транспортну систему, але дозволяє частково компенсувати простої обладнання, адже при відмові одного із паралельно працюючих верстатів інший верстат і сама АВС продовжують працювати, щоправда, знижується продуктивність.

Число дільниць на цьому етапі синтезу визначається необхідністю орієнтації заготовки за допомогою поворотних пристроїв. Для кожного варіанта структури багатопозиційної обробки розраховуються крок транспортування і довжина транспортера, величина яких залежить від розміру оброблюваних заготовок, конструкції транспортера, числа робочих і холостих позицій, наявності паралельно працюючих АВ та ін.

Такий АВС визначається з урахуванням тривалості несуміщених елементів робочого циклу. У загальному випадку – це тривалість робочого циклу лімітуючої позиції, часу міжпозиційного транспортування заготовок, фіксації-розфіксації і затискання-розтискання заготовок на робочих позиціях. Із сукупності спроектованих конкуруючих структурно-технологічних схем АВС здійснюється багатокритеріальний вибір найвигіднішого варіанта.

### **5.5. Методика багатокритеріальної оптимізації технологічних компоновань багатомономенклатурного агрегатного металорізального обладнання**

Складність структури багатомономенклатурних АВС, а також різноманітність характеристик, що описують їх якість і процес функціонування, роблять недостатньо об'єктивною однокритеріальну оптимізацію структурно-технологічних схем. Крім того, задача оптимізації багатомономенклатурних АВС ускладнюється наявністю змінної структури, яка забезпечує вирішення всього комплексу технологічних задач відносно заданої номенклатури деталей.

Математична модель процесу оптимізації структурно-технологічних схем багатомономенклатурних АВС – це сукупність

системи цільових функцій та системи технічних обмежень на незалежні перемінні, що впливають на величину критеріїв оптимальності, а також на інші показники систем.

За критерій оптимальності взяті зведені витрати  $C_{np}$ , що враховують як капітальні вкладення, так і поточні витрати на виготовлення річної виробничої програми деталей заданої номенклатури ( $C_{np} \rightarrow \min$ ); питома інтенсивність формоутворення, що припадає на один РІ, працюючий у АВС ( $\bar{W} \rightarrow \max$ ); коефіцієнт гнучкості ( $G_{ABC} \rightarrow \max$ ); коефіцієнт готовності (технічного обслуговування) ( $\eta_c(t) \rightarrow \max$ ); ймовірність виконання виробничого завдання  $P(t) \rightarrow \max$ .

Під час розв'язання будь-якої багатокритеріальної задачі необхідно враховувати відомості про відносну значущість локальних критеріїв, а найвигідніше рішення потрібно вибирати таким чином, щоб кожному із локальних критеріїв забезпечити якнайближче до оптимального значення.

Для розв'язання багатокритеріальних задач, у яких всі критерії можна ранжувати за важливістю, можна застосувати метод послідовних поступок [35], який полягає в тому, що всі локальні критерії розташовують і нумерують у порядку їх відносної важливості; оптимізують ТС за першим найважливішим критерієм; потім призначають величину допустимого зниження величини цього критерію і оптимізують за другим за важливістю локальним критерієм за умови, що значення першого критерію не повинне відрізнятись від оптимального більше ніж на величину прийнятої поступки; знову призначають величину поступки, але вже за другим критерієм і знаходять максимум третього за умови, щоб значення перших двох критеріїв не відрізнялися від раніше знайдених оптимальних значень більше, ніж на величини відповідних поступок; далі подібним чином по черзі розглядається решта локальних критеріїв. Оптимальним звичайно вважають рішення, що відповідає оптимуму останнього за важливістю критерію. Таким чином, при використанні методу послідовних поступок багатокритеріальна

оптимізація зводиться до почергової оптимізації за локальними критеріями і вибору величин поступок.

Система оптимізаційних задач вибору найвигіднішої структурно-технологічної схеми багатомноменклатурної АВС має такий вигляд:

- 1)  $K_1 = \inf C_{np}(u)$ ;
- 2)  $K_2 = \sup \bar{W}(u)$  при  $C_{np} \leq K_1 + \Delta C_{np}$ ;
- 3)  $K_3 = \sup G(u)$  при  $\bar{W} \geq K_2 - \Delta \bar{W}$ ;
- 4)  $K_4 = \sup \eta_z(t)$  при  $G \geq K_3 - \Delta G$ ;
- 5)  $K_5 = \sup P(t)$  при  $\eta_z(t) \geq K_4 - \Delta \eta_z$ ,

де  $u$  – варіант структурно-технологічної схеми багатомноменклатурної АВС із множини можливих варіантів  $U$ , що задовольняють техніко-економічні обмеження;

$\Delta C_{np}$ ,  $\Delta \bar{W}$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta \eta_z$  – поступки за відповідними локальними критеріями.

Поступки за локальними критеріями визначаються в результаті попарного послідовного порівняння критеріїв з метою встановлення їх взаємозв'язку. Задають кілька величин поступок  $\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \dots$  за першим критерієм і визначають відповідні значення другого критерію. Результати аналізу наведені на рис. 5.9. Як бачимо, спочатку навіть невеликі значення поступок дозволяють отримати істотний вигреш за другим критерієм; з подальшим збільшенням поступок вигреш зростає повільніше. Тому величину поступок вибирають з урахуванням цього взаємозв'язку критеріїв.

Неповністю визначені процеси можна моделювати, користуючись поняттям нечітких множин. Нехай  $X\{1, 2, \dots, m\}$  – скінченна множина конкуруючих варіантів структурно-технологічних схем багатомноменклатурних АВС;  $A_i \subset X, i = 1, 2, \dots, q$  – нечіткі множини, що відповідають локальним критеріям  $K_i$  та виділяють варіанти багатомноменклатурних АВС, які переважають інші за кожним із скалярних критеріїв.

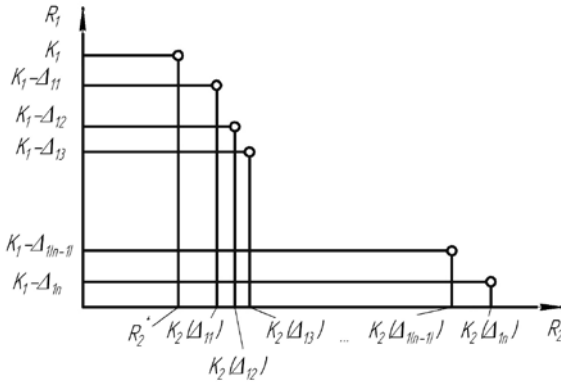


Рис. 5.9. Схема вибору величини поступок за критеріями оптимальності

При цьому визначається ступінь приналежності кожного  $j$ -го варіанта множини  $A_i$  за допомогою функції приналежності  $\mu_i(j)$ , що набуває значення із інтервалу  $[0, 1]$ :  $\mu_i(j) = 1$ , якщо даний варіант є найкращим за  $i$ -м локальним критерієм;  $\mu_i(j) = 0$  для варіантів, не включених у множину  $A_i$  (тобто для варіантів, які неприйнятні при їх оцінці за допомогою критерію  $Q_i$ ). Якщо варіант  $j$  переважає варіант 1 за критерієм  $Q_i$ , то повинна виконуватися нерівність  $\mu_i(j) > \mu_i(1)$ , а у разі тотожності варіантів  $j$  та 1 – рівність  $\mu_i(j) = \mu_i(1)$ .

Функція приналежності для критерію, що мінімізується:

$$\mu_i(j) = \begin{cases} 1 - \frac{K_{ij} - K_{i \min}}{K_{i \max} - K_{i \min}}, & \text{при } K_{ij} \leq K_{i \min} + \Delta K_i; \\ 0, & \text{у протилежному випадку;} \end{cases}$$

а для критерію, що максимізується:

$$\mu_i(j) = \begin{cases} 1 - \frac{K_{i \max} - K_{ij}}{K_{i \max} - K_{i \min}}, & \text{при } K_{ij} \geq K_{i \max} - \Delta K_i; \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Тут  $K_{ij}$  – значення  $i$ -го локального критерію для  $j$ -го варіанта структури компонування багатомономенклатурної АВС;  
 $K_{i\max}$ ,  $K_{i\min}$  – максимальне і мінімальне значення  $i$ -го критерію;  
 $\Delta K_i$  – допустима поступка за  $i$ -м критерієм.

Нечітка множина  $A$ , що відповідає векторному критерію  $K$ , – це перетин нечітких множин  $A_i$ , а функція приналежності  $\mu_A(j)$  має вигляд

$$\mu_A(j) = \min\{\mu_1(j), \mu_2(j), \mu_3(j), \dots, \mu_n(j)\}.$$

Оптимальному розв'язанню багатокритеріальної задачі відповідає функція приналежності

$$j_{opt} : \mu_A(j_{opt}) = \max \mu_A(j) = \max \min\{\mu_1(j), \mu_2(j), \dots, \mu_n(j)\}.$$

Значення функції приналежності для локальних критеріїв конкуруючих варіантів структурно-технологічних варіантів багатомономенклатурних АВС наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Значення функцій приналежності для локальних критеріїв

Функція приналежності	Варіанти компонувань багатомономенклатурних АВС					
	1	2	3	4	5	6
$\mu_C$	0	0,11	0,37	0,57	0,80	1,0
$\mu_W$	0	0,068	0,16	0,44	0,76	1,0
$\mu_G$	1,0	0,83	0,67	0,5	0	0,17
$\mu_\eta$	0,86	0,57	0,29	0	1,0	0,71
$\mu_P$	0	0,05	0,79	0,71	0,76	1,0
$\mu_A$	0	0,05	0,16	0	0	0,17

На рис. 5.10 наведено графіки функцій приналежності для локальних критеріїв оптимальності за варіантами технологічного компоунання багатоменклатурних АВС.

Як бачимо, найвигіднішим є шостий варіант, якому відповідає  $\mu_A = 0,17$ . Крім того, цей же варіант кращий і за деякими іншими критеріями.

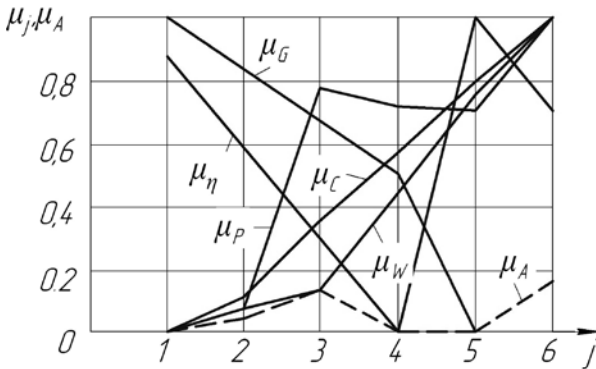


Рис. 5.10. Графіки функцій приналежності для локальних критеріїв оптимальності варіантів технологічного компоунання багатоменклатурної АВС

## 5.6. Проект технологічного компоунання багатоменклатурної агрегатної верстатної системи

Кришка та картер шестірень шестициліндрового дизельного двигуна мають складну геометричну форму. У загальній трудомісткості виготовлення цих деталей переважають технологічні операції з обробки допоміжних, зокрема кріпильних отворів.

Аналіз технологічності конструкції деталей і схем базування, прийнятих при обробці отворів, дозволяє зробити висновок про можливість обробки картера шестірень та кришки у багатоменклатурній АВС. Так, спільність схеми базування та однакові розміри базових отворів обох деталей дають можливість установлювати їх заготовки у непереналагоджуваний верстатний пристрій.

За робочими кресленнями деталей і технічними умовами на їх виготовлення визначені маршрути обробки отворів і обрані РІ та вихідні режими різання.

Склад технологічно мінімальних комплектів РІ для обробки отворів картера шестірень і кришки та прийняті режими різання наведені у табл. 5.3, 5.4, де S – свердло; Z – зенкер; r – розвертка; m – мітчик.

З метою подальшого розроблення та аналізу можливих варіантів структури багатоінструментної обробки вся множина РІ поділяється на такі підмножини:

- 1) РІ, що обробляють отвори з однаковими геометричними параметрами і координатами в обох деталях;
- 2) РІ, що обробляють отвори з однаковими геометричними параметрами, але різними координатами;
- 3) РІ, що обробляють отвори, які не мають однакових характеристик.

На рис. 5.11 наведена діаграма, що характеризує співвідношення технологічних інтенсивностей формоутворення одиничними РІ, які складають першу підмножину.

Як бачимо, поле розсіювання технологічних інтенсивностей формоутворення у підмножині становить  $\Delta W_T = 143$  мм/хв. При послідовній зміні допустимого поля розсіювання технологічної інтенсивності одиничними РІ  $\Delta W_H$  у межах одного багатоінструментного налагодження формуються технічно можливі варіанти комплектів багатоінструментних налагодок. При об'єднанні РІ у багатоінструментні налагодження враховуються технічні обмеження на послідовність виконання та суміщення технологічних переходів, а також характеристики силових агрегатів і шпindelльної оснастки. В результаті сумісного розгляду підмножин РІ, що обробляють деталі «Картер шестірень» і «Кришка», остаточно сформовані структури багатоінструментних налагоджень і виконані розрахунки їх параметрів.

Наприклад, взявши початкове значення  $\Delta W_{H1} = 20$  мм/хв, отримаємо перший варіант структури багатоінструментної обробки (комплект багатоінструментних налагоджень):



Таблиця 5.3

Склад технологічно мінімального комплексу різальних інструментів  
для обробки деталі «Картер шестірень» та режими різання

Номер отвору	Код PI	Параметри отворів, мм		$S_o$ , мм/об.	$V$ , м/хв	$n$ , об./хв	$W_T$ , мм/хв	$t_o$ , хв
		$d$	$L$					
1,2	1S1, 1S2	18	51	0,45	15	267	120	0,016
1,2	1Z1, 1Z2	19,2	56	0,50	14	235	118	0,016
1,2	1r1, 1r2	20,0	56	1,20	7	114	137	0,024
3,4	1S3, 1S4	14,0	46	0,25	16	358	90	0,019
3,4	1Z3, 1Z4	15,0	46	0,45	14	301	135	0,012
5–8	1S5–1S8	11,0	46	0,20	15	427	85	0,020
9	1S9	30,0	7,5	0,55	14	153	84	0,010
10–16	1S10–1S16	12,0	46	0,25	16	412	103	0,017
17–20	1S17–1S20	7,5	15	0,18	20	833	150	0,006
17–20	1Z17–1Z20	8,6	15	0,30	14	525	158	0,005
17–20	1m17-m20	10–2H	14	0,75	9	287	215	0,001
21,22	1S21, 1S22	8,5	16	0,24	18	670	161	0,005
21,22	1m21, 1m22	10–7H	11	0,75	9	287	215	0,001
23–25	1S23–1S25	6,8	25	0,12	19	892	107	0,010
23–25	1m23-1m25	8–6H	24	0,75	9	358	269	0,001
26	1S26	10,2	32	0,20	17	518	104	0,013
26	1m26	12–6H	31	0,75	10	265	199	0,001

Таблиця 5.4

Склад технологічно мінімального комплексу різальних інструментів  
для обробки деталі «Кришка» та режими різання

Номер отвору	Код PI	Параметри отворів, мм		$S_o$ , мм/об.	$V$ , м/хв	$n$ , об./хв	$W_T$ , мм/хв	$t_o$ , хв
		$d$	$L$					
1,2	2S1, 2S2	18,0	58	0,30	14	240	72	0,018
1,2	2z1, 2z2	19,2	60	0,50	13	213	107	0,012
1,2	2r1–2r2	20,0	60	1,20	7	114	137	0,20
3–5	2S3–2S5	8,0	38	0,16	14	558	89	0,010
3–5	2Z3–2Z5	9,0	36	0,30	13	455	136	0,006
6,7	2S6, 2S7	14,0	36	0,35	15	336	118	0,008
6,7	2Z6, 2Z7	15,0	38	0,45	13	273	123	0,007
8–11	2S8–2S11	10,0	48	0,20	13	422	84	0,013
8–11	2Z8–2Z11	11,0	52	0,40	13	372	149	0,007
12–15	2S12–2S15	12,0	58	0,25	12	329	82	0,015
12–15	2Z12–2Z15	13,0	60	0,45	13	315	142	0,009
16	2S16	9,0	13	0,24	16	577	138	0,004
16	2m16	10,0	11	0,75	9	287	215	0,001
17–21	2S17–2S21	5,9	20	0,08	19	1051	84	0,007
17–21	2Z17–2Z21	6,7	20	0,30	13	611	183	0,003
17–21	2m17–2m21	8,0	18	0,75	9	358	269	0,001
22–25	2S22–2S25	8,5	30	0,16	16	599	96	0,008

- 1-ше налагодження: 2S1, 2S2, 2S8–2S11, 2S13–2S15;  
 2-ге налагодження: 2Z1, 2Z2;  
 3-тє налагодження: 2r1, 2r2;  
 4-тє налагодження: 2S6, 2S7;  
 5-тє налагодження: 2Z6, 2Z7;  
 6-тє налагодження: 2m16.

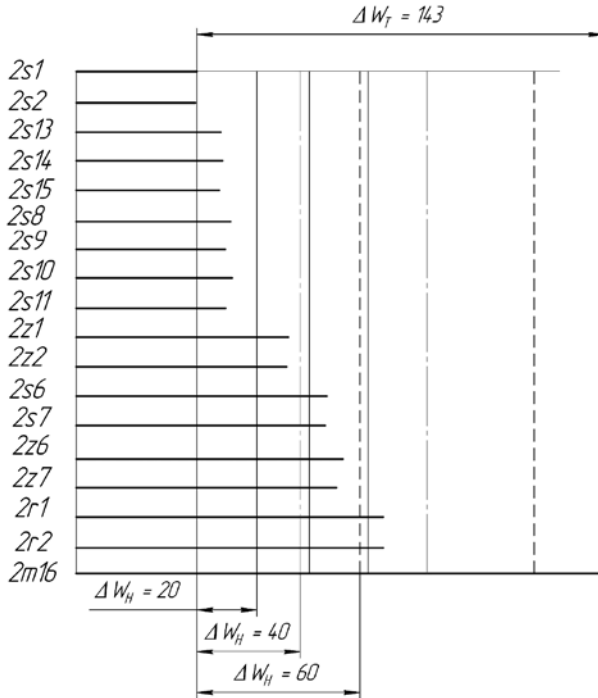


Рис. 5.11. Діаграма технологічних інтенсивностей формоутворення різальних інструментів, що обробляють отвори в обох деталях

При збільшенні допустимого поля розсіювання інтенсивності формоутворення  $\Delta W_{H2} = 40$  мм/хв маємо такий склад багатоприладних налагоджень, що утворюють другий варіант комплекту:

- 1-ше налагодження: 2S1, 2S2, 2S8–2S11, 2S13–2S15;  
 2-ге налагодження: 2Z1, 2Z2;

3-тє налагодження: 2S6, 2S7, 2r1, 2r2;

4-тє налагодження: 2Z6, 2Z7;

5-тє налагодження: 2m16.

При збільшенні допустимого поля розсіювання інтенсивності формоутворення  $\Delta W_{H3} = 60$  мм/хв отримаємо:

1-ше налагодження: 2S1, 2S2, 2S6, 2S7, 2S8–2S11, 2S13–2S15;

2-ге налагодження: 2Z1, 2Z2, 2Z6, 2Z7;

3-тє налагодження: 2r1, 2r2;

4-тє налагодження: 2m16.

Далі аналізуємо всі варіанти комплектів багатоінструментних налагоджень. Як приклад розглянемо розрахунки для останнього варіанта, що відповідає максимальному ступеню концентрації технологічних переходів. Аналогічно досліджується і решта підмножин РІ на основі діаграм технологічних інтенсивностей формоутворення одиничними РІ. В результаті сумісного розгляду підмножин РІ для обробки картера шестірень і кришки остаточно сформовані структури багатоінструментних налагоджень і виконані розрахунки їх параметрів (табл. 5.5, 5.6).

Таблиця 5.5

Параметри багатоінструментних налагоджень для обробки деталі «Картер шестірень»

Номер налагодження	Кількість РІ у налагодженні, шт.	$t_{цн}$ , хв	$t_o$ , хв	$t_{ун}$ , хв	$P_o$ , Н	$N_{ном}$ , кВт
1	20	0,52	0,50	0,02	44651,1	30,00
2	4	0,32	0,30	0,02	340,4	0,75
3	9	0,49	0,47	0,02	8349,3	5,50
4	4	0,10	0,09	0,01	318,0	0,75
5	8	0,20	0,18	0,01	40,0	0,75
6	3	0,12	0,11	0,01	3,0	0,75

Примітка.  $t_{\text{цн}}$  – час циклу налагодження;  $t_o$  – основний (технологічний) час;  $t_{\text{шп}}$  – час швидких переміщень;  $P_o$  – осьова сила;  $N_{\text{ном}}$  – потужність електродвигуна.

Таблиця 5.6  
 Параметри багатоінструментних налагоджень  
 для обробки деталі «Кришка»

Номер налагодження	Кількість РІ у налагодженні, шт.	$t_{\text{цн}}$ , хв	$t_o$ , хв	$t_{\text{шп}}$ , хв	$P_o$ , Н	$N_{\text{ном}}$ , кВт
1	24	0,6	0,6	0,0	33521,	22,0
2	11	0,6	0,5	0,0	16226,	4,00
3	23	0,5	0,5	0,0	35023,	5,50
4	5	0,1	0,0	0,0	271,0	0,75
5	8	0,2	0,2	0,0	33,0	0,75
6	9	0,1	0,1	0,0	25,0	0,75

На базі сформованих варіантів комплектів багатоінструментних налагоджень розробляємо технічно можливі варіанти структури багатопозиційної обробки, для кожного з яких визначаються час циклу, коефіцієнт технічного використання, технічна продуктивність, а також економічні показники. Для подальшого аналізу виділяємо структурно-технологічні варіанти АВС, що забезпечують виконання заданої річної виробничої програми випуску виробів (150 тис. шт.).

Найвигідніший варіант багатонаменклатурної АВС для обробки як картера шестірень, так і кришки обирається шляхом багатокритеріальної оптимізації з використанням методів теорії нечітких множин. Схеми оптимального компонування багатонаменклатурної АВС та існуючих АВС для обробки кожної деталі окремо показані на рис. 5.12. Технічні характеристики АВС наведені в табл. 5.7.

Порівняльний аналіз питомої інтенсивності формоутворення, що припадає на один РІ, на цих АВС,

результати якого наведені в табл. 5.8 і на рис. 5.13, підтверджує ефективність обраного структурно-технологічного варіанта компоновки багатомоделіної АВС.

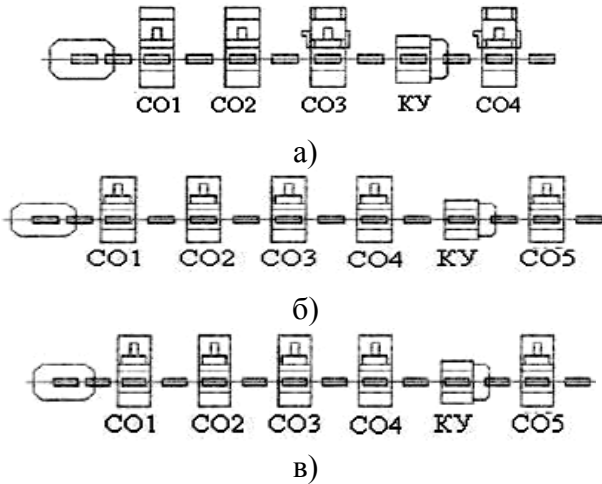


Рис. 5.12. Схеми компоновки агрегатних верстатних систем:  
 а – багатомоделіної; б – для обробки картера шестірень;  
 в – для обробки кришки

Таблиця 5.7

Технічні характеристики агрегатних верстатних систем

Оброблювана деталь	$\tau_{ABC}, c$	$Q, \text{шт./год}$	$\eta_{т.в}$
Картер шестірень і кришка	60/69,6	45/38	0,76
Картер шестірень	60	42	0,7
Кришка	60	42	0,7

Примітка.  $\tau_{ABC}$  – такт АВС.

Запропонована методика синтезу технологічних компонок агрегатного металорізального обладнання забезпечує максимальну достовірність та обґрунтованість вибору найвигідніших рішень, який здійснюється в результаті комплексного аналізу низки взаємозв'язаних задач (вибір вихідних режимів різання технологічно мінімальним

комплектом РІ; формування варіантів структури багатоінструментної та багатопозиційної обробки), а також багатокритеріальної оптимізації з використанням методів теорії нечітких множин.

Таблиця 5.8

Інтенсивність формоутворення агрегатних верстатних систем

Показник питомої інтенсивності формоутворення, мм/хв	Агрегатна верстатна система для обробки		
	картера шестірень і кришки	картера шестірень	кришки
$\overline{W}_T$	118,8	113,1	105,9
$\overline{W}_{BI}$	97,2	39,5	58,3
$\overline{W}_{BII}$	50,2	28,5	45,5
$\overline{W}_{BIII}$	43,7	–	–
$\overline{W}_{ABC}$	37,6	20,5	31,9

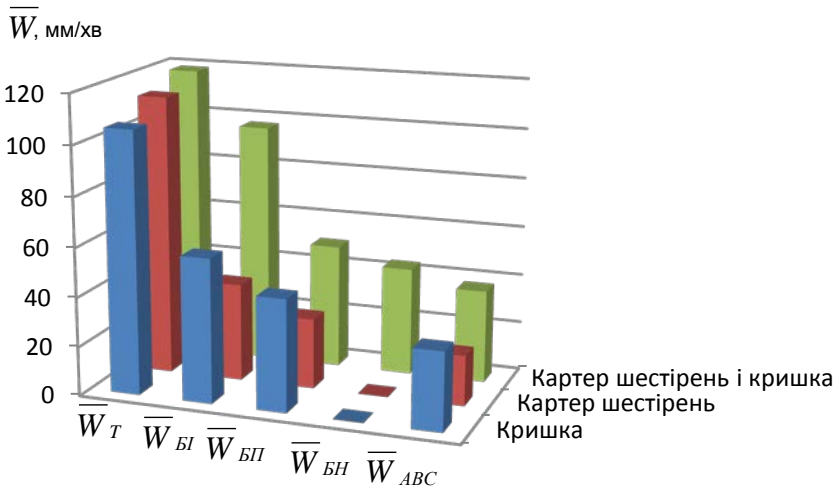


Рис. 5.13. Діаграма інтенсивності формоутворення на спроектованій та існуючих агрегатних верстатних системах

Дослідження інтенсивності багатоінструментної обробки методами математичного та ймовірнісного моделювання

дозволило виявити закономірності вибору вихідних режимів різання технологічним комплектом РІ. Установлено, що величина оптимального періоду стійкості комплекту РІ, яка відповідає максимальній інтенсивності формоутворення, залежить від матеріалу різальної частини йі часу зміни РІ, а також їх кількості у комплекті та надійності.

Аналіз динаміки зміни економічних витрат, які залежать від режимів різання, при збільшенні періоду стійкості комплекту РІ показав, що в зоні стійкостей, які відповідають максимальній інтенсивності багатоінструментної обробки, економічні витрати зі зміною періоду стійкості змінюються неістотно. Отже, вибір інтенсивності формоутворення як критерію оптимальності при визначенні режимів різання обґрунтований.

Запропонована методика формування варіантів структури багатоінструментної обробки, що базується на використанні показника інтенсивності формоутворення як параметра варіювання, підтверджує ефективність застосування цього критерію для синтезу ТС.

Структура розробленої методики синтезу структурно-технологічних схем компонувань агрегатного металорізального обладнання має розгалужений характер, коли кожне рішення попереднього етапу породжує кілька рішень на наступному, тобто оптимізація здійснюється комплексно, а не локально; при цьому на кожному етапі синтезу використовується лише достовірна інформація, обсяг якої розширюється та поглиблюється на кожному подальшому рівні. Такий підхід забезпечує максимальну обґрунтованість і достовірність отриманих рішень.

Методологія багатокритеріальної оптимізації структурно-технологічних компонувань АВС із використанням методів теорії нечітких множин базується на системі економічних і технічних критеріїв, а також системі технічних обмежень, що утворюють математичну модель об'єкта оптимізації, дозволяє розв'язувати задачу оптимізації на основі неповної інформації про параметри функціонування ТС.



## **6. Вибір оптимальних компонентів верстатних пристроїв для верстатів із ЧПК**

### **6.1. Системи верстатних пристроїв для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів із ЧПК**

Для базування та закріплення деталей на металорізальних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК застосовують спеціальні та гнучкі ВП. Спеціальні ВП (СВП) забезпечують високу продуктивність і точність обробки поверхонь заготовок за рахунок високої жорсткості конструкції. Вони призначені для виконання однієї технологічної операції, що дозволяє врахувати всі її особливості, а отже, сприяє зниженню трудомісткості під час обробки заготовок та контролю деталей. Однак недоліком СВП є підвищення витрат на проектування та виготовлення елементів конструкції, а також неможливість їх застосування для обробки інших деталей. У багатономенклатурному виробництві СВП раціонально використовувати лише у випадках, коли неможливо забезпечити необхідну точність іншими засобами.

Гнучкі ВП забезпечують переналагодження елементів ВП при зміні номенклатури оброблюваних деталей. За спільністю способів забезпечення гнучкості їх можна розподілити на переналагоджувані та збірні [36] (рис. 6.1).

До перших належать універсально-безналагоджувані пристрої (УБП), спеціалізовані безналагоджувані пристрої (СБП), універсально-налагоджувані пристрої (УНП), спеціалізовані налагоджувані пристрої (СНП), автоматично переналагоджувані пристрої (АПП). До систем збірних ВП належать універсально-збірні пристрої (УЗП), універсально-збірні пристрої для верстатів із ЧПК (УЗП-ЧПК), універсально-збірні пристрої механізовані (УЗПМ), збірно-розбірні пристрої (ЗРП), універсально-збірно переналагоджуване оснащення (УЗПО).



Рис. 6.1. Класифікація гнучких верстатних пристроїв

У розвитку ВП можна виділити декілька періодів, пов'язаних зі створенням різних систем ВП. Так, на початку ХХ століття з'явилися СПВ. У середині 1920-х років з метою підвищення гнучкості розробляються конструкції УБП, потім – системи переналагоджуваних пристроїв УНП (1930-ті роки) і СНП (1940-ві роки). У 1950-х роках під керівництвом інженерів Кузнецова В. С. і Пономарьова В. А. було створено систему УЗП, а у 1960-х роках під керівництвом канд. техн. наук Філатова Г. В. та інженера Леонова С. І. – систему ЗРП. Значно вдосконалила існуючі системи збірних ВП система УЗПО, яку було розроблено у 1970-х роках. Періодизацію створення різних систем ВП наведено на рис. 6.2 [37].

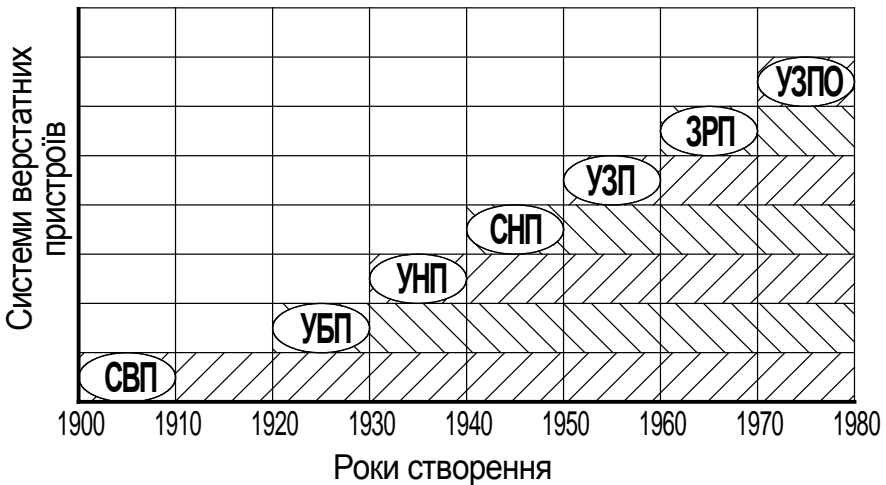


Рис. 6.2. Періодизація створення різних систем верстатних пристроїв

Кожна система ВП має свої переваги щодо застосування у виробництві й становить певну частку у загальній кількості ВП на підприємствах, забезпечуючи необхідний ступінь гнучкості й рівень продуктивності, а також відповідну точність обробки в обраному пристрої. В умовах багатомоделного виробництва використовуються, як правило, одночасно кілька систем ВП. Наприклад, структуру типів застосовуваних систем ВП на підприємствах серійного типу виробництва наведено на

рис. 6.3. Так, 65% становлять системи переналагоджуваних ВП, 25% – системи збірних ВП, 10% – СВП.

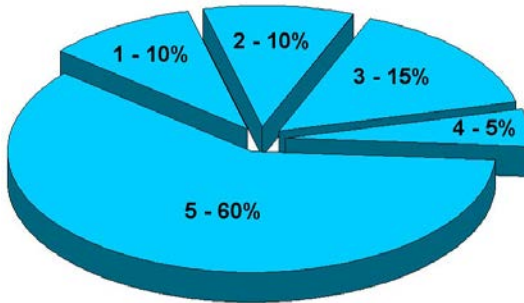
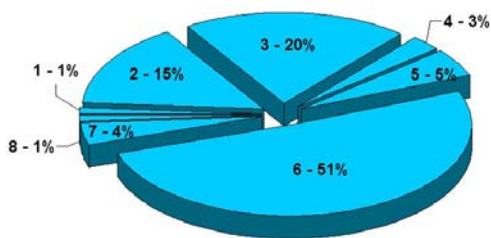


Рис. 6.3. Співвідношення питомої ваги систем ВП для підприємств серійного типу виробництва: 1 – СВП; 2 – УЗП; 3 – ЗРП; 4 – УБП; 5 – УНП і СНП

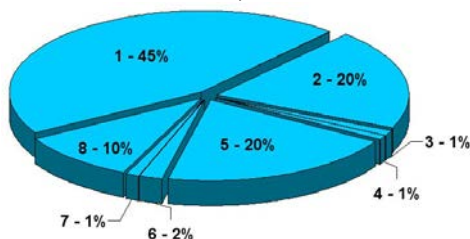
Системи збірних ВП – це комплекти елементів уніфікованих деталей та складальних одиниць, які виготовлені з високою точністю з легованих сталей і не потребують подальшої обробки. Принцип застосування збірних ВП: складання – експлуатація – розбирання – складання нового компонування і т.д.

Таким чином, після обробки партії заготовок компонування з елементів збірних ВП розбирають на деталі, які пізніше використовуються для складання компонувань пристроїв для обробки інших деталей. Це виключає найбільш трудомісткі етапи підготовки виробництва – проектування і виготовлення елементів ВП. Елементи збірних ВП за функціональним призначенням можна поділити на базові, корпусні, установлювальні, напрямні, кріпильні, затискні деталі, а також складальні одиниці. Для ефективного використання обраної системи ВП елементи у її комплекті потрібно розподіляти у визначеному співвідношенні (рис. 6.4) [38].

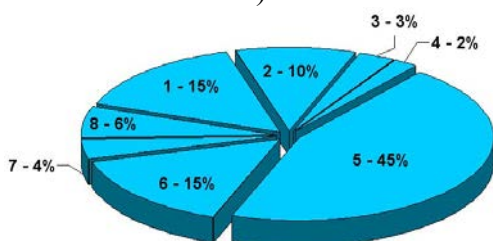
Система УЗП застосовується у багатонаменклатурному виробництві і є комплектом елементів кількістю 1500–25000 деталей та складальних одиниць, призначених для складання різних компонувань ВП.



а)



б)



в)

Рис. 6.4. Розподіл елементів ВП у їх структурі: а – за найменуванням;

б – за металомісткістю;

в – за трудомісткістю виготовлення:

1 – базові деталі; 2 – корпусні деталі;

3 – установлювальні елементи;

4 – напрямні елементи; 5 – затискні

елементи; 6 – кріпильні елементи;

7 – інші елементи; 8 – складальні  
одиниці

Стандартами передбачено три комплекти УЗП, які розрізняються за шириною Т-подібного паза: УЗП-8 застосовуються у приладобудуванні, радіо- та електронній промисловості для обробки деталей невеликих габаритних розмірів (480x180x240 мм) вагою до 5 кг; УЗП-12 застосовуються у всіх галузях машинобудування при обробці деталей середніх розмірів (1440x300x720 мм) і вагою до 60 кг; УЗП-16 – застосовуються у важкому машинобудуванні для обробки великих деталей (2500x2500x1000 мм), маса яких досягає 3000 кг. Термін служби елементів комплекту УЗП у середньому становить 10–15 років. Точність обробки поверхонь деталей у компонуваннях ВП з елементів УЗП знаходиться у межах 8–10 квалітета [39].

Наявність взаємно перпендикулярних Т-подібних пазів на базових деталях дозволяє встановлювати установлювальні та затискні елементи у будь-якому місці вздовж пазів, що дозволяє

базувати різні за формою та розмірами заготовки. Установлення елементів у поперечному напрямку дискретне і залежить від відстані між Т-подібними пазами. Фіксація елементів здійснюється системою «шпонка – точний паз» при гарантованому зазорі (0,01–0,02 мм) [40], а закріплення деталей – кріпильними болтами. Переналагодження ВП при зміні об'єкта обробки здійснюється тільки вручну шляхом перекомпонування нерегульованих елементів у межах корпусу і триває 2–4 години залежно від складності компонування та кваліфікації слюсаря-складальника. Недостатня жорсткість компонувань ВП змушує знижувати режими різання, а у сполученні з ручним переналагодженням ВП та закріпленням заготовок призводить до зниження продуктивності обробки в результаті простоїв металорізального обладнання.

Система УЗП-ЧПК забезпечує механізоване закріплення заготовок завдяки наявності у базових плитах убудованих пневмо- або гідроциліндрів, а також застосування магнітних плит. Кількість елементів у комплекті УЗП-ЧПК значно менша порівняно із системою УЗП і дозволяє встановлення заготовок з розмірами до 600x400x300 мм при обробці на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК і багатоцільових верстатах. Базові деталі виконано з мінімальною кількістю стиків, що підвищує жорсткість компонувань ВП. Із деталей та складальних одиниць комплекту УЗП-ЧПК можна одночасно скласти до 15 компонувань ВП. Приєднувальні розміри деталей та складальних одиниць УЗП-ЧПК відповідають стандартам УЗП і забезпечують повну взаємозамінність із деталями та складальними одиницями комплекту УЗП з ручним закріпленням, тим самим збільшуючи технологічні можливості існуючих комплектів УЗП.

Система УЗПМ на відміну від УЗП має механізований привід для закріплення оброблюваних заготовок. Комплекти елементів системи УЗПМ виготовляють із пазами 12 і 16 мм. Комплект УЗПМ-12 рекомендується застосовувати для обробки деталей з габаритними розмірами до 400x400x260 мм при затискному зусиллі не більше 30 кН. За необхідності збільшення

затискних зусиль або при обробці деталей з габаритними розмірами до 1000x600x400 мм необхідно застосовувати комплект УЗПМ-16. Термін служби комплекту 10–12 років [38, 41]. Базовими деталями комплектів є гідроблоки – прямокутні плити з Т- і П-подібними пазами і вбудованими гідроциліндрами двосторонньої дії, на яких компонують установлювальні й затискні елементи. До комплекту входять також окремі гідроциліндри, розраховані на робочий тиск 10 МПа. Зручністю компонувань з гідроблоками є те, що маслопідвідні магістралі не виступають над робочою поверхнею плити. Переналагодження компонувань із елементів системи УЗПМ виконується шляхом перекомпонування окремих елементів у межах корпусу, а також передбачено регулювання установлювальних елементів, таких як опори та деяких конструкцій притискачів у межах заданих технічних характеристик.

ЗРП відрізняються від УЗП елементами фіксації деталей та складальних одиниць одна відносно одної, а також ступенем механізації закріплення заготовок. Елементи системи ЗРП з'єднуються між собою болтами, шпильками, гвинтами і фіксуються один відносно одного системою «циліндричний палець – точний отвір», що гарантує більш високу точність, ніж з'єднання «шпонка – точний паз» у компонуваннях з елементів УЗП. Деталі та складальні одиниці встановлюються на базових плитах у поздовжніх Т-подібних пазах. Відсутність поперечних Т-подібних пазів значно підвищує жорсткість базових плит порівняно з плитами комплекту УЗП і дозволяє повноцінно використовувати потужність металорізальних верстатів. Механізоване закріплення заготовок забезпечується наявністю вбудованих у плити гідроциліндрів, а також гідравлічних притискачів із зусиллям до 30 кН при робочому тиску гідросистеми 10 МПа [40]. Компонування ЗРП на столі верстата базують по центральному отвору і пазу. Термін служби елементів становить 10–15 років. Кількість елементів у комплекті залежить від його типорозміру і може становити від 840 до 1200 шт., що забезпечує встановлення деталей масою до

3000 кг з габаритними розмірами до 1000x900x800 мм [38]. Переналагодження елементів також здійснюється вручну шляхом заміни або перекомпонування деталей та складальних одиниць на базовій плиті. Деякі конструкції опор, призм і притискачів можуть регулюватися у межах заданих технічних характеристик. Час складання одного компонування ВП триває 0,5–2 години. Для підвищення точності обробки заготовки припускається додаткове доопрацювання базових поверхонь після складання компонентування. Компонування ВП з елементів системи ЗРП складаються на період випуску виробу і після обробки партії заготовок ВП не розбирають (на відміну від компонентувань з елементів УЗП), а зберігають до запуску нової партії [40]. Тому вимоги до зносостійкості деталей та складальних одиниць системи ЗРП значно нижчі, ніж до деталей системи УЗП.

Під час розроблення системи УЗПО велику увагу приділено підвищенню точності й жорсткості елементів, ступеню механізації, а також зменшенню кількості елементів у комплекті. При з'єднанні елементів використовується беззасорна система фіксації (штифтова або кулькова), яка дозволяє підвищити точність базування елементів при складанні компонентувань ВП. Відсутність Т- і П-подібних пазів на базових плитах комплекту УЗПО значно підвищує жорсткість компонентувань. Гідравлічні пристрої на відміну від системи УЗПМ розраховані на робочий тиск 20 МПа. Розроблено три серії системи УЗПО, кожна з яких складається приблизно з 1700 деталей та складальних одиниць, що дозволяє встановлювати заготовки масою до 500 кг. Час складання компонентувань середньої складності – 2,5–3 години [41]. Підвищення жорсткості елементів і ліквідація зазорів при з'єднанні дозволяють підвищити режими різання, застосування механізованих пристроїв сприяє скороченню часу на закріплення-розкріплення заготовок, однак ручне переналагодження елементів, що виконується дискретно і відповідає кроку отворів на плиті, знижує ефективність



застосування системи УЗПО на верстатах із ЧПК. Технічні характеристики систем збірних ВП наведено у табл. 6.1 [38–41].

Таким чином, існуючі системи збірних ВП є універсальними за виготовленням, однак після складання компонування вони стають спеціальними. Переналагодження всіх систем збірних ВП здійснюється тільки вручну шляхом перекомпонування нерегульованих елементів у межах корпусу ВП.

У деяких компонуваннях ВП передбачено регулювання установлювальних елементів, таких як опори, та деяких конструкцій притискачів у межах заданих технічних характеристик.

Переналагодження збірного ВП при зміні об'єкта обробки триває від 30 хвилин до 4 годин залежно від складності компонування та кваліфікації слюсаря-складальника. При цьому значно збільшується підготовчо-заклучний час, а отже, знижується продуктивність обробки.

Застосування нерегульованих елементів ВП зумовлює збільшення їх числа в комплекті для обробки широкої номенклатури деталей, що, у свою чергу призводить до збільшення металомісткості та вартості комплекту. Так, для установлення ступінчастих валів діаметрами 5–150 мм на свердлильних та фрезерних верстатах необхідно 2 комплекти призм, кожний з яких складається з 10 типорозмірів. З економічної точки зору впровадження комплекту елементів збірних ВП пов'язане з великими попередніми капіталовкладеннями, які на сьогодні, наприклад, для комплекту елементів УЗП-8 становлять більше 400 тисяч гривень. Такі витрати не відповідають економічним можливостям більшості вітчизняних машинобудівних підприємств.

За кордоном система ВП подібна існуючим у нас збірним ВП називається модульною і застосовується для виконання багатьох технологічних операцій на металорізальних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК.

Таблиця 6.1

## Технічні характеристики систем збірних верстатних пристроїв

Система збірних ВП	Максимальні габаритні розміри заготовок (довжина x ширина x висота), мм	Максимальна маса заготовки, кг	Середній час складання одного компонування ВП середньої групи складності, год	Кількість деталей та складальних одиниць у комплекті, шт.	Кількість компонувань ВП середньої складності, що складаються одночасно (протягом року), шт.	Точність обробки деталей у компонуваннях ВП, квалітет
УЗП-8	480x180x240	5	2	4100	30 (1800)	8–10
УЗП-12	1440x300x720	60	3	2400	20 (1400)	8–10
УЗП-16	2400x2400x960	3000	4	4200	20 (900)	8–10
УЗПМ-12	400x400x260	–	2	331	14 (1000)	6–8
УЗПМ-16	1000x600x400	–	3	298	10 (750)	6–8
ЗРП-14	900x360x600	–	0,5	1200	17 (–)	7
ЗРП-18	900x360x600	–	0,5	1200	17 (–)	7
ЗРП-22	1000x900x800	3000	1–2	840	6 (–)	7
УЗПО-8	–	5	3	1600	32 (2100)	7–10
УЗПО-12	–	50	3	1700	32 (2100)	7–10
УЗПО-16	–	500	3	1700	32 (2100)	7–10

Найбільш відомими виробниками модульних ВП є Blüco Technik, VEB Hanenstein, Erwin Halder KG, Scharmann, Hilma, Römheld GmbH (усі Німеччина), Bluco Modular Fixturing, Elliot, Carr Lane, Stevens Engineering, Fixtureworks, Bock Workholding Inc. (усі США), Prematex, Wahli, Precision Aids Ltd (усі Швейцарія), Wharton, News Engineering (усі Англія), Herbst (Данія), Destaco (Угорщина), Hertford Norelen (Франція), Salen Wiander (Швеція) [42–45].

Комплекти модульних ВП різних виробників відрізняються між собою кількістю елементів у комплекті, номінальними розмірами Т- і П-подібних пазів, діаметрами базуючих і кріпильних отворів, величиною відстані між рядами пазів і отворів, кількістю базових елементів у комплекті, способами базування елементів на базовій плиті, технологічними можливостями. Однак спільним для всіх систем модульних ВП є модульний принцип побудови, що дозволяє багаторазове використання елементів комплекту для створення нових компонувань ВП. Вартість типового комплекту модульного ВП, який складається з чотирьох немеханізованих базових плит і 3076 деталей, на сьогодні становить близько 76 тис. доларів США [45].

Переналагоджувані ВП характеризуються високим ступенем гнучкості, оскільки при переході від обробки деталей однієї групи до іншої вони не потребують перекомпонування ВП, а виконується регулювання установлювально-затискних елементів (безналагоджувані пристрої) або заміна спеціальних змінних наладок (налагоджувані пристрої), для чого необхідно витратити значно менше часу.

Пристрої системи УВП – це готові до застосування конструкції, які призначені для багаторазового використання з постійними (незмінними) установлювальними елементами в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва. Такі ВП призначені для встановлення широкої номенклатури оброблюваних деталей. Пристрої системи СВП відрізняються меншою універсальністю, ніж УВП і дозволяють встановлення заготовок, близьких між собою за конструктивно-

технологічними ознаками. Переналагодження пристроїв систем УБП і СБП при зміні об'єкта обробки здійснюється шляхом регулювання установлювально-затискних елементів у широкому діапазоні та потребує найменших витрат часу на переналагодження порівняно з іншими системами гнучких ВП. Точність обробки поверхонь деталей у безналагоджуваних ВП не вище 9-го квалітета. Відсутність взаємозамінних елементів з іншими системами ВП обмежує універсальність, технологічні можливості й точність обробки поверхонь деталей.

Сфера застосування УНП і СНП охоплює всі типи виробництва в умовах групової технології обробки деталей. Пристрої зазначених систем ВП складаються з базового агрегату і спеціальних змінних наладок. Базовий агрегат – це на 80–90% готовий до застосування ВП [38] та використовується багаторазово, що значно скорочує термін підготовки виробництва. Базові агрегати системи УНП універсальні й використовуються для встановлення заготовок різної геометричної форми з однаковою схемою базування. СНП мають спеціалізовані базові агрегати (переважно механізовані) й застосовуються для встановлення заготовок подібних за геометричною формою і схемами їх базування та закріплення. Змінна наладка – це самостійна складальна одиниця, що проектується відповідно до форми та габаритних розмірів оброблюваних заготовок і забезпечує необхідне її положення у ВП. Трудомісткість виготовлення змінних наладок на 60–70% менша за трудомісткість виготовлення СВП, а їх вартість становить 5–15% вартості базового агрегату [40]. Як правило, одному базовому агрегату відповідає 7–10 змінних наладок. Після встановлення змінної наладки за точними пазами або отворами базового агрегату ВП придатний до застосування. Отже, один налагоджуваний ВП з комплектом змінних наладок дозволяє замінити до десяти СВП, необхідних для обробки різних деталей. За даними застосування налагоджуваних ВП дозволяє отримати 8–9-й квалітет точності обробки поверхонь деталей.

Найбільш відомими світовими виробниками переналагоджуваних ВП є фірми Brown and Sharpe, Moog, Kearney and Trecker, Newamerican Controle Center (усі США), Burgmaster, Center Engineering, Coventry Gange (усі Англія), Muirhead Ltd (Японія) [46, 47].

До переваг систем УНП і СНП належать: ефективне використання групового методу обробки, скорочення витрат на оснащення порівняно із системами збірних ВП, можливість обробки широкої номенклатури деталей. Переналагодження УНП і СНП відбувається шляхом ручної заміни змінних наладок. Деякі конструкції системи СНП дозволяють регулювання установлювальних елементів базового агрегату в межах технічних характеристик. Однак відсутність уніфікації базових агрегатів та неможливість їх використання зі збірними ВП знижують ефективність одночасного застосування кількох систем ВП на підприємстві.

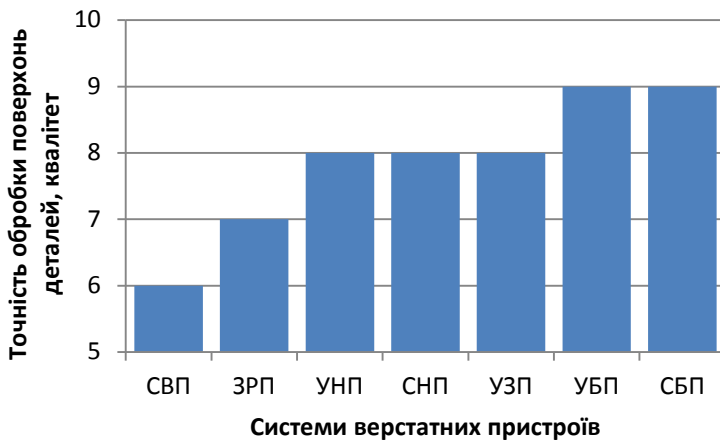
Система АПП забезпечує автоматизоване переналагодження установлювальних і затискних елементів за керуючою програмою системи ЧПК, до якої вводять дані про тип і положення оброблюваної заготовки на операції. Переналагодження установлювальних і затискних елементів виконується у широкому діапазоні, а дані про положення установлювальних елементів (основних і допоміжних), а також місця прикладання сил закріплення програмують і вводять до системи ЧПК. При цьому позиціонування установлювальних елементів повинне забезпечуватися з високою точністю, в той час коли для позиціонування затискних елементів високої точності не потрібно.

АПП стаціонарні, тобто є частиною верстата, і реалізують переважно одну зі схем базування заготовок, наприклад, для базування корпусних деталей за трьома площинами, за двома площинами й отвором, за площиною і двома отворами тощо [41]. Причому базова поверхня заготовок може бути як плоскою, так і ступінчастою. Різниця між виступами компенсується за рахунок незалежного регулювання установлювальних елементів. У АПП можна встановлювати

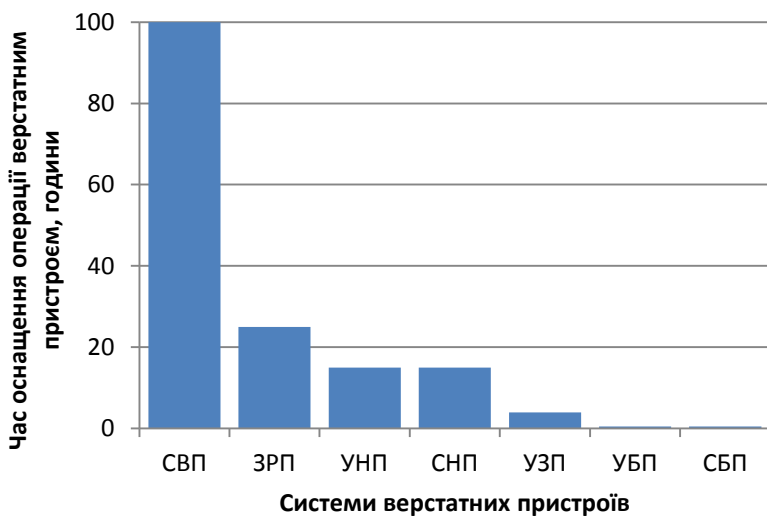
заготовки різної форми і габаритних розмірів у межах технічної характеристики ВП, а за наявності поворотного столу можлива обробка декількох поверхонь заготовки за один установ.

На рис. 6.5 показані діаграми порівняння систем ВП за точністю обробки поверхонь деталей та часом оснащення операції ВП [39]. Під часом оснащення операції для СВП розуміємо витрати часу на проектування пристрою, виготовлення установлювальних і затискних елементів, складання і впровадження ВП. Для системи ЗРП – витрати часу на проектування компонування, виготовлення спеціальних деталей, складання компонування, доопрацювання базових поверхонь і впровадження. Конструкціям УНП і СНП відповідають етапи проектування змінних наладок, їх виготовлення і встановлення на базовому агрегаті. Цикл оснащення технологічної операції УЗП передбачає складання компонування і її впровадження. Для оснащення операції пристроями систем УБП і СБП необхідно виконати тільки регулювання установлювально-затискних елементів.

Аналіз безналагоджуваних ВП (УБП і СБП) показав, що вони потребують найменших витрат часу на переналагодження при зміні об'єкта обробки порівняно з іншими системами. Налагоджувані ВП (УНП і СНП) забезпечують можливість установлення лише групи однотипних деталей при групових та типових технологічних процесах обробки. Ці пристрої переналагоджуються безпосередньо на верстаті, що обумовлює їх простоту через неможливість швидкої заміни змінної наладки. У більшості базових агрегатів налагоджуваних ВП відсутні механізовані приводи для закріплення оброблюваних заготовок. Система АПП дозволяє швидко автоматизоване переналагодження установлювальних і затискних елементів ВП, однак вони призначені тільки для заготовок з однаковою схемою базування, що значно зменшує технологічні можливості цих пристроїв і знижує ефективність їх застосування.



а)



б)

Рис. 6.5. Діаграми порівняння систем ВП за точністю обробки поверхонь деталей (а) та часом оснащення операції ВП (б)

## 6.2. Математична модель вибору оптимальних компонентів верстатних пристроїв

Вибір найвигіднішого варіанта компоновання ВП є багатокритеріальною задачею, тобто здійснюється з використанням кількох цільових функцій [7, 8, 48]. У багатокритеріальній оптимізації неможливо одночасно забезпечити оптимум за всіма критеріями, тому доцільно використовувати метод послідовних поступок [35]. При розгляді дискретних систем, які складаються з окремих об'єктів, що характеризуються сукупністю критеріальних оцінок, можна досить обґрунтовано призначити поступки при відомих характеристиках компоновань ВП. Застосування методу послідовних поступок для вибору компоновань ВП не призводить до суб'єктивного призначення поступок, оскільки крок призначення поступок буде різним і відповідатиме конкретному компонованню ВП.

Для застосування методу послідовних поступок для вибору компоновань ВП спочатку визначаються критерії оптимальності, потім виконуються їх аналіз та ранжування за ступенем важливості. Перший критерій – найважливіший, далі – за зменшенням важливості характеристик.

За критерії оптимальності прийнято похибку установлення заготовки ( $\varepsilon_y \rightarrow \min$ ), ступінь гнучкості ( $G_{ВП} \rightarrow \max$ ), вартість ( $C_{ВП} \rightarrow \min$ ), металомісткість ( $M_{ВП} \rightarrow \min$ ).

Похибка установлення заготовки у ВП, на наш погляд, є найважливішим критерієм оптимальності, тому що вона впливає на точність обробки деталей у ВП. Від неї залежить точність базування та закріплення заготовок у ВП, а отже, отримання розмірів із заданою конструктором точністю.

Величина похибки установлення заготовки визначає відхилення фактично досягнутого положення заготовки від необхідного і залежить від похибки базування  $\varepsilon_\delta$ , похибки закріплення  $\varepsilon_\sigma$ , і похибки  $\varepsilon_{np}$ , яка викликана неточністю ВП:



$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{np}^2}.$$

Похибкою базування  $\varepsilon_{\delta}$  називають відхилення фактично досягнутого положення заготовки від необхідного, що визначається як різниця між граничними положеннями проекцій вимірювальної бази на напрямок виконуваного розміру. Для найбільш поширених схем базування заготовок у ВП їх похибку можна знайти за даними у [49, 50].

Похибка закріплення заготовки  $\varepsilon_3$  становить різницю проекцій найбільшого та найменшого зміщення вимірювальної бази на напрямок виконуваного розміру при прикладанні до заготовки сили закріплення. Найбільший вплив на похибку  $\varepsilon_3$  чинять такі фактори: нестабільність сили закріплення заготовок у партії, неоднорідність шорсткості й хвилястість базових поверхонь, знос установлювальних елементів. Числові значення  $\varepsilon_3$  визначають за формулами, наведеними у [49–51].

Похибка  $\varepsilon_{np}$  складається з похибки виготовлення  $\varepsilon_{виг}$ , похибки установлення ВП на верстаті  $\varepsilon_{yc}$  і похибки зносу установочних елементів  $\varepsilon_{зн}$ .

Похибка  $\varepsilon_{виг}$  залежить від точності виготовлення деталей пристрою, їх складання та регулювання і її величина не перевищує 5–10 мкм [51]. Похибка  $\varepsilon_{yc}$  виникає у результаті зміщень і перекосу корпуса ВП на столі верстата. На її величину впливають знос і пошкодження поверхонь при регулярній зміні ВП. За дотримання раціональних умов використання ВП похибка  $\varepsilon_{yc}$  дорівнює 10–20 мкм [51]. Величина похибки  $\varepsilon_{зн}$  характеризує зміну положення базових поверхонь установлювальних елементів у результаті їх зносу в процесі експлуатації ВП. Вона залежить від програми випуску виробів, їх конструкції та розмірів, матеріалу і маси заготовки, стану її базової поверхні, а також умов установлення заготовки у ВП і зняття її. Величину похибки  $\varepsilon_{зн}$  установлювальних елементів

можна визначити за залежностями і графіками, наведеними у [49–51].

Таким чином, цільова функція для визначення похибки установавання заготовки у ВП, як сумарне поле розсіювання випадкових величин, має вигляд

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{виг}}^2 + \varepsilon_{\text{yc}}^2 + \varepsilon_{\text{зн}}^2},$$

де  $\varepsilon_{\delta}$  – похибка базування заготовки;

$\varepsilon_3$  – похибка закріплення заготовки;

$\varepsilon_{\text{виг}}$  – похибка виготовлення деталей ВП;

$\varepsilon_{\text{yc}}$  – похибка установавання ВП на верстаті;

$\varepsilon_{\text{зн}}$  – похибка зносу установавальних елементів ВП.

Гнучкість – це здатність ВП до переналагодження (шляхом заміни або регулювання) його елементів у межах заданих технічних характеристик для обробки потрібної номенклатури оброблюваних деталей. В умовах багатноменклатурного виробництва гнучкість – один із найважливіших показників, що характеризує ефективність використання ВП для обробки широкої номенклатури деталей. Цільова функція для визначення гнучкості ВП має вигляд

$$G_{\text{ВП}} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{пер}_i}}{\sum_{i=1}^n t_i \cdot N_i}},$$

де  $n$  – кількість типорозмірів деталей, що обробляються у ВП;

$t_{\text{пер}_i}$  – час переналагодження ВП для обробки деталі  $i$ -го типорозміру;

$t_i$  – час обробки деталі  $i$ -го типорозміру;

$N_i$  – величина партії запуску деталей  $i$ -го типорозміру.

Кожне компонування ВП складається з певної кількості деталей та складальних одиниць. Вартість компонування ВП визначається витратами: на проектування та виготовлення всіх

елементів ВП; на закуплені деталі та складальні одиниці; на складання компонування ВП; інші накладні витрати на забезпечення виробничого процесу (на утримання виробничих площин, енергоносії, допоміжні матеріали та вимірювальний інструмент, на утримання обслуговуючого персоналу тощо):

$$C_{ВП} = C_{пр} + C_{виг} + C_{закуп} + C_{скл} + C_{ін},$$

де  $C_{пр}$  – витрати на проектування елементів ВП;

$C_{виг}$  – витрати на виготовлення елементів ВП;

$C_{закуп}$  – витрати на закуплені деталі та складальні одиниці;

$C_{ін}$  – інші накладні витрати.

Витрати на проектування ВП визначаються за допомогою відомостей, що містяться у довідниках-класифікаторах робіт із проектування засобів ТО, використовуючи залежність

$$C_{пр} = \sum_{a=1}^b C_{конст_a}^z \cdot t_{пр_a},$$

де  $C_{конст_a}^z$  – годинна тарифна ставка конструктора під час проектування деталі  $a$ -го найменування;

$t_{пр_a}$  – витрати часу на проектування деталі  $a$ -го найменування;

$b$  – кількість найменувань деталей компонування ВП.

Витрати на виготовлення елементів компонувань ВП визначаються за укрупненими нормативами, використовуючи залежність

$$C_{виг} = \sum_{q=1}^r k_q \cdot \left( C_{mq} + \sum_{j=1}^m C_{jq} \cdot t_{jq} \right),$$

де  $k_q$  – кількість деталей  $q$ -го найменування, що виготовляють під час виробництва ВП;

$C_{mq}$  – вартість матеріалу для виготовлення однієї деталі  $q$ -го найменування;

$r$  – кількість найменувань деталей, що виготовляються;

$m$  – кількість операцій обробки деталі  $q$ -го найменування;  
 $C_j$  – витрати на виконання робіт  $j$ -ї технологічної операції за одиницю часу;  
 $t_j$  – час виконання  $j$ -ї технологічної операції.

Витрати на закуплені деталі визначаються за даними машинобудівних підприємств, що спеціалізуються на виготовленні елементів ТО:

$$C_{\text{закуп}} = \sum_{e=1}^d C_e \cdot f_e,$$

де  $C_e$  – вартість закупленої деталі  $e$ -го найменування;  
 $f_e$  – кількість закуплених деталей  $e$ -го найменування;  
 $d$  – кількість найменувань закуплених деталей.

Витрати на складання компонування ВП визначаються за формулою

$$C_{\text{скл}} = C_{\text{скл}}^2 \cdot t_{\text{скл}},$$

де  $C_{\text{скл}}^2$  – годинна тарифна ставка слюсаря-складальника;  
 $t_{\text{скл}}$  – витрати часу на складання компонування ВП.

Годинні тарифні ставки призначаються відповідно до тарифно-кваліфікаційного довідника, а норми витрат часу на виконання складальних операцій, використовуючи загальномашинобудівні нормативи часу на складальні роботи зі складання машин.

Отже, цільова функція для визначення вартості ВП має вигляд

$$C_{\text{ВП}} = \sum_{a=1}^b C_{\text{конст}_a}^2 \cdot t_{\text{np}_a} + \sum_{q=1}^r k_q \cdot \left( C_{\text{mq}} + \sum_{j=1}^m C_{\text{jq}} \cdot t_{\text{jq}} \right) + \\ + \sum_{e=1}^d C_e \cdot f_e + C_{\text{скл}}^2 \cdot t_{\text{скл}} + C_{\text{in}}.$$

Четвертим критерієм оптимальності є металомісткість. Металомісткість – це маса ВП, яка визначається як сума мас  $p$

елементів, що складають компонування ВП, а також найбільша маса заготовки  $m_{заг}$ , яка може бути установлена у ВП:

$$M_{ВП} = \sum_{k=1}^p m_k + m_{заг},$$

де  $m_k$  – маса  $k$ -ї деталі, що входить до компонування ВП.

Технічні обмеження на вибір компонування ВП у процесі оптимізації такі: похибка установлення заготовки не повинна перевищувати допустиму величину  $\varepsilon_y \leq [\varepsilon_y]$ , ступінь гнучкості ВП повинен бути більшим або дорівнювати необхідному за умовами виробництва  $G_{ВП} \geq [G_{ВП}]$ , а металомісткість ВП повинна бути меншою, ніж вантажопідйомність стола верстата  $M_{ВП} < B_{верст}$  [52].

Таким чином, запропонована математична модель синтезу структури компонування ВП має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{виз}^2 + \varepsilon_{yc}^2 + \varepsilon_{зн}^2} \rightarrow \min, \\ G_{ВП} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n t_{неп_i} / \sum_{i=1}^n t_i \cdot N_i} \rightarrow \max, \\ C_{ВП} = \sum_{a=1}^b C_{конст_a}^z \cdot t_{нап_a} + \sum_{q=1}^r k_q \cdot \left( C_{mq} + \sum_{j=1}^m C_{jq} \cdot t_{jq} \right) + \sum_{e=1}^d C_e \cdot f_e + C_{скл}^z \cdot t_{скл} + C_{ин} \rightarrow \min, \\ M_{ВП} = \sum_{k=1}^p m_k + m_{заг} \rightarrow \min. \end{array} \right.$$

$$\varepsilon_y \leq [\varepsilon_y],$$

$$G_{ВП} \geq [G_{ВП}],$$

$$M_{ВП} < B_{верст}.$$

Багатокритеріальну оптимізацію методом послідовних поступок виконують таким чином. Спочатку визначають оптимум за першим критерієм, потім призначають величину поступки за першим критерієм і знаходять максимальне

значення другого критерію і т.д. Система оптимізаційних задач при цьому має такий вигляд:

$$K_1 = \inf \varepsilon_y(u),$$

$$K_2 = \sup G_{ВП}(u), \text{ при } \varepsilon_y(u) \leq K_1 + \Delta\varepsilon_y,$$

$$K_3 = \inf C_{ВП}(u), \text{ при } G_{ВП}(u) \geq K_2 - \Delta G_{ВП},$$

$$K_4 = \inf M_{ВП}(u), \text{ при } C_{ВП}(u) \leq K_3 + \Delta C_{ВП},$$

де  $u$  – конкретний варіант компоновання ВП із множини  $U$ ;  $\Delta\varepsilon_y$ ;  $\Delta G_{ВП}$ ;  $\Delta C_{ВП}$  – поступки за критеріями, величина яких визначається при порівнянні критеріїв попарно та послідовно.

Отримане в результаті оптимізації рішення багатокритеріальної задачі, не забезпечуючи оптимумів локальних критеріїв, буде найкращим за сукупністю характеристик.

### 6.3. Синтез компоновань верстатних пристроїв

Конструкція ВП має ієрархічну структуру, що складається із чотирьох рівнів, які відрізняються між собою кількістю компонентів і ступенем узагальнення (рис. 6.6). Між складовими кожного рівня існують певні співвідношення, які обумовлюють об'єднання структурних одиниць нижчих рівнів у структурні одиниці вищих рівнів. Кожний конструктивний елемент характеризується заданою конструктором геометричною формою, розмірами і призначенням. Деталь формується сукупністю конструктивних елементів, які згруповано з метою виконання визначеної функції.

Деталі, які входять до складальних одиниць, можуть бути виготовлені із різних матеріалів, мати різноманітну форму і габаритні розміри, але всі вони призначені для виконання конкретної задачі, визначеної конструктором під час проектування.

Функціональний модуль – це самостійна частина ВП, яка складається з деталей і складальних одиниць, об'єднаних єдиним функціональним призначенням. Наприклад, базуючий

модуль для установалення ступінчастого вала при обробці на фрезерних і свердлильних верстатах складається зі змінних наладок, які забезпечують базування заготовки по зовнішніх циліндричних поверхнях, і упора, який базує вал по торцю і реалізує опорну базу. Таким чином, усі складові частини базуючого модуля у сукупності мають одне функціональне призначення – базування оброблюваної заготовки у ВП. Аналогічно затискний модуль забезпечує незмінне положення заготовки у ВП у процесі механічної обробки і т.д.

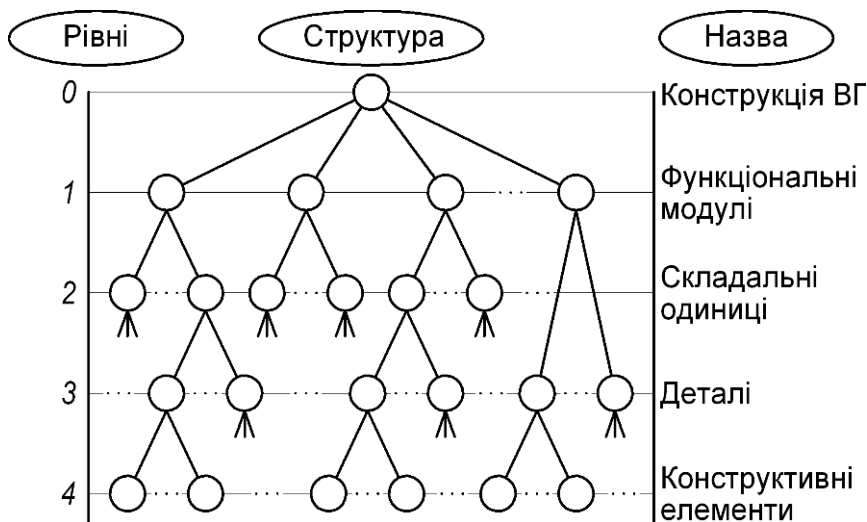


Рис. 6.6. Ієрархічна структура верстатного пристрою

Модель синтезу компонувань ВП може бути зображена у вигляді графа (рис. 6.7), на якому показана ієрархія елементів  $E$  у ВП і показано у загальному випадку механізм синтезу конструкцій ВП на основі бази даних за окремими рівнями ієрархічної структури. Як бачимо, на рис. 6.7 дугами показано шляхи накопичення інформації у компонуванні ВП з бази даних за відповідними функціональними рівнями. Множина вершин  $E$  відповідає множині компонентів бази даних і для кожного рівня структури має свою кількість, яка залежить від складності конструкції ВП. Так, у компонуванні ВП може бути  $i$

функціональних модулів,  $j$  складальних одиниць,  $k$  деталей та  $n$  конструктивних елементів.

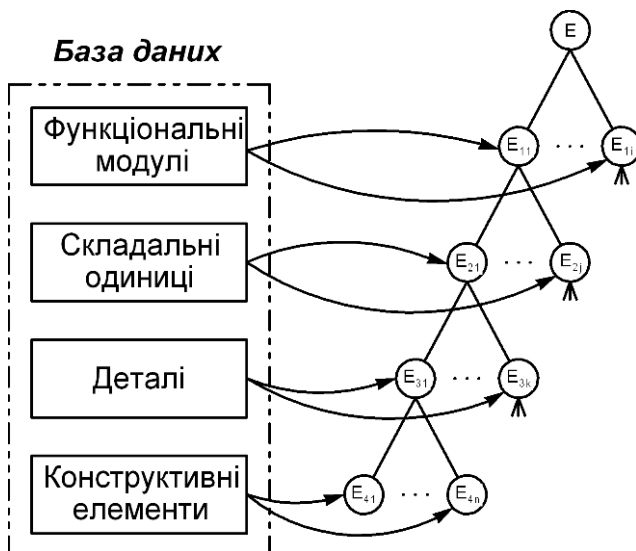


Рис. 6.7. Граф синтезу структури верстатного пристрою

Вибір найвигіднішого компонування ВП здійснюється на основі багатокритеріальної оптимізації, яка передбачає формування конкуруючих варіантів компонувань ВП. Модель формування конкуруючих варіантів компонувань ВП можна продемонструвати схемою, наведеною на рис. 6.8.

На основі вихідних даних, які отримуємо з робочого креслення та операційного ескізу деталі, що підлягає обробці на даній операції, технологічної документації та завдання на проектування ВП, а також умов виробництва можна визначити функціональні елементи, які необхідні для реалізації теоретичної схеми установалення заготовки. Можливі конструкції елементів ВП містяться у бібліотеці функціональних елементів, структуру якої наведено на рис. 6.9.



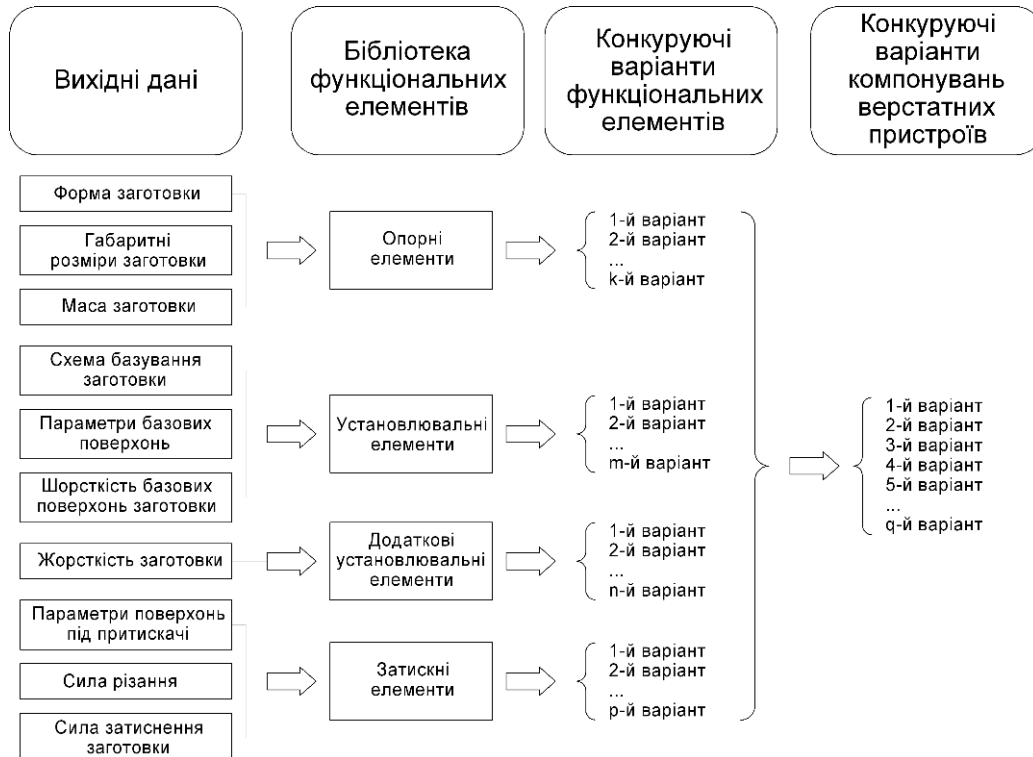


Рис. 6.8. Схема формування конкуруючих варіантів компоновки верстатних пристроїв

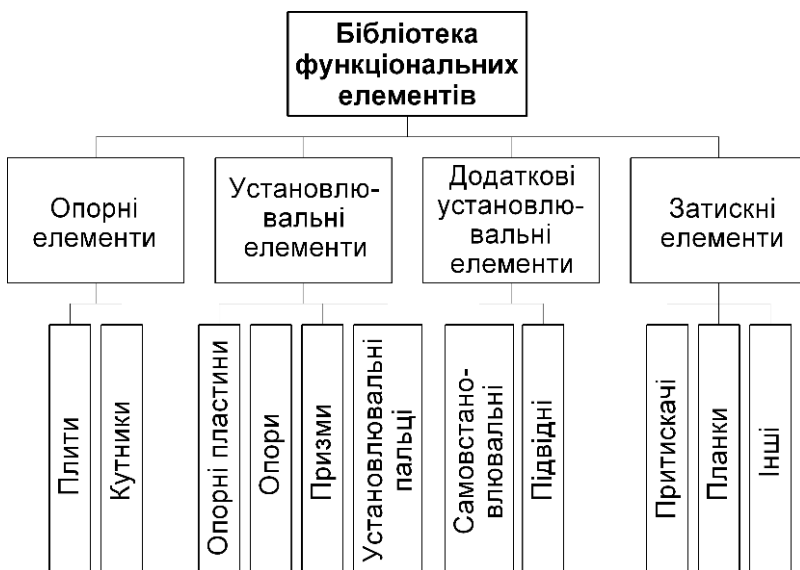


Рис. 6.9. Структура бібліотеки функціональних елементів

Бібліотеку сформовано із груп елементів, які виконують однакові функції у конструкції ВП, наприклад, до групи опорних елементів належать плити та кутники; до установлювальних елементів – опорні пластини, опори, призми, установлювальні пальці; до допоміжних установлювальних елементів – самовстановлювальні та підвідні опори; до затискних елементів – різні конструкції притискачів, планок, важелів тощо.

Вирішення проектно-конструкторських робіт пов'язане з вибором типових рішень, які визначаються значеннями деякої множини параметрів або умов. Як правило, такі задачі мають складні логічні взаємозв'язки між умовами і рішеннями, які вони визначають. Для наочного і компактного подання даних успішно застосовуються табличні методи рішення [8], які дозволяють скоротити час при постановці задачі, програмуванні, а також при виявленні можливих помилок і некоректностей. Для розв'язання задач найбільш поширеними табличними методами є таблиці рішень, характеристичні таблиці та таблиці застосовності [8].

Таблиці рішень мають ряд важливих переваг перед іншими табличними методами, зокрема при автоматизованому проектуванні. Таблиці рішень достатньо просто складаються, легко перевіряються на повноту, суперечливість і надмірність інформації. При цьому усуваються джерела можливих похибок і встановлюється мова, зручна для людини й одночасно близька до мови сучасних ЕОМ. Таблиці рішень дозволяють легко змінювати значення параметрів, доповнювати додаткові параметри та рішення і мають структуру, яка у загальному вигляді показана у табл. 6.2 [8].

Таблиця 6.2

Загальний вигляд структури таблиць рішень

Критерії (ознаки) вибору рішення	Можливі варіанти рішення				
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	...	$Y_n$
$T_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	...	$X_{1n}$
$T_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	...	$X_{2n}$
...	...	...	...	...	...
$T_m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	$X_{m3}$	...	$X_{mn}$

Як бачимо з табл. 6.2, критерії  $T_1, T_2, \dots, T_m$  відображають перелік ознак, що характеризують об'єкти, а можливі варіанти рішення позначені  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ .

Бібліотека функціональних елементів (дод. А) сформована на основі таблиць рішень для кожної групи функціональних елементів: опорних, установлювальних, допоміжних установлювальних та затискних.

Деякі параметри елементів мають кодове позначення, розшифрування яких наведене у табл. 6.3–6.8. Конструкції опор відрізняються за функціональними поверхнями, якістю базових поверхонь заготовки, видом головки опори, величиною максимального навантаження на опору, величиною регулювання за висотою, довжиною і кутом нахилу, а також ступенем автоматизації переналадження (табл. А4–А8).

Таблиця 6.3

Класифікація функціональних поверхонь оброблюваної заготовки

Найменування функціональної поверхні	Функція поверхні	Код
Опорна база	Позбавляє заготовку одного ступеня вільності (переміщення вздовж однієї осі або обертання навколо однієї осі)	1
Напрямна база	Позбавляє заготовку двох ступенів вільності (переміщення вздовж однієї осі та обертання навколо іншої)	2
Подвійна опорна база	Позбавляє заготовку двох ступенів вільності (переміщення вздовж двох осей)	3
Встановлювальна база	Позбавляє заготовку трьох ступенів вільності (переміщення вздовж однієї осі та обертання навколо двох інших)	4
Подвійна напрямна база	Позбавляє заготовку чотирьох ступенів вільності (переміщення вздовж двох осей та обертання навколо їх)	5
Поверхня під затискні елементи	Сприймає затискні зусилля	6

Таблиця 6.4

Класифікація установлювальних елементів за станом якості базової поверхні заготовки

Стан базової поверхні	Стан обробки поверхонь	Код
Необроблена	Не виконано жодної механічної операції на даній поверхні	0
Оброблена	Виконано одну чи кілька механічних операцій на даній поверхні	1

Таблиця 6.5

## Класифікація опор за видом головки

Вид головки опори	Код
Плоска	1
Сферична	2
Рифлена	3
Призматична	4

Таблиця 6.6

## Класифікація установлювальних елементів за ступенем автоматизації переналагодження

Ступінь автоматизації переналагодження	Код
Вручну	0
Механізовано	1
Автоматизовано	2

Таблиця 6.7

## Класифікація опорних пластин за відношенням довжини до ширини

Відношення L/B	Код
$L/B=1$	1
$L/B>1$	2

Таблиця 6.8

## Класифікація установлювальних елементів за способом переналагодження

Спосіб переналагодження	Код $\sigma$
Заміна	1
Регулювання	2

Вибір призм і установлювальних пальців здійснюється відповідно до стану базової поверхні заготовки, діаметрів

базових поверхонь, способом та ступенем автоматизації переналагодження (табл. А.9–А.10).

Затискні елементи обирають відповідно до таких параметрів: ступінь механізації процесу переналагодження, діапазон регулювання, мінімальна і максимальна висота заготовки, яку здатний закріпити затискний елемент, величина максимальної сили закріплення, а також вага (табл. А.11–А.13).

Таким чином, кожна група функціональних елементів містить конструкції єдиного функціонального призначення, які відрізняються між собою за технічними показниками, а отже, мають певну сферу застосування. Для ідентифікації елементів у бібліотеці кожний елемент має код.

Ураховуючи вихідні дані та технічні характеристики елементів для кожної з функціональних груп, можна сформувати певну кількість конкуруючих варіантів, причому їх число для різних груп буде різним. Так, у загальному випадку з групи опорних елементів можна вибрати від одного до  $k$  варіантів опорних елементів,  $m$  варіантів установлювальних елементів,  $n$  варіантів допоміжних установлювальних елементів та  $p$  варіантів затискних елементів.

На основі вибраних окремих елементів можна створити множину конкуруючих варіантів компонувань ВП, загальна кількість  $q$  яких дорівнює добутку варіантів для кожної групи:

$$q = k \cdot m \cdot n \cdot p .$$

Будь-яке компонування ВП може бути записана у вигляді структурної формули, що становить буквено-числовий код, який складається з чотирьох груп, відокремлених одна від одної знаком тире (рис. 6.10).

Перша група визначає тип пристрою і відповідає виду робіт, які виконуються у даному ВП, наприклад, С – свердлильний, Ф – фрезерний, СФ – свердлильно-фрезерний ВП. У другій групі наводиться код опорного елемента з бібліотеки функціональних елементів.

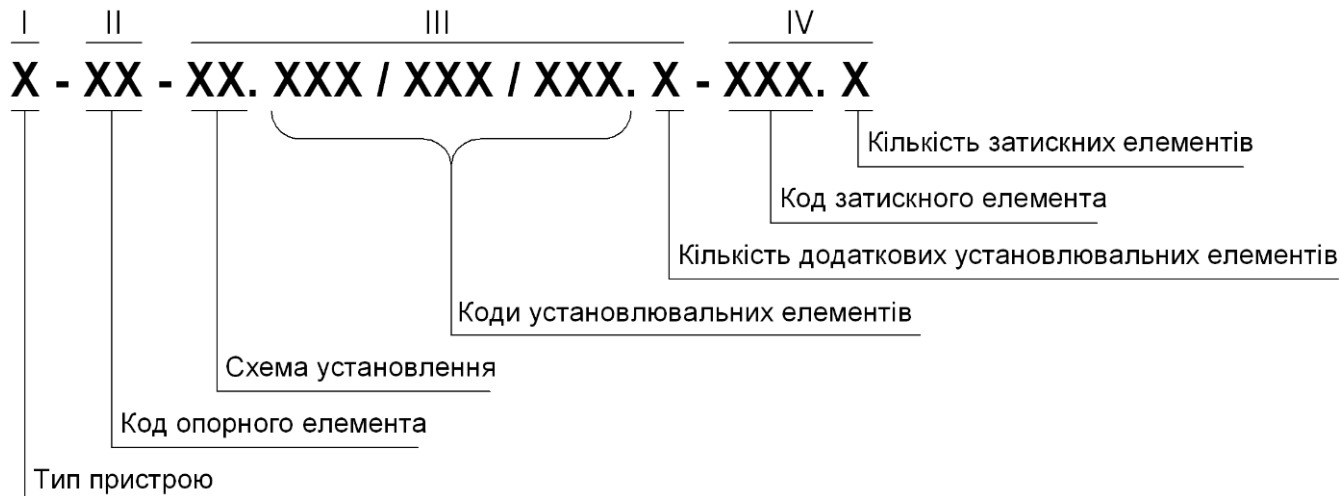


Рис. 6.10. Структурна формула компонування верстатного пристрою

Третя група характеризує базуючий модуль ВП, а саме містить код схеми устанавлення заготовки у ВП (табл. 6.9) і далі через знак « / » записують коди основних УЕ, які реалізують теоретичну схему базування. Залежно від схеми базування кількість видів УЕ, що використовуються при компонуванні ВП, може бути 1–3. Якщо кількість видів УЕ менше трьох, то у поля, залишені без кодів, записується нуль. Після основних УЕ вказують кількість допоміжних устанавлювальних елементів, які призначені для забезпечення жорсткості заготовки у компонуванні ВП. До четвертої групи записують інформацію щодо конструкції ЗЕ із зазначенням їх кількості у компонуванні ВП.

Приклад структурної формули для свердлильно-фрезерного ВП для устанавлення корпусної деталі (рис. 6.11) має вигляд: СФ – 31 – 11.101/108/251.0 – 233.2, а структурна формула свердлильного ВП для устанавлення фланця (рис. 6.12) – С – 11 – 22.406/0/0.0 – 233.2.

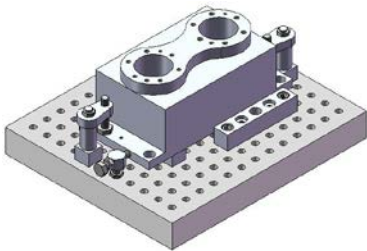


Рис. 6.11. Компонування верстатного пристрою для обробки корпусної деталі

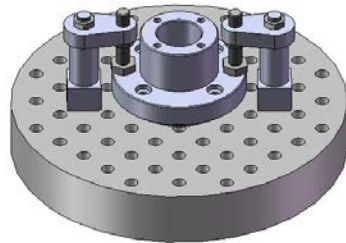


Рис. 6.12. Компонування верстатного пристрою для обробки фланця

Багатокритеріальна оптимізація передбачає розроблення системи конкуруючих варіантів, причому при ручному формуванні множини конкуруючих варіантів спостерігаються величезні витрати часу, тому найдоцільніше цей процес автоматизувати. Для цього запропоновано алгоритмічну структуру системи вибору оптимальних компонувань ВП (рис. 6.13), яка складається з бази даних та трьох модулів: вихідних даних, інформаційно-пошукового, розрахункового.



Таблиця 6.9

## Класифікація схем установлення заготовок у верстатних пристроях

Код схеми установлення заготовки при базуванні	Установлювальні елементи при установленні заготовки по функціональних поверхнях		
	1	2	3
За трьома площинами	Встановлювальна база	Напрямна база	Опорна база
11	пластини	пластина	опора
12	пластини	опори	опора
13	опори	опори	опора
14	пластина та опори	пластина	опора
15	пластина та опори	опори	опора
За двома площинами та отвором	Встановлювальна база	Подвійна опорна база	Опорна база
21	пластини	циліндричний палець	опора
22	опори	циліндричний палець	опора
23	пластини	розтискний самоцентрувальний палець	опора
24	опори	розтискний самоцентрувальний палець	опора

Продовження табл. 6.9

1	2	3	4
За площиною і двома отворами	Встановлювальна база	Подвійна опорна база	Опорна база
31	пластини	циліндричний палець	циліндричний палець
32	пластини	циліндричний палець	ромбічний (зрізаний) палець
33	пластини	конічний висувний палець	ромбічний (зрізаний) палець
34	пластини	розтискний самоцентрувальний палець	ромбічний (зрізаний) палець
За двома зовнішніми циліндричними поверхнями і площиною	Подвійна напрямна база	Опорна база	–
41	призми	бокова опора	–
42	самоцентрувальні призми	бокова опора	–
43	самоцентрувальний патрон	–	–

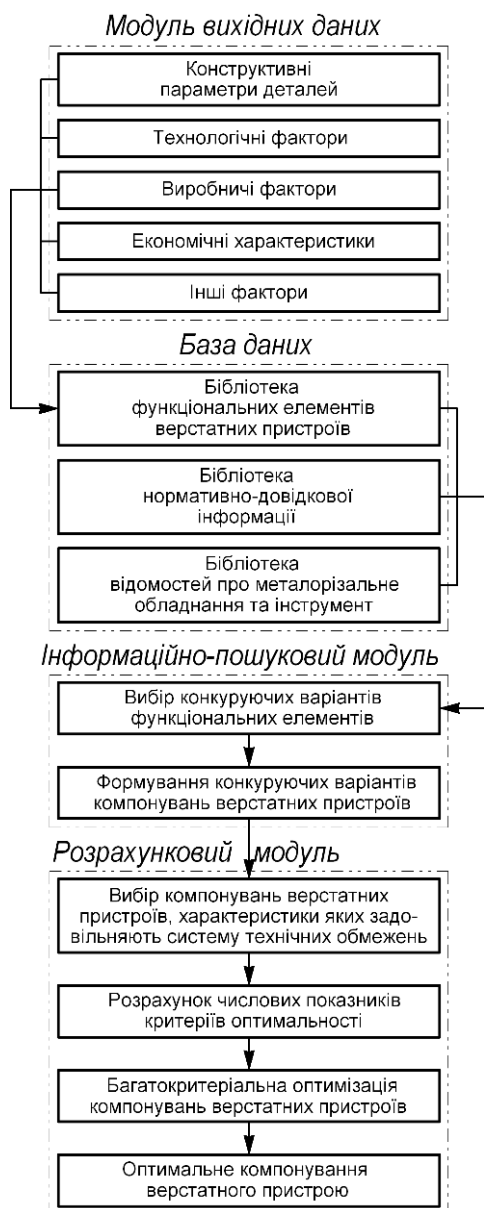


Рис. 6.13. Алгоритмічна структура системи синтезу компонувань верстатних пристроїв

На вибір ВП впливає велика кількість факторів, основними з яких є: конструктивні (геометрична форма, розміри, маса, жорсткість деталей і т.д.); технологічні (характер виконуваної операції, вид металорізального обладнання, різального інструмента, схема базування та закріплення заготовки тощо); виробничі (тип виробництва, річна програма випуску деталей, число деталей у партії і т.д.); економічні; інші (ергономічні, естетичні характеристики ВП та ін.).

Основними функціями бази даних є: накопичення, уточнення, вдосконалення, зберігання та надання інформації про існуючі розробки відповідно до потреб, що виникають при оснащенні операції. База даних системи автоматизованого синтезу компонувань ВП складається з таких бібліотек: функціональних елементів; норма-

тивно-довідкової інформації; відомостей про металорізальне обладнання та інструмент.

У бібліотеці нормативно-довідкової інформації містяться таблиці допусків та посадок, квалітети точності, дані про шорсткість поверхонь, норми часу на обробку деталей, складання компонентів ВП та переналагодження елементів, нормативи режимів різання.

Бібліотека відомостей про металорізальне обладнання та інструмент містить технічні характеристики металорізального обладнання, зокрема характеристики робочої зони та посадкових місць верстатів, на яких повинен установлюватися ВП.

Для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів, наприклад, необхідно знати такі параметри: розміри робочого стола; відстань між пазами стола; відстань від торця шпинделя до стола у крайньому верхньому положенні. Крім того, до бібліотеки занесено рекомендації щодо вибору різального інструмента залежно від умов та параметрів обробки поверхонь деталей.

## **7. Конструктивно-технологічне забезпечення системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв**

### **7.1. Призначення і структура системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв**

Сучасний стан вітчизняного машинобудування ставить високі вимоги до ВП, які використовуються на верстатах із ЧПК, основними з яких є:

- гнучкість, достатня для обробки деталей у межах технічної характеристики верстата;
- забезпечення заданої точності обробки;
- механізоване або автоматизоване переналагодження при переході до обробки деталей іншого типорозміру;
- висока жорсткість деталей та складальних одиниць ВП, здатних сприймати значні сили різання та забезпечувати максимальне використання потужності обладнання;
- інструментальна доступність для обробки максимальної кількості поверхонь заготовки за один установа;
- високий рівень уніфікації деталей і складальних одиниць, який забезпечує зниження вартості ВП;
- висока функціональна й технологічна надійність ВП та його елементів;
- економічність.

Ураховуючи наведені вимоги та виробничі умови, подальший розвиток ВП для верстатів із ЧПК пов'язаний з підвищенням ступеня гнучкості й рівня уніфікації елементів ВП, скороченням витрат часу, викликаних переналагодженням ВП при переході до обробки деталей іншого типорозміру. Це можливо за умови створення такої системи ВП, яка дозволить поєднати переваги збірних та переналагоджуваних ВП, забезпечивши підвищення ефективності застосування верстатів із ЧПК в умовах багатонаменклатурного виробництва.

У зв'язку з цим у даній роботі запропоновано нову систему ВП – універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв (УЗПП), в основу якої покладено агрегатно-

модульний принцип побудови компонувань та можливість переналагодження елементів, зокрема автоматизованого [53].

Запропонована система УЗПП призначена для базування та закріплення деталей при обробці на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК в умовах багатонаменклатурного виробництва [54]. З метою скорочення витрат часу при формуванні компонувань ВП використовуються переважно не окремі деталі, як, наприклад, у системах УЗП, УЗПМ, ЗРП, УЗПО, а функціональні модулі, до складу яких входять деталі та складальні одиниці, що мають однакове функціональне призначення. У складі кожного модуля є елементи, які переналагоджуються у межах заданих технічних характеристик за рахунок відповідних механізмів регулювання. Крім того, скорочення кількості стиків унаслідок модульної структури, у свою чергу, підвищує жорсткість компонувань ВП та точність обробки заготовок. Структуру системи УЗПП наведено на рис. 7.1 [55].

Основою системи УЗПП є базова плита, яка є аналогом гідравлічних блоків збірних ВП із вбудованими гідроциліндрами і підвідними масляними магістралями. На базовій плиті встановлюють функціональні модулі, інші деталі та складальні одиниці.

Базуючий модуль – це структурний елемент компонування ВП, до складу якого входять деталі та складальні одиниці, що у сукупності виконують спільне функціональне призначення. На базуючому модулі залежно від номенклатури оброблюваних деталей можна встановлювати різні змінні налагодження, положення яких відносно базуючого модуля змінюється за допомогою механізму регулювання положення налагодок. Наприклад, положення налагоджень за довжиною базуючого модуля можна змінювати за допомогою лінійного двигуна, який забезпечує високу надійність і точність позиціонування елементів протягом усього терміну використання ВП.

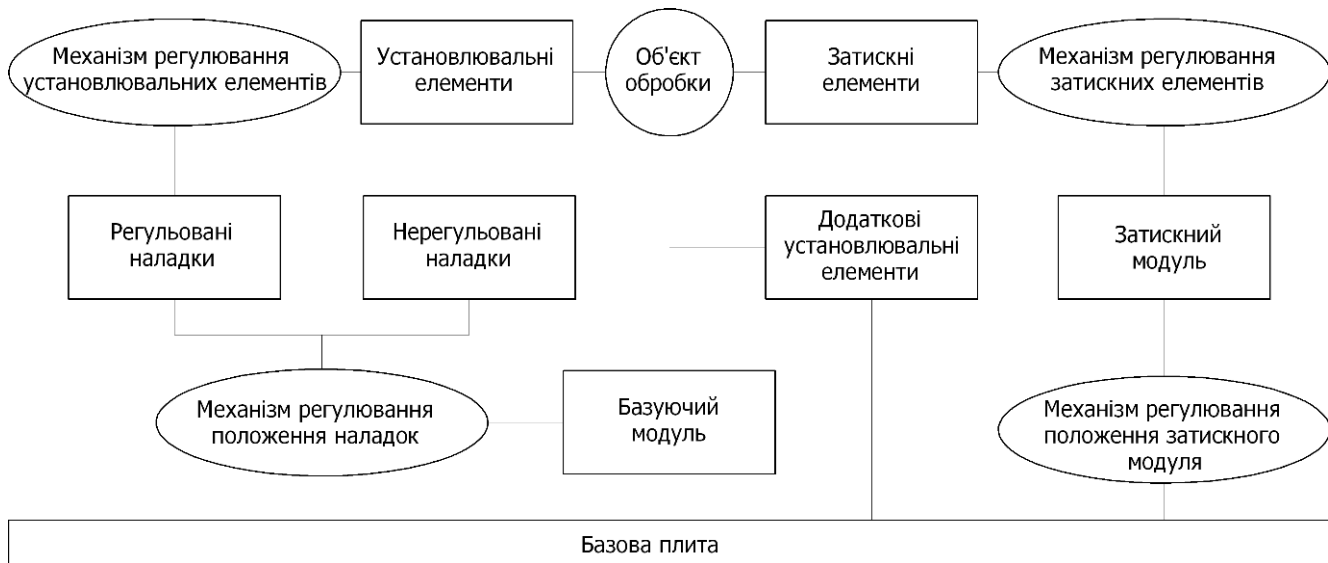


Рис. 7.1. Структура універсально-збірного переналагоджуваного пристрою

Як правило, змінні наладки, які можуть бути нерегульованими й регульованими, встановлюють на одній з поверхонь базуючого модуля. Перші призначені для установлення та закріплення близьких за конфігурацією заготовок різних габаритних розмірів із однаковою схемою базування. Наприклад, нерегульованими наладками для базування деталей типу тіл обертання, які обробляють на свердлильних і фрезерних верстатах, є уніфіковані призми, що забезпечують установлення заготовок по циліндричних поверхнях діаметрами 5–150 мм. Регульовані наладки дозволяють установлення необхідної номенклатури деталей, оскільки забезпечують можливість регулювання установлювальних елементів (УЕ) у межах заданих технічних характеристик.

Установлювальні елементи ВП забезпечують реалізацію теоретичної схеми базування заготовки, а також достатню її сталість при обробці. Необхідно відзначити, що при встановленні заготовки на необроблені поверхні доцільно застосовувати УЕ з обмеженою опорною поверхнею, а при базуванні на оброблені базові поверхні заготовки опорну поверхню УЕ збільшують.

Переналадження УЕ можна здійснювати як за допомогою елементарних механізмів регулювання (наприклад, гвинтові регульовані опори), так і з використанням зубчастих передач, рейкових, важільних, клиноплунжерних, ексцентрикових механізмів та їх комбінацій.

При установленні у ВП довгих валів, у яких оброблювані поверхні знаходяться на значній відстані одна від одної, структурою УЗПП передбачено додаткові УЕ, які забезпечують необхідну жорсткість заготовки при механічній обробці. Як додаткові УЕ використовують регульовані, самовстановлювальні та підвідні опори різних конструкцій.

Затискний елемент (ЗЕ) – деталь або група деталей ВП, які знаходяться у безпосередньому контакті з об'єктом обробки при закріпленні, притискаючи заготовку до УЕ пристрою і забезпечуючи незмінність її положення у процесі



формування. У компоновках УЗПП використовують різноманітні уніфіковані ЗЕ, які забезпечують вільне зняття деталей й установлення нової заготовки у ВП, наприклад різні конструкції планок, притискачів, важелів, кулачків тощо. Кількість ЗЕ обирають залежно від форми і габаритних розмірів оброблюваної заготовки. Для регулювання ЗЕ доцільно використовувати гвинтові, клинові, клиноплунжерні, важільні, ексцентриккові та інші механізми.

Затискний модуль – це структурний елемент, до складу якого входять деталі й складальні одиниці, що створюють силовий імпульс із метою подальшого передавання на ЗЕ. Тип приводу закріплення обирають залежно від необхідної сили закріплення, швидкодії, а також габаритних розмірів ВП. За ступенем автоматизації привід затискного модуля може бути ручним, механізованим або автоматизованим. У компоновках пристроїв системи УЗПП можуть застосовуватися гідравлічні, пневматичні, електромеханічні, електромагнітні, магнітні, вакуумні та інші приводи. Положення затискного модуля відносно базової плити можна змінювати за допомогою механізму регулювання. Наприклад, використання лінійного двигуна дозволяє змінювати місце прикладання затискного зусилля вздовж усієї довжини оброблюваної заготовки за керуючою програмою системи ЧПК верстата.

Порівняти технічні характеристики різних систем ВП можна за даними, наведеними на рис. 7.2. Запропонована система УЗПП порівнювалась із системами збірних ВП – УЗП, УЗП-ЧПК, УЗПМ, УЗПО, ЗРП і переналагоджуваних ВП – УБП, УНП, СБП, СНП, АПП [53].

Як бачимо, система УЗПП має значні потенційні функціонально-технологічні переваги перед іншими системами ВП, які повною мірою можуть бути реалізовані на сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних багатопільових верстатах із ЧПК.



Рис. 7.2. Технічні характеристики систем верстатних пристроїв

## **7.2. Вибір функціональних елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв при складанні компонувань ВП**

Складність виконання технологічних процесів у машинобудуванні обумовлює велику різноманітність компонувань ВП і високий рівень вимог, що ставляться до них.

Незважаючи на різницю за конструктивними параметрами, ВП мають однакову структуру і складаються з елементів з однаковим функціональним призначенням. Основною функцією компонувань ВП є точне базування заготовки і надійне її закріплення під час обробки. Для повного базування заготовки необхідно позбавити її усіх ступенів вільності (правило шести точок). З цією метою використовують УЕ, кількість яких повинна дорівнювати кількості ступенів вільності, яких позбавляється заготовка. Для реалізації схем базування використовуються різні УЕ.

ЗЕ забезпечують щільний контакт заготовки з УЕ ВП і запобігають зміщенню і вібраціям заготовки при різних видах обробки. Рівномірність закріплення кількох ЗЕ сприяє підвищенню точності обробки заготовок. Для зменшення похибки закріплення необхідно забезпечити стабільність затискного зусилля і зберігати його у разі аварійного вимкнення. Затискне зусилля, як правило, спрямовують у напрямку УЕ, однак величина сили закріплення не повинна бути надто великою, щоб не залишити ум'ятини на заготовці. Конструкція затискного механізму повинна бути простою, зручною в обслуговуванні та експлуатації. Переналагодження ЗЕ доцільно виконувати якнайшвидше для зменшення витрат допоміжного часу.

Компонування ВП необхідно виконувати у такій послідовності (рис. 7.3): спочатку вибирають базову плиту, основні та додаткові УЕ, потім ЗЕ. На вибір кожного елемента впливають кілька факторів. Так, для вибору базової плити необхідно мати дані про форму, габаритні розміри, вагу та матеріал заготовки, що підлягає обробці.

Для вибору УЕ вихідними даними є інформація про форму заготовки, вигляд та якість базових поверхонь. Для забезпечення необхідної жорсткості й усталеності заготовки у компонованні ВП передбачають наявність додаткових УЕ.

Для вибору ЗЕ необхідно знати характеристики оброблюваних поверхонь та поверхонь під притискачі, а також дані про силове навантаження на заготовку (сила різання, сила закріплення заготовки). Далі більш детально розглянемо всі функціональні елементи, які беруть участь у створенні компоновання.

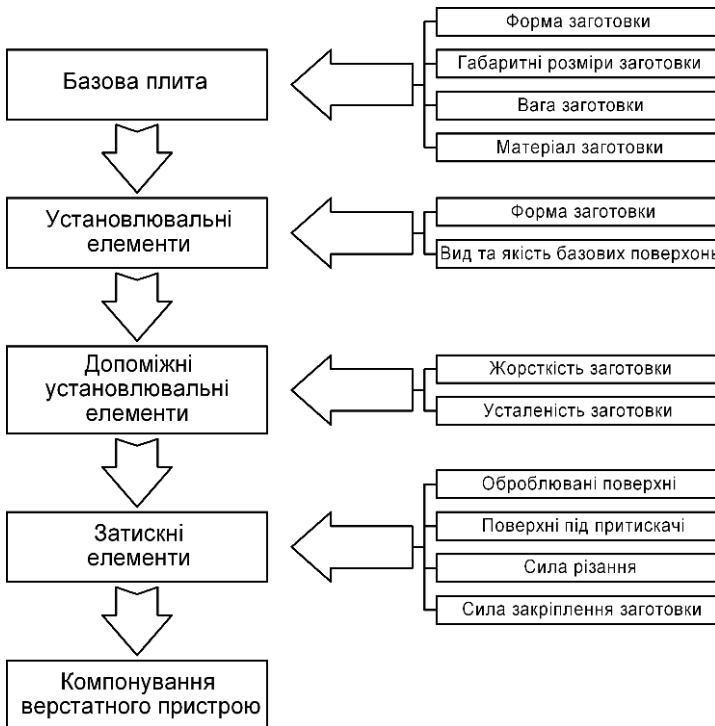


Рис. 7.3. Схема синтезу компоновання верстатного пристрою

Базові плити є основою компоновань і призначені для установлення на них інших функціональних елементів. Вони становлять механізовані складальні одиниці із вбудованими гідроциліндрами і підвідними масляними магістралями.

Вибір базової плити залежить від габаритних розмірів, форми та маси заготовки. Так, круглі плити (табл. А.1) використовують переважно для базування заготовок циліндричної форми (кришки, втулки, фланці). Квадратні та прямокутні плити застосовують для установлення корпусних деталей і деталей складної форми (важелі, кронштейни, шатуни, трійники тощо). Габаритні розміри плити визначають можливі максимальні розміри у плані заготовок, що встановлюються. Типорозмір базових плит залежить від діаметра (для круглих плит) або ширини (для квадратних та прямокутних плит). На поверхні базових плит нанесено сітку базових і різьбових отворів у шаховому порядку. Базові отвори призначені для точного установлення елементів ВП на базовій плиті, а різьбові – для їх надійного закріплення. Залежно від типорозміру плит діаметри отворів становлять 12–22 мм, а відстань між осями двох різьбових або двох базових отворів дорівнює 60–100 мм.

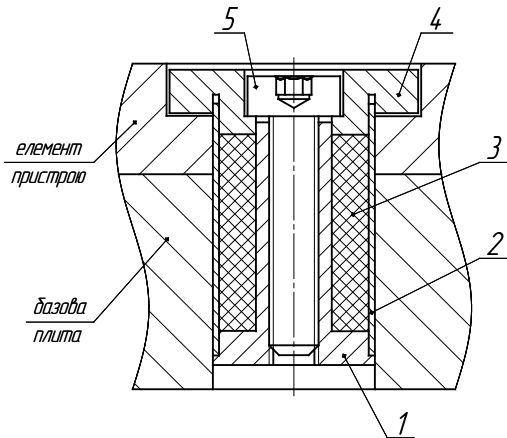


Рис. 7.4. Спосіб беззорового базування елементів верстатних пристроїв (патент України № 44718)

Беззорове з'єднання елементів ВП на базовій плиті та між собою здійснюється за допомогою самоцентрувальних збірних втулок (рис. 7.4) [56]. Базування елементів здійснюється таким чином. На базовій плиті розміщують елемент пристрою з умовою збіжності їх базових отворів, у які встановлюють самоцентрувальні збірні втулки.

Після цього гвинт 5 вгвинчують у різьбовий отвір корпуса 1, переміщуючи кришку 4, яка стискає гідропластичну масу 3. Під дією гідропластмаси, що рівномірно тисне на

внутрішню поверхню тонкостінної сталевий оболонки 2, остання деформується і центрує та закріплює елемент пристрою на базовій плиті.

Використання запропонованої самоцентрувальної збірної втулки підвищує точність базування елементів верстатних пристроїв, а отже, зменшує вплив пристрою на похибку установлення заготовки. Запропонована самоцентрувальна збірна втулка може бути використана для базування заготовок по площині і двох отворах або по площині і отвору, що забезпечує інструментальну доступність при контурній обробці, а отже підвищує ефективність свердлильних та фрезерних операцій.

УЕ ВП призначені для установлення на них заготовок базовими поверхнями. До УЕ ВП належать опорні пластини, опори, призми та установлювальні пальці.

Опорні пластини (табл. А. 4) призначені для базування заготовок по оброблених базових поверхнях. Їх використовують для реалізації опорної, прямої або встановлювальної баз. Залежно від відношення довжини  $L$  до ширини  $B$  базової поверхні пластини їх поділяють на квадратні ( $L/B=1$ ) та прямокутні ( $L/B>1$ ).

Для базування невеликих деталей або для установлення по обмеженій базовій поверхні використовується опорна пластина 101 (табл. А. 4), яка прикріплюється до базової плити гвинтом.

Опорна пластина 102 (рис. 7.5 а) має значну базову поверхню і може застосовуватися для установлення корпусних деталей з досить великою базовою поверхнею. У разі невеликих базових поверхонь базування заготовки здійснюється за допомогою однієї чи кількох опорних пластин 103.

Наявність різьбових отворів на одній (пластина 104) чи кількох (пластини 105–107) поверхнях дозволяє приєднати інші УЕ, наприклад, регульовані опори. Крім того, опорні пластини 106 та 107 (рис. 7.5 б) дозволяють базувати заготовки одразу по кількох поверхнях, реалізуючи одночасно встановлювальну і прямую бази. При базуванні корпусних

деталей установлювальною поверхнею, як правило, є плоска поверхня, якою заготовку встановлюють на три опори.



Рис. 7.5. Опорні пластини для встановлення заготовок:  
а – по одній поверхні; б – по двох поверхнях

За функціональним призначенням опори поділяють на основні й додаткові (рис. 7.6). Основні опори призначені для базування заготовок, додаткові – для підвищення усталеності заготовки і надання їй більшої жорсткості у процесі обробки. Опори можуть бути нерегульованими, регульованими, самовстановлювальними та підвідними. Як правило, опори у компонованнях ВП використовуються для реалізації опорної, напярмної або встановлювальної баз.

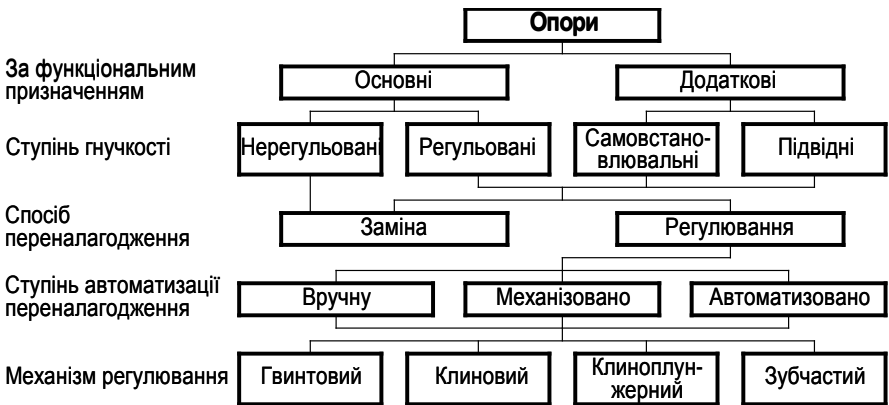


Рис. 7.6. Класифікація опор верстатних пристроїв

Так, нерегульована опора 201 (рис. 7.7 а) має плоску базову поверхню і використовується для встановлення заготовок по оброблених поверхнях. Опора 202 може мати сферичну

базову поверхню, що забезпечує високу точність установлення заготовки завдяки мінімальній площі контакту із заготовкою, або рифлену поверхню, яка використовується при установленні заготовок по чорнових базах.

Опори 203 та 204 (рис. 7.7 б) мають технічні характеристики і функціональне призначення аналогічне опорам 201 та 202 відповідно, але дозволяють виконувати регулювання по висоті на величину до 5 мм за рахунок різьбової поверхні, по якій здійснюється установлення опори у різьбові отвори плити.

Опора 205 із плоскою кільцевою базовою поверхнею призначена для установлення заготовок по оброблених поверхнях. Особливістю наведеної конструкції є наявність отвору в опорі, що забезпечує можливість обробки отворів безпосередньо над опорою. Це дозволяє забезпечити необхідну жорсткість заготовки при обробці.

Опори 206 і 207 (рис. 7.8 а) мають самовстановлювальні головки, що можуть обертатися на кут до  $15^\circ$  відносно осі опори. Ця властивість забезпечує самовстановлення головки опори під нерівності базової поверхні заготовки.

Конструкції опор 208 та 209 (рис. 7.8 б) аналогічні за функціональним призначенням опорам 206 і 207 відповідно, але додатково забезпечують регулювання опор по висоті на величину до 5 мм за рахунок різьбової установлювальної поверхні.



а)



б)

Рис. 7.7. Опори:  
а – нерегульована;  
б – регульована



а)



б)

Рис. 7.8. Опори із  
самовстановлювальними  
головками: а – нерегульована;  
б – регульована

Опора 210 – це два циліндри, один з яких має зовнішню різьбову поверхню, а інший – внутрішню. За рахунок різьбового



з'єднання здійснюється регулювання висоти опори. Наявність отвору в опорі дозволяє виконувати наскрізну обробку отворів. Закріплення опор 205 та 210 у компонованні ВП здійснюється гвинтом, а опор 206 та 207 – шпилькою.

Опора 211 має сферичну головку і призначена для встановлення легких заготовок по необроблених базових поверхнях. Різьбова поверхня дозволяє виконувати регулювання опори у широкому діапазоні – до 40 мм. Фіксація опори у необхідному положенні здійснюється стопорною гайкою з насічкою для зручності закріплення вручну.

Опора 212 призначена для встановлення середніх заготовок, а опора 213 – для важких заготовок по оброблених базових поверхнях. Регулювання опор у діапазоні до 40 мм і їх фіксація у вибраному положенні виконується стопорною гайкою, що закріплюється гайковим ключем. Опора 213 є складальною одиницею, що має корпус, регульовану опору та стопорну гайку. Опора вгвинчується у різьбовий отвір базової плити до контакту корпусу опори з поверхнею плити. Враховуючи, що діаметр корпусу більший, ніж діаметр різьбової частини, маємо значну опорну поверхню. Це дозволяє встановлювати важкі заготовки і сприймати значні сили різання.

Конструкція опори 214 дозволяє регулювання опори у широкому діапазоні (до 40 мм), а самовстановлювальна рифлена головка сприяє базуванню заготовки у необхідному положенні. Фіксація опори виконується стопорною гайкою.

Для підвищення точності базування заготовок по плоских поверхнях запропонована регульована опора [57], що відрізняється від існуючих конструкцій наявністю основної шкали, яку нанесено на вільному кінці опори 1 (рис. 7.9) і шкали ноніуса 2, яку прикріплено до корпусу 3 гвинтами 4.

Для переналадження опори стопорну гайку 5 послабляють і, обертаючи опору 1, переміщують її на необхідну величину, яка контролюється за основною шкалою на опорі 1 і шкалі ноніуса 2. Необхідне положення опори фіксується стопорною гайкою 5. Наявність змінної головки 6 дозволяє запобігти зниженню точності базування внаслідок зносу робочої

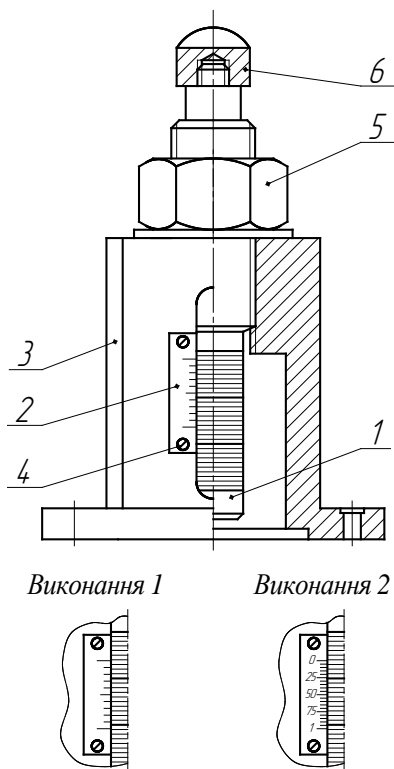


Рис. 7.9. Регульована опора (патент України № 31000)

Опори 231–234 (рис. 7.10 а) вгвинчують по зовнішній різьбовій поверхні у базову плиту або корпус ВП, опори 235 та 236 (рис. 7.10 б) виконано у корпусі, який закріплюють на базовій плиті, а опора 237 (рис. 7.10 в) має основу у вигляді фланця з отворами для прикріплення до плити. Розглянуті механізовані опори відрізняються за величиною максимального навантаження на опору. Область застосування опор 201–214 та 231–237 залежно від якості базової поверхні заготовки, величини та ступеня механізації регулювання наведено на рис. 7.11.

поверхні. Шкала ноніуса може бути у двох виконаннях – з точністю 0,1 мм (виконання 1) та 0,05 мм (виконання 2). Таким чином, наявність основної шкали та шкали ноніуса дозволяє виконати переналагодження положення опори з точністю 0,1 мм або 0,05 мм та значно зменшити витрати часу на переналагодження [58].

Механізовані опори 231–237 (табл. А.6) забезпечують високу гнучкість і продуктивність переналагодження при переході до обробки деталей іншої номенклатури. Переналагодження опор здійснюється механізовано шляхом підведення робочої рідини до відповідної порожнини гідроциліндра.

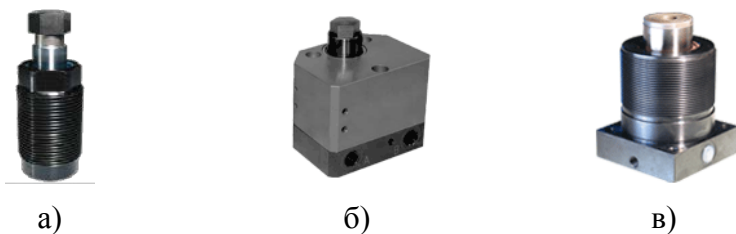
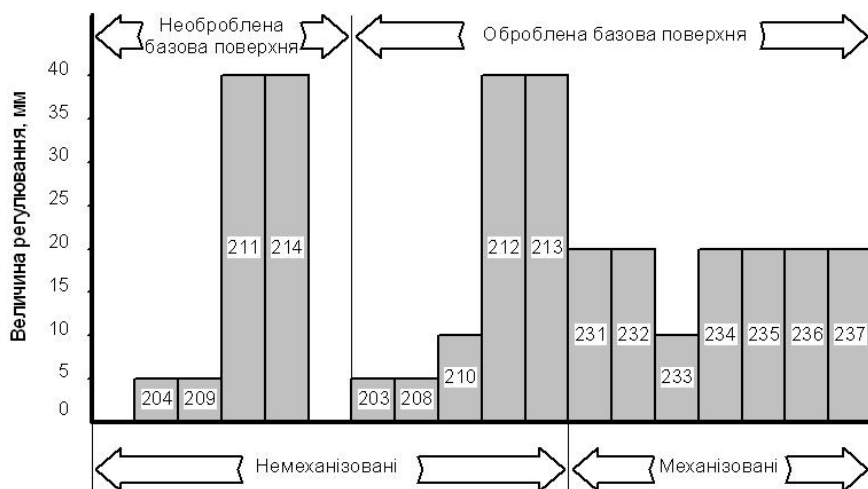


Рис. 7.10. Механізовані регульовані опори



а)



б)

Рис. 7.11. Область застосування опор залежно від якості базової поверхні заготовки, величини та ступеня механізації регулювання опор: а – регульовані опори; б – нерегульовані опори

Бокові опори 251–257 (табл. А.7), як правило, застосовують для реалізації опорної або напрямної баз при установленні по оброблених або необроблених базових поверхнях заготовок.

Бокова опора 251 вгвинчується безпосередньо у різьбовий отвір базової плити. Регулювання по довжині здійснюється шляхом регулювання опори, а фіксація виконується стопорною гайкою.

Бокова опора 252 також дозволяє регулювання по довжині опори у діапазоні до 20 мм. Відмінністю є можливість регулювання опори по висоті на величину до 20 мм завдяки наявності паза у її корпусі. Основу корпусу опори виконано у вигляді ластівчиного хвоста, яким вона встановлюється на напрямні, прикріплені до базової плити. Це дозволяє переміщувати бокові опори вздовж базової поверхні заготовки при зміні габаритних розмірів оброблюваних заготовок. Таким чином, розглянута бокова опора дозволяє виконувати регулювання у трьох напрямках.

Бокова опора 253 дозволяє виконувати регулювання по висоті та довжині, однак переналагодження даної опори здійснюється у більш широкому діапазоні (40 мм по висоті й довжині). Опора вгвинчується у різьбовий отвір плити і фіксується стопорною гайкою у необхідному положенні.

Бокова опора 254 прикріплюється гвинтами до базової плити. У планку, яка може повертатися на кут  $\pm 45^\circ$  у площині, перпендикулярній до площини базової плити, вгвинчено регульовану опору, що дозволяє переналагодження по довжині на величину до 40 мм.

Бокова опора 255 має шестигранну форму, на кожній грані якої виконано наскрізний різьбовий отвір. Різниця між осями отворів на двох суміжних гранях дорівнює 5 мм. Таким чином, регулювання опори по висоті відповідає дискретним значенням 20; 25 та 30 мм. Закріплення бокової опори на базовій плиті здійснюється гвинтом.

Бокова опора 256 – це кутник, одна сторона якого прикріплюється до базової плити гвинтами. На іншій стороні

виконано два різьбові отвори з різницею по висоті між їх осями 10 мм. Регулювання по довжині виконується на величину до 40 мм.

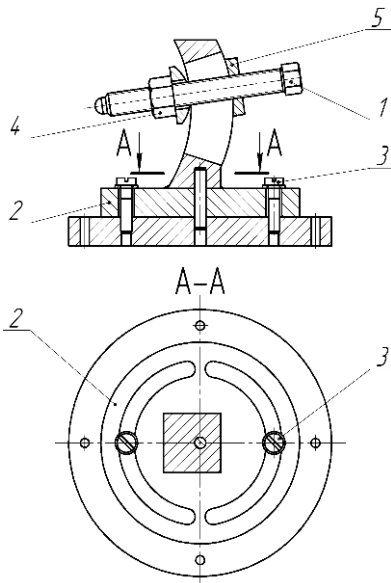


Рис. 7.12. Регульований упор (патент України № 29824)

Для орієнтації опори 1 у вертикальній площині стопорну гайку 4 послаблюють, потім, обертаючи опору 1, переміщують її до контакту з базовою поверхнею заготовки, після чого опору 1 встановлюють під необхідним кутом нахилу, фіксуючи вибране положення гайкою 5. Остаточне закріплення опори 1 здійснюється стопорною гайкою 4.

На рис. 7.13 наведено область застосування бокових опор 251–257 залежно від величин регулювання по висоті (а) і довжині (б).

Додаткові опори призначені для установаження заготовок складної конфігурації або нежорстких заготовок з метою виключення переміщень або деформацій заготовки під час обробки. Самовстановлювальні опори використовують для установаження заготовок при сумарному навантаженні (сили

Для базування заготовок по похилих торцевих поверхнях доцільно застосовувати регульований упор [59]. Новизною запропонованої конструкції є можливість встановлення опори 1 (рис. 7.12) під будь-яким кутом у вертикальній та горизонтальній площинах, що сприяє підвищенню гнучкості пристрою.

Необхідне положення опори 1 у горизонтальній площині досягається за допомогою радіальних пазів у плиті 2, після чого вона фіксується гвинтами 3.

різання та закріплення) на одну опору не більше 10 кН. При цьому опори не повинні діяти на оброблювану заготовку зі значним зусиллям, щоб не допустити відриву заготовки від основних опор. Опорна точка самовстановлювальних опор знаходиться вище, ніж основна базова площина пристрою. Під дією ваги заготовки плунжер, підтиснутий пружиною, зміщується донизу, займаючи положення основних опор ВП, і фіксується стопорним гвинтом. Сила закріплення опори стопорним гвинтом майже не передається на заготовку, оскільки кут клина приймається близьким до самогальмівного. Отже, опора діє на заготовку тільки із зусиллям пружини.

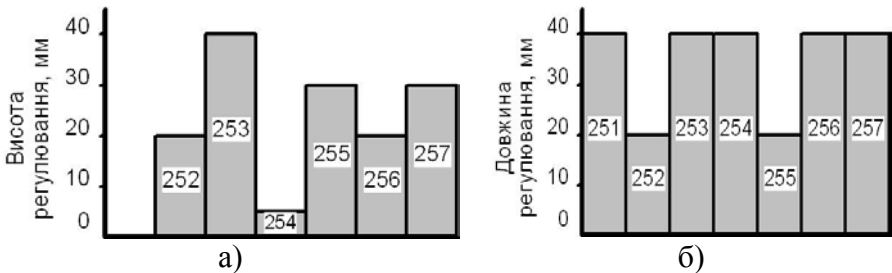


Рис. 7.13. Область застосування бокових опор залежно від величини регулювання по висоті (а) і довжині (б)

Самовстановлювальні опори 271 та 272 (табл. А. 8) встановлюються у різьбовий отвір базової плити і фіксуються стопорною гайкою. Після установлення заготовки плунжер фіксується у необхідному положенні рукояткою з насічкою або гвинтом з насічкою відповідно.

Конструкція самовстановлювальної опори 273 має аналогічне застосування, але забезпечує діапазон переміщення плунжера на величину до 10 мм. Спосіб закріплення опори одним гвинтом до базової плити дозволяє обертати опору навколо нього, збільшуючи таким чином радіус розташування самовстановлювальної опори.

Якщо на опору діє силове навантаження величиною більше 10 кН, використовуються підвідні опори, жорсткість яких значно більша, ніж жорсткість самовстановлювальних

опор. Їх особливістю є те, що опорна точка знаходиться нижче основних опор пристрою і після установалення і закріплення підводиться до заготовки і фіксується у необхідному положенні.

Прикладом підвідних опор, які переналагоджуються вручну, є конструкції 274–276, а підвідна опора 277 має механізоване регулювання.

Схема базування по зовнішніх циліндричних поверхнях є найбільш поширеною для деталей типу вала при обробці на свердлильних і фрезерних верстатах. Для її реалізації застосовуються призми різних конструкцій, класифікацію яких наведено на рис. 7.14 [60].



Рис. 7.14. Класифікація призм верстатних пристроїв

Жорстка опорна призма 301 (табл. А. 9) використовується для установалення валів з обробленими базовими поверхнями. Комплект із 10 призм дозволяє встановлення валів із базовими діаметрами 5–150 мм. Для переналагодження пристрою на деталі іншого типорозміру необхідно виконати перекомпонування вручну. Призма базується на плиті штифтами, а закріплюється гвинтами.

Жорстка опорна призма 302 має аналогічне призначення, але інше конструктивне виконання. Наявність пазів на одній з поверхонь призми дозволяє невелике переміщення по довжині, що сприяє її використанню при зміні довжини оброблюваних деталей.

Для переналагодження призми 303 на установалення деталей з іншими базовими поверхнями також необхідне ручне

перекомпонування. Переустановлення напівпризм здійснюється окремо одна від іншої відповідно до отворів біля основи. Крім того, забезпечується незалежне переустановлення змінних опор на кожній із напівпризм.

Призма 304 дозволяє безперервне регулювання опор у діапазоні діаметрів заготовок 5–80 мм. Недоліком наведеної конструкції є індивідуальне переміщення опор на задану величину, що потребує додаткових витрат часу на забезпечення симетричності опор відносно осі призми.

Нами запропоновано конструкцію регульованої призми [61], яка дозволяє підвищити точність базування циліндричних заготовок за рахунок одночасного переміщення опор за допомогою гвинтового механізму регулювання, що сприяє скороченню витрат часу на переналагодження компонування ВП.

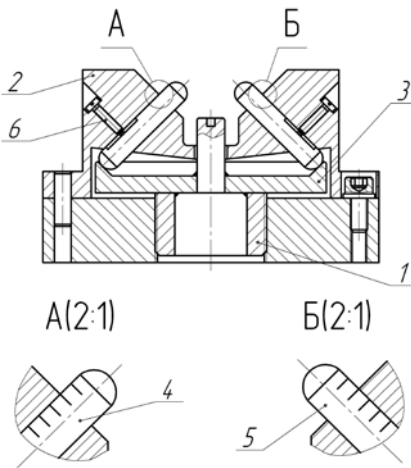


Рис. 7.15. Регульована призма (патент України № 29823)

Для встановлення заготовки гвинт 1 (рис. 7.15) вигвинчується із корпуса 2, завдяки чому опорний диск 3 піднімається і тисне на опори 4 і 5, які одночасно переміщуються догори. Необхідне положення опор для встановлення заготовки певного діаметра контролюється за допомогою поділок шкал, які нанесено на опорах 4 і 5. Фіксація опор виконується за допомогою стопних гвинтів 6.

Переналагодження призми здійснюється гвинтом 1, на якому жорстко закріплено опорний диск 3. Поділки на опорах відповідають діаметрам базових поверхонь заготовок, що обробляються під час операції.



Призма 306 призначена для установлення валів з обробленими базовими поверхнями. Вона складається з корпусу та двох напівпризм, що регулюються за допомогою гвинта з лівою та правою різьбами. Після переміщення напівпризм на задану величину вони фіксуються гвинтами у цьому положенні.

Механізоване переналагодження на інший типорозмір оброблюваних деталей дозволяють машинні спеціалізовані лещата 307 із призматичними губками. Самоцентрування губок забезпечується за рахунок зубчасто-рейкового механізму регулювання.

Призма 308 [62] дозволяє досить швидко переходити до обробки валів іншого типорозміру і забезпечує установлення заготовок з базовими діаметрами у межах 25–100 мм.

Під час реалізації схеми базування деталей за двома площинами та отвором або за площиною і двома отворами у компонованнях ВП використовують установлювальні пальці, класифікацію яких наведено на рис. 7.16.



Рис. 7.16. Класифікація установлювальних пальців верстатних пристроїв

Комплекти установлювальних пальців 401–404 (табл. А. 10) дозволяють установлення заготовок по оброблених базових поверхнях отворів. Між собою комплекти відрізняються за кількістю установлювальних пальців у комплекті, за величиною максимального діаметра та глибиною базового отвору.

Установлювальні пальці 405–407 дозволяють виконувати механізоване переналагодження елементів при зміні розміру

базових отворів оброблюваних заготовок у діапазоні 10–60 мм для пальця 405, 20–120 мм – для пальця 406 та 40–120 мм – для пальця 407.

Аналіз існуючих конструкцій ЗЕ ВП за механізмами регулювання дозволив розробити відповідну класифікацію для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів (рис. 7.17). Для регулювання ЗЕ найчастіше використовують гвинтові, клинові, клиноплунжерні, важільні, ексцентрикові та інші механізми [63].

Механізми регулювання характеризуються передаточним відношенням сил, ККД механізму (відношення сили на виході до сили без тертя), ступенем концентрації (здатність розподіляти кількість сил на вході на кількість сил на виході), швидкодією. Наприклад, швидкодія гвинтового механізму – 0,04–0,07 хв, а ексцентрикового – близько 0,04 хв. Передаточне відношення сил гвинтових механізмів 65–140, ексцентрикових – 12, клинових – 1–7, клиноплунжерних – 1–11, важільних – 1–3. Передаточне відношення сил комбінованих механізмів дорівнює добутку передаточних відношень сил усіх елементарних механізмів, що входять до його складу.

Широка різноманітність ЗЕ за конструктивними особливостями дозволяє закріплювати заготовки будь-якої форми та габаритних розмірів.

Класифікаційна ознака «Характер переміщення затискного елемента» визначає особливість процесу закріплення об'єкта обробки. Так, самоцентрувальний ЗЕ, наприклад, цангу використовують для базування заготовки відносно власної осі й подальшого одночасного її закріплення.

Обертові ЗЕ здійснюють закріплення заготовки шляхом обертання навколо власної осі (гвинти з п'ятами) або навколо іншої осі обертання (ексцентрики).

Поворотні ЗЕ (притискачі й важелі) дозволяють виконувати безперешкодне зняття деталі із ВП і встановлення нової заготовки, оскільки після розкріплення деталі ЗЕ повертається на кут 90°. Коливні ЗЕ виконують функцію, аналогічну поворотним ЗЕ, однак мають інше конструктивне

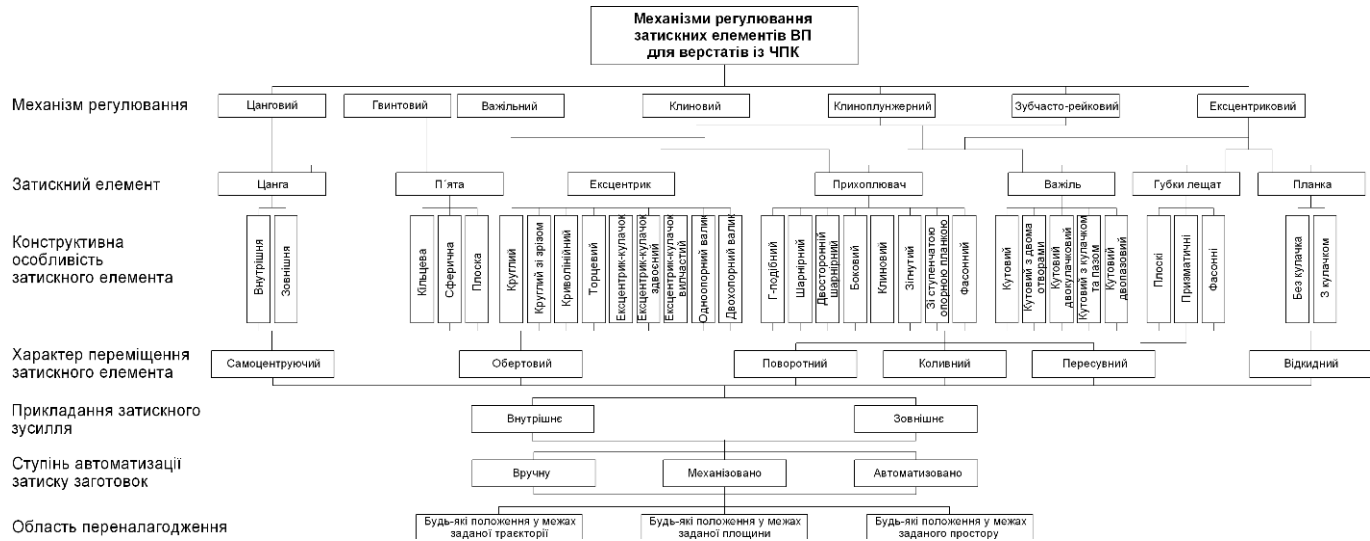


Рис. 7.17. Класифікація механізмів регулювання затискових елементів верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК

виконання. Після розкріплення заготовки коливний ЗЕ повертається у вихідне положення за допомогою пружини. Особливістю пересувних ЗЕ є можливість їх розташування на значній відстані один від одного, а отже, це дозволяє здійснювати закріплення заготовок у широкому діапазоні. Плавне підведення ЗЕ до об'єкта обробки зменшує похибки, які виникають при закріпленні заготовок у ВП. Відкидні планки застосовують переважно для закріплення валів на свердлильних і фрезерних операціях.

Перевагою ВП із гвинтовими механізмами закріплення є простота конструкції, зручність при налагодженні, можливість самогальмування, забезпечення значних зусиль закріплення заготовок при порівняно невеликому крутному моменті. Для попередження пошкодження поверхонь заготовок від дії зосереджених сил застосовують п'яти, які можуть бути кільцевими, сферичними або плоскими. Як правило, у гвинтових механізмах застосовують метричні різьби М8–М42. Необхідно зауважити, що різьба з дрібним кроком більш надійна проти самовідгвинчування, ніж різьба з великим кроком того ж діаметра. Тому різьбу з дрібним кроком потрібно використовувати у затискних механізмах, коли при обробці заготовок виникають змінні навантаження, удари та вібрації. Однак різьба з великим кроком дозволяє швидше здійснити закріплення заготовки. За даними, гвинт зі сферичним торцем діаметром 10–24 мм при вихідному зусиллі на ключі 25–130 Н дозволяє досягти силу закріплення 4,2–23 кН. При використанні п'яти при такому самому діаметрі різьби гвинта і вихідному зусиллі на ключі сила закріплення становить 3–16 кН. При закріпленні гайкою такого самого діаметра різьби і вихідному зусиллі на ключі 45–150 Н сила закріплення дорівнюватиме 4–14,6 кН.

У клинових і клиноплунжерних механізмах основним конструктивним елементом є кут скосу клина  $\alpha$ . Зі зменшенням кута  $\alpha$  збільшується виграш у силі, але одночасно збільшується програш у переміщеннях. Для забезпечення самогальмування у механізмах без роликів рекомендується застосовувати кут

$\alpha < 5^\circ 30'$ , а у механізмах без самогальмування –  $\alpha > 10^\circ$  [50]. У механізмах із роликками втрати на тертя менші, а сила закріплення більша, ніж у механізмах без роликів. Часто клинові ЗЕ застосовують як проміжну ланку в складних затискних механізмах.

Важільні затискні механізми дозволяють отримувати значні виграші у силі або у переміщенні, забезпечують закріплення заготовки у важкодоступному місці або одночасно по кількох поверхнях, мають можливість передачі сили на відстань, а також зміну дії сили на кут до  $180^\circ$ .

Цангові механізми – це розрізні пружні гільзи з кутом цанги  $\alpha = 30\text{--}40^\circ$ , який не попереджає заклинювання цанги. Кут конуса стискної втулки виготовляють менше або більше кута конуса цанги на величину  $1^\circ$ . Цангові механізми забезпечують співвісність установа заготовки  $0,02\text{--}0,05$  мм. Базові поверхні заготовок для закріплення у цангах потрібно обробляти за 6–9 квалітетом точності [49].

Перевагами ексцентрикових механізмів є простота і компактність конструкції, широке використання стандартизованих деталей, зручність при налагодженні, швидкодія. Ексцентрики дозволяють отримувати значні сили закріплення заготовок при невеликому зусиллі на приводі, мають здатність до самогальмування, що забезпечується відношенням  $D/e \geq 14$ , яке називається характеристикою ексцентрика. Сила закріплення ексцентриком у 5 разів менша, ніж гвинтом при однаковій довжині рукоятки і значенні вихідної сили. Круглі ексцентрики (циліндрична робоча поверхня, вісь якої має ексцентриситет із віссю симетрії) мають розміри  $D = 32\text{--}70$  мм і  $e = 1,7\text{--}3,5$  мм [49]. Отже, круглі ексцентрики мають невеликий лінійний хід і їх не можна використовувати для закріплення заготовок з великим допуском на розмір деталі у напрямку її закріплення. Криволінійні ексцентрики (робочі поверхні окреслені за спіраллю Архімеда) порівняно з круглими мають такі переваги: великий кут обертання ексцентрика ( $100\text{--}150^\circ$ ) і більш сталу силу закріплення оброблюваних заготовок. Профіль торцевого ексцентрика має подвійний кут

підйому –  $15^\circ$  і  $5^\circ$ , що забезпечує швидке підведення ЗЕ до деталі й надійне її закріплення.

ЗЕ повинні забезпечувати повний контакт заготовки з УЕ ВП і запобігати її зміщенню і вібраціям при різних видах обробки, здійснювати рівномірне закріплення і забезпечувати стабільність зусилля затискного механізму, підтримувати силу закріплення у разі аварійного вимкнення приводів (тиску повітря або масла, електроенергії і т.д.)

Зусилля закріплення, що створюються затискними механізмами, потрібно розраховувати за методиками, наведеними у [50]. Конструкція затискного механізму повинна бути простою, зручною в обслуговуванні й експлуатації і мати якомога більше стандартних деталей і складальних одиниць. Переналадження ЗЕ повинне бути з мінімальними витратами часу і сил, отже, час дії затискного механізму має бути мінімальним.

Детальніше зупинимося на найбільш поширених ЗЕ. Наприклад, боковий прихоплювач 101 (табл. А. 11) встановлюється на базовій плиті й забезпечує бокове закріплення заготовок висотою до 15 мм.

Закріплення заготовок боковим прихоплювачем 102 здійснюється ексцентриковою поверхнею шляхом обертання прихоплювача навколо власної осі. Ця конструкція дозволяє закріплювати заготовки висотою до 25 мм. Боковий прихоплювач 103 (рис. 7.18 а) також має ексцентриковий механізм регулювання, який забезпечує закріплення заготовки одночасно у двох напрямках – горизонтальному та вертикальному. Висота заготовки, що закріплюється повинна бути у діапазоні 15–40 мм.

Боковий прихоплювач 104 (рис. 7.18 б) дозволяє закріплювати заготовки, висота яких знаходиться у діапазоні 25–60 мм, за рахунок клинового механізму регулювання.

Кулачок бокового прихоплювача 105 (рис. 7.18 в) приводиться в дію шляхом угвинчування гвинта. Особливістю наведеної конструкції є наявність широкої затискної поверхні.



Рис. 7.18. Бокові прихоплювачі з різними механізмами регулювання: а – ексцентриковим; б – клиновим; в – гвинтовим

Скорочення витрат допоміжного часу на закріплення-розкріплення заготовок забезпечується шляхом використання механізованих бокових прихоплювачів. Так, механізовані бокові прихоплювачі 106 та 107 призначені для закріплення заготовок висотою 5–25 мм та 20–35 мм відповідно.

Область застосування бокових прихоплювачів залежно від висоти закріплюваних заготовок та ступеня механізації процесу закріплення наведено на рис. 7.19.

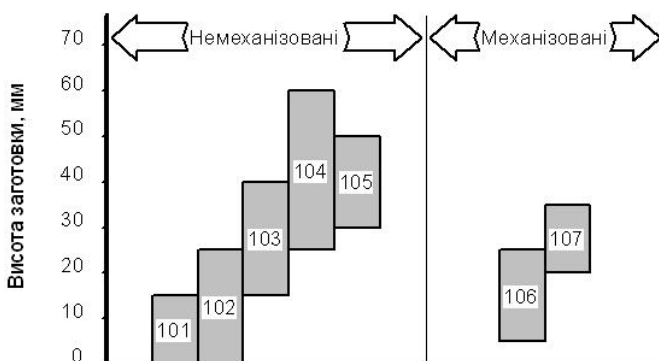


Рис. 7.19. Область застосування бокових затискних елементів залежно від висоти заготовки та ступеня механізації процесу закріплення

Прихоплювач 201 (рис. 7.20 а) встановлюється у різбовий отвір базової плити і фіксується стопорною гайкою. Після цього однією стороною прихоплювач встановлюється на

поверхню заготовки, а іншою – на опору. Закріплення здійснюється вручну гайковим ключем.

Після розкріплення пружина повертає прихоплювач у вихідне положення. Ця конструкція дозволяє установлення заготовок з висотою до 100 мм.



Рис. 7.20. Затискні елементи: а – прихоплювач;  
б – відкидна планка

Відкидну планку 202 (рис. 7.20 б) переважно виконують з кулачком, який прикріплюють посередині планки. Кулачки виконують двох видів – із плоскою та призматичною базовими поверхнями, які призначені для закріплення плоских заготовок та тіл обертання відповідно. Технічні характеристики відкидних планок дозволяють закріплювати заготовки висотою 15–110 мм.

При висоті заготовок 20–120 мм можна застосовувати прихоплювач 203. Особливістю прихоплювача є можливість його використання для одночасного закріплення двох заготовок у двомісних компонованнях ВП, а також для закріплення заготовок, які мають впадини і виступи.

Закріплення заготовок Г-подібними прихоплювачами 204–206 виконується подібно до принципу дії прихоплювачів 201 та 203. Прихоплювач 204 має найменші габаритні розміри й використовується у випадках, коли компоновання повинне бути найбільш компактним. Відмінністю прихоплювачів 205 та 206 від інших є можливість забезпечення більшої затискної сили, що пояснюється відповідною жорсткістю конструкцій.

Закріплення заготовок прихоплювачем 207 здійснюється рукояткою, яка при повороті на кут 160° забезпечує максимальне переміщення прихоплювача вниз на 15 мм. Для



закріплення заготовок у більш широкому діапазоні в отвір прихоплювача вгвинчують регульовану опору.

Область застосування ЗЕ залежно від висоти заготовки та ступеня механізації процесу закріплення наведено на рис. 7.21.

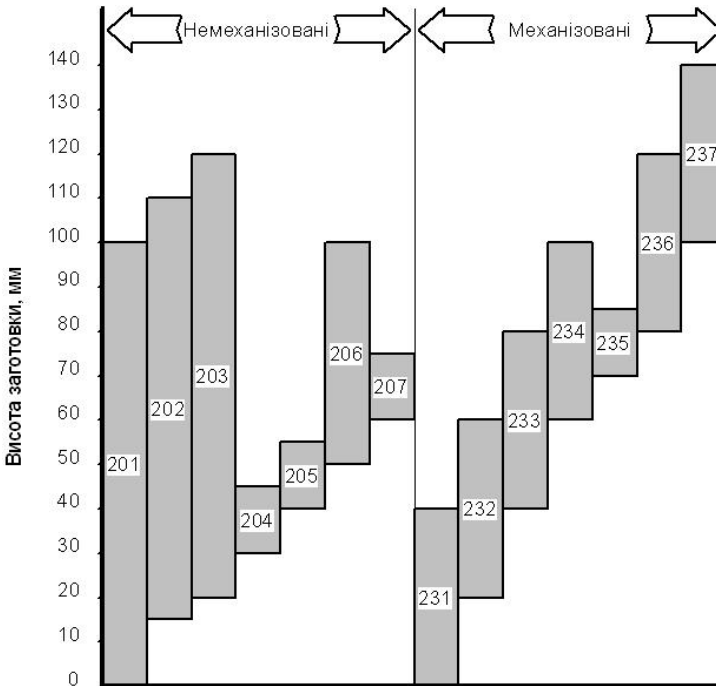


Рис. 7.21. Область застосування затискних елементів залежно від висоти заготовки та ступеня механізації процесу закріплення

Прихоплювачі 231–237 (табл. А. 13) забезпечують механізоване закріплення-розкріплення заготовок, яке здійснюється шляхом підведення робочої рідини у відповідну порожнину гідроциліндра. Прихоплювач 231 угвинчується у вбудовані гідроциліндри базової плити. Якщо схемою установлення заготовки передбачено установлення ЗЕ у місцях, що не відповідають розташуванню вбудованих гідроциліндрів базової плити, використовують прихоплювачі 232–237. Так, прихоплювачі 232, 234–237 прикріплюються гвинтами до плити, а прихоплювач 233 угвинчується у будь-який різьбовий отвір

базової плити. Збільшення діапазону регулювання висоти заготовок, що закріплюються, досягається переналагодженням регульованої опори з подальшою фіксацією стопорної гайки у необхідному положенні.

Для закріплення заготовок при механічній обробці на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах доцільно використовувати запропонований затискний модуль [64].

В основу ідеї, що пропонується, поставлене завдання спрощення конструкції, підвищення гнучкості та автоматизація закріплення заготовок при механічній обробці.

Після установалення заготовки система ЧПК верстата подає команду на кроковий двигун, який приводить у рух вал-шестірню 1 (рис. 7.22). При цьому вал-рейка 2 здійснює поступальний рух донизу, тим самим тягнучи за собою поворотний вал 3 із прихоплювачем 4. Установлювальний гвинт 5 направляє рух вала по спіральному пазу, тим самим повертаючи його у положення для закріплення.

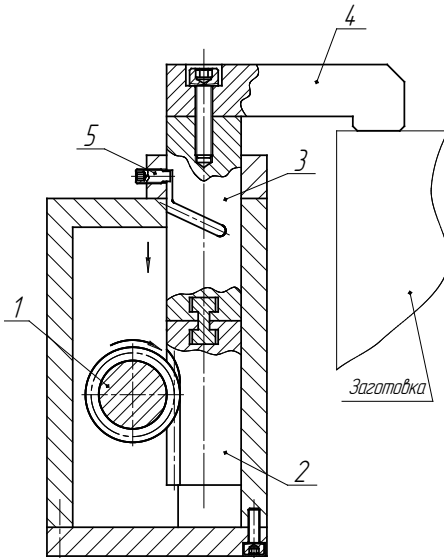


Рис. 7.22. Затискний модуль (патент України № 38073)

Після дотику прихоплювача до заготовки кроковий двигун забезпечує фіксацію рейково-зубчастої передачі в необхідному положенні. Для розкріплення деталі подається команда на кроковий двигун, після чого приводиться в дію рейково-зубчаста передача. Вал-рейка 2 здійснює поступальний рух вгору, одночасно повертаючи прихоплювач 4 у положення для розкріплення, що забезпечує вільне зняття

обробленої деталі. Затискний модуль виконано як самостійну складальну одиницю, що дозволяє його встановлення у будь-якому місці робочого стола верстата відповідно до форми та розмірів заготовки. Використання запропонованого затискного модуля дозволяє підвищити гнучкість ВП, а також зменшити допоміжний час завдяки автоматизації закріплення заготовки, що підвищує ефективність свердильних та фрезерних операцій [65].

### **7.3. Конструкції елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв**

Для підвищення ефективності використання верстатів із ЧПК у багатонаменклатурному виробництві необхідно мінімізувати витрати часу на закріплення-розкріплення заготовок та переналагодження компонувань ВП при переході до обробки деталей іншого типорозміру. Для обробки деталей на верстатах з ЧПК розроблено конструкції елементів ВП, які мають високий ступінь гнучкості та забезпечують швидке переналагодження установлювальних та затискних елементів у широкому діапазоні розмірів. Це дозволяє скоротити непродуктивні витрати часу, а отже, підвищити ефективність використання верстатів із ЧПК.

Для закріплення заготовок з криволінійними базовими поверхнями і при значних відхиленнях від їх площинності нами розроблено конструкцію змінних губок [66] для верстатних лещат. Застосування змінних губок дозволяє полегшити установку заготовок із криволінійною базовою поверхнею, підвищити надійність їх закріплення і точність обробки.

Новизною запропонованої змінної наладки є розташовані в отворах корпусу 1 (рис. 7.24) жорстко закріплені опори 4 і самовстановлювальні рухомі опори 5, що знаходяться у пазах між корпусом і планками 3. Планки 3, що прикріплені до корпусу 1 гвинтами 2, забезпечують можливість осьового переміщення рухомих опор 5 за рахунок встановлених пружин 6. Запропонована змінна наладка з Т-подібними

виступами на кришці 7, що прикріплена гвинтами 8 до корпусу 1, встановлюється відповідно до Т-подібних пазів на губках лещат і фіксується гвинтами 11, шайбами 12 і гайками 13.

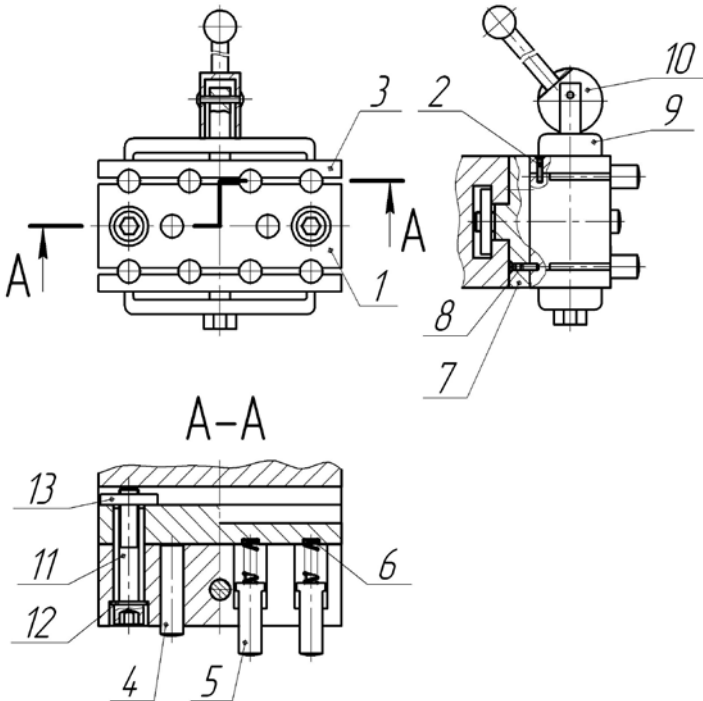


Рис. 7.24. Змінні губки верстатних лещат (патент України № 27551)

При закріпленні заготовки рухомі опори 5 самовстановлюються по криволінійній базовій поверхні заготовки, при цьому всі зазори вибираються. Губки підводяться до заготовки доти, поки опори 4 не почнуть затискати заготовку. Після цього рухомі опори 5 затискаються планками 9 за допомогою ексцентрика 10. Остаточне затиснення заготовки здійснюється рухомою губкою верстатних лещат.

Заготовки, що мають осьові отвори великого діаметра, встановлюються на розтискну оправку [67]. Під дією затискної сили клин 1 (рис. 7.25) переміщується у напрямку її дії,

змушуючи плунжери 2 здійснювати відцентрове осьове переміщення в отворах корпуса 3, забезпечуючи закріплення заготовки.

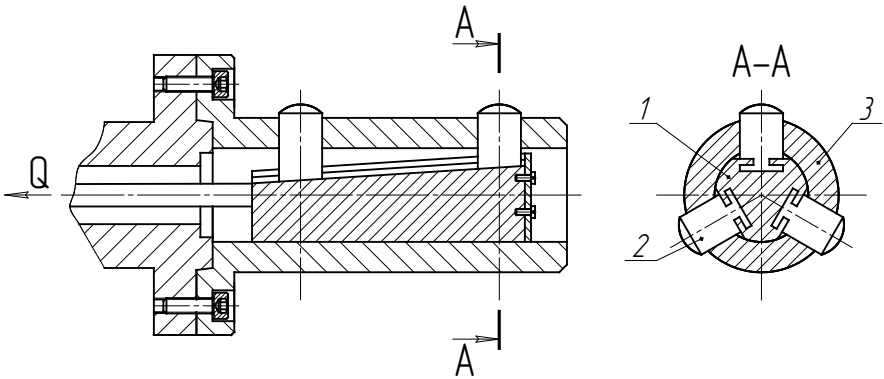


Рис. 7.25. Розтискна оправка (патент України № 30999)

Після припинення дії сили  $Q$  затискний клин 1 та плунжери 2 повертаються у вихідне положення за допомогою Т-подібного з'єднання, забезпечуючи вільне зняття деталі з оправки та встановлення нової заготовки. Запропонована конструкція оправки дозволяє істотно розширити діапазон діаметрів базових отворів заготовок, які вона здатна затиснути [68].

Для установлення жорстких заготовок типу диска або короткого вала на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК використовуються самоцентрувальні патрони різних конструкцій. Високу гнучкість і мінімальні витрати часу на автоматизоване переналагодження забезпечує токарний самоцентрувальний патрон [69], конструкція якого показана на рис. 7.26.

Поставлене завдання досягається тим, що у плиті 1 під кутом 120 градусів один до одного виконано радіальні пази, вздовж яких переміщуються кулачки 2 за допомогою напрямної планки 3 і гвинта 4. Застосування гвинта з лівою та правою різьми дозволяє одночасно переміщувати кулачки до центра або від центра плити, причому один кінець гвинта має крок різьби

вдвічі менший, ніж інший, що забезпечує переміщення кулачків на однакову величину по довжині паза.

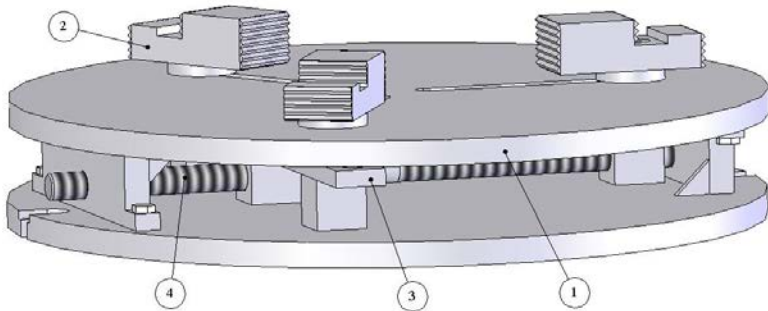


Рис. 7.26. Токарний самоцентрувальний автоматично переналагоджуваний патрон (патент України № 31468)

Закріплення-розкріплення заготовки здійснюється автоматично по команді від пристрою ЧПК верстата за допомогою автоматизованого привода, який обертає гвинт 4.

Використання запропонованої конструкції патрона на верстатах із ЧПК і в гнучких виробничих системах сприяє скороченню підготовчо-заклучного часу завдяки автоматизації процесу переналагодження кулачків на необхідний діаметр базової поверхні оброблюваної заготовки [70].

При базуванні заготовок за схемою по площині та двох отворах може бути використана змінна плита [71]. У різьбові отвори, які є на базовій поверхні заготовки або виготовлені спеціально, вгвинчують установлювальні пальці 1 (рис. 7.27).

Після цього заготовку встановлюють на корпус 2, вводячи установлювальні пальці 1 в отвори кільцевих резервуарів 3. Гвинтова регульована опора 4 регулюється залежно від конфігурації заготовки і фіксується в необхідному положенні стопорною гайкою 5. Затиснення установлювальних пальців відбувається одночасно за рахунок створення потрібного тиску робочої рідини у системі підвідних масляних магістралей 6 та масляних резервуарів 3, що спричиняє деформацію тонких сталевих стінок масляних резервуарів 3, унаслідок чого центруються та затискаються установлювальні

пальці 1 і забезпечується закріплення заготовки. Використання запропонованої змінної плити зменшує допоміжний час на закріплення заготовки, забезпечує інструментальну доступність при контурній обробці, що підвищує ефективність свердильних та фрезерних операцій.

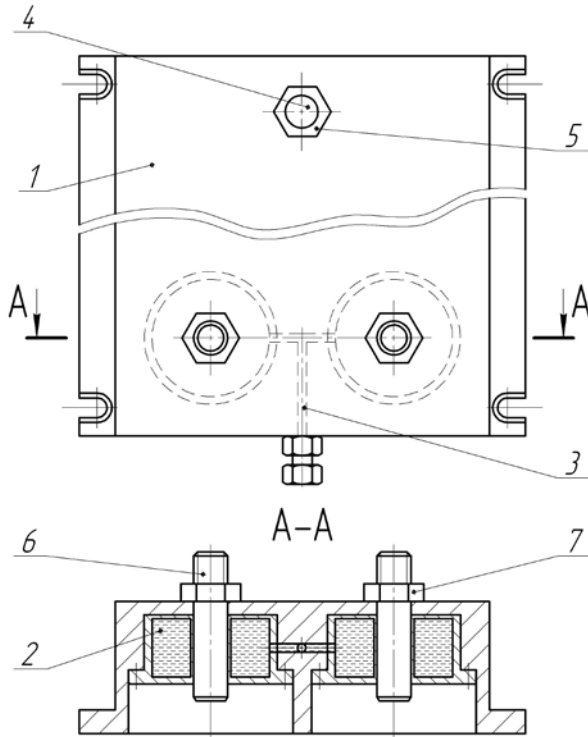


Рис. 7.27. Змінна плита (патент України № 34438)

Запропоновані конструкції елементів універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв дозволяють: підвищити гнучкість конструювань ВП та точність переналагодження елементів; значно зменшити витрати часу на переналагодження при переході до обробки деталей іншого типорозміру шляхом швидкого регулювання установлювальних та затискних елементів; скоротити кількість елементів ВП, а отже, сприяють зменшенню металомісткості та вартості конструювань ВП.

#### **7.4. Порівняльний аналіз технічних характеристик верстатних пристроїв для встановлення ступінчастих валів**

Для аналізу компонувань ВП з точки зору технічних характеристик розглянемо як приклад варіанти базування ступінчастого вала по зовнішніх циліндричних поверхнях в універсальному, механізованому й автоматизованому ВП. Ця схема базування є найбільш поширеною для деталей типу вала при обробці на свердлильних і фрезерних верстатах із ЧПК.

Для реалізації цієї схеми базування часто застосовують жорсткі опорні призми. Комплект призм складається з 10 типорозмірів, що охоплюють діаметри базових поверхонь 5–150 мм (типорозмір 1 відповідає діапазону базових діаметрів 5–10 мм; типорозмір 2 – 10–15; типорозмір 3 – 15–20 мм; типорозмір 4 – 20–25 мм; типорозмір 5 – 25–35 мм; типорозмір 6 – 35–45 мм; типорозмір 7 – 45–60 мм; типорозмір 8 – 60–80 мм; типорозмір 9 – 80–100 мм; типорозмір 10 – 100–150 мм). Маса комплекту призм без кріпильних елементів становить 10,7 кг. Для забезпечення встановлення заготовок з різними діаметрами базових поверхонь доцільно мати два комплекти призм, щоб виключити можливість, коли базові діаметри однієї заготовки належать до одного діапазону діаметрів, тобто потребують використання одного типорозміру призм.

Аналіз технічних характеристик комплекту призм показав, що відстань між віссю встановлюваної заготовки і основою призми для різних типорозмірів відрізняється. Крім того, якщо у призму одного типорозміру встановити заготовки з різними базовими діаметрами, наприклад, граничними значеннями діаметрів для визначеного типорозміру, то відстань між їх осями буде дорівнювати величині  $\Delta$ . Тобто, якщо на одній базовій плиті встановити дві призми для базування ступінчастого вала, то спостерігається непаралельність осі заготовки відносно площини базової плити. З метою забезпечення співвісності шийок ступінчастого вала при базуванні у призмах використовують комплекти прокладок і підкладок. Сумарна висота прокладок і підкладок, які



встановлюються під одну з призм, компенсує необхідну величину  $\Delta$ . Комплект прокладок складається з 80 шт., розміри яких від 1,00 до 4,95 мм з кроком 0,05 мм. До комплекту підкладок входить 7 типорозмірів: 5 мм, 7,5 мм, 10 мм, 12,5 мм, 15 мм, 17,5 мм та 20 мм.

При установленні ступінчастого вала у ВП на жорсткі опорні призми (рис. 7.28) його базують по зовнішніх циліндричних поверхнях і торцю.

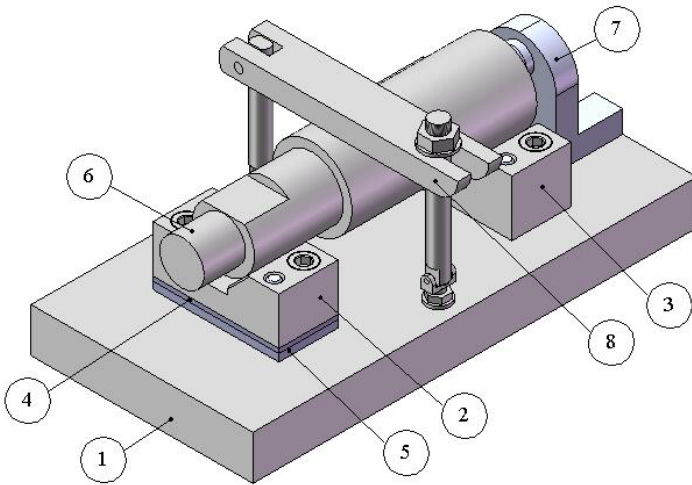


Рис. 7.28. Установлення ступінчастого вала на жорстких опорних призмах

На базовій плиті 1 розміщують жорсткі опорні призми 2 та 3, причому під призму 2 додатково встановлюють прокладку 4 і підкладку 5 з метою забезпечення паралельності осі ступінчастого вала 6 відносно площини базової плити. Жорсткий упор 7 реалізує опорну базу.

Закріплення заготовки здійснюється відкидною планкою 8. При переході до обробки деталей з іншими базовими діаметрами необхідні заміна жорстких опорних призм і підбір відповідних прокладок та підкладок з комплекту, що здійснюється вручну і потребує значних витрат підготовчо-заключного часу.

При установленні заготовки в універсальних машинних лещатах (рис. 7.29) для фрезерування лиски до нерухої губки 1 прикріплюється кутник 2, на який встановлюють шийку вала оброблюваної заготовки 3, на якій необхідно обробити лиску.

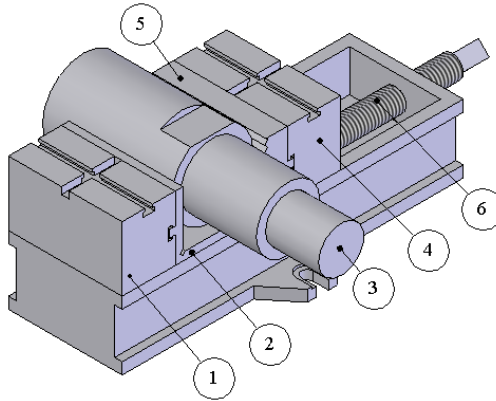


Рис. 7.29. Установлення ступінчастого вала в універсальних машинних лещатах

Закріплення заготовки здійснюється рухомою губкою 4 зі змінною наладкою 5 за допомогою гвинта 6. Таким чином забезпечується необхідна жорсткість заготовки у процесі формоутворення. При фрезеруванні кількох лисок на одній заготовці виконується переустановлення. Затискання і розтискання заготовки здійснюється верстатником.

При установленні заготовки у ВП, скомпонований з елементів системи ЗРП (рис. 7.30), її базують по зовнішніх циліндричних поверхнях і торцю. Пливу 1 з установленими регульованими призмами 2 і 3, а також регульованим упором 4 закріплюють на столі верстата. Регулювання установлювальних напівпризм здійснюється гвинтом з лівою і правою різьбами, що дозволяє одночасно регулювати обидві напівпризми на необхідний базовий діаметр заготовки, забезпечуючи суміщення осей призми та заготовки.

Для зміни відстані між призмами 2 і 3 одну з призм необхідно переустановити. Як механізований привід

закріплення використовують гідроциліндр. При переході до обробки деталей іншого типорозміру необхідно виконати перекомпонування ВП, яке здійснюється робітником.

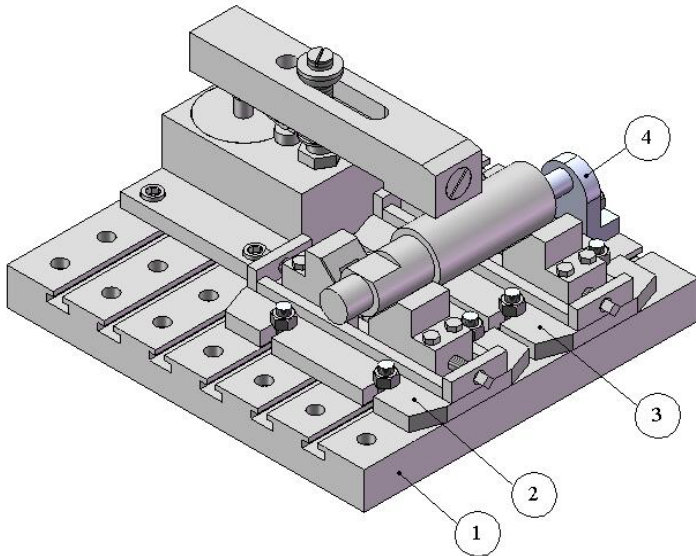


Рис. 7.30. Установлення ступінчастого вала у збірно-розбірному пристрої

Перевагою даного ВП порівняно з універсальними машинними лещатами є можливість обробки кількох поверхонь без переустановлення заготовки, а також використання механізованого привода для закріплення оброблюваних заготовок.

Запропоноване компонування ВП з елементів системи УЗППІ на основі автоматично переналагоджуваної базуючої призми [62]. УЕ виконано у формі дисків, осі обертання яких зміщені відносно осі диска на величину ексцентриситета  $e$  (рис. 7.31). За допомогою системи зубчастих коліс опорні диски одночасно обертаються в різні боки на заданий кут, який відповідає потрібному діаметру оброблюваної заготовки у діапазоні  $d_{\text{заг min}} - d_{\text{заг max}}$  [53]. Максимальний кут повороту опорних дисків –  $90^\circ$ .

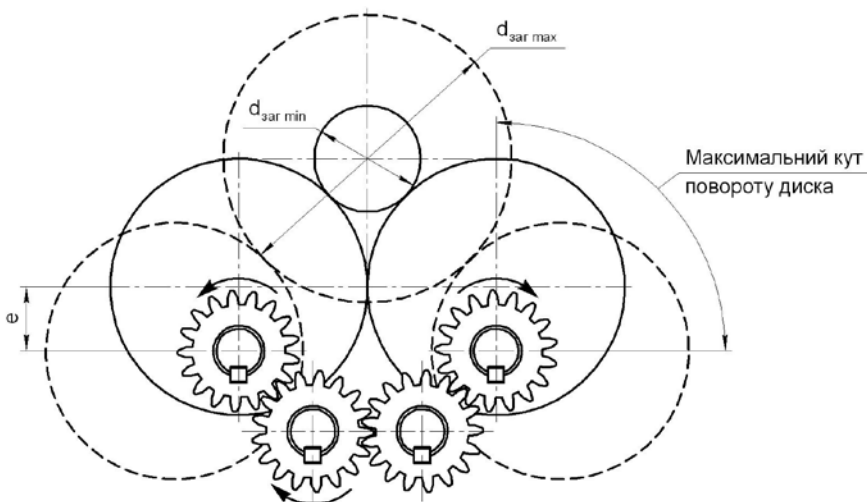


Рис. 7.31. Схема механізму регулювання установлювальних елементів базуючої призми (патент України № 31416)

На базову плиту 1 (рис. 7.32) встановлюють базуючий модуль 2, на якому розташовані змінні наладки 3 і 4, що регулюються, причому наладка 3 жорстко закріплена на базуючому модулі, а наладка 4 – на каретці 5 лінійного двигуна, що дозволяє змінювати відстань між опорними дисками 6 і забезпечує необхідну жорсткість заготовки 7 у процесі механічної обробки. Заготовку 7 – оброблюваний ступінчастий вал установлюють базовими поверхнями на опорні диски 6 з упором у торець. Упор 8 можна регулювати по висоті і довжині вильоту опори, що регулюється. Система ЧПК верстата подає команду на крокові двигуни 9, які через вали-шестірні обертають опорні диски на необхідний кут, який відповідає діаметру заготовки. Причому сигнали на кожний кроковий двигун передаються окремо, що дозволяє опорні диски регульованих наладок переналагоджувати на різні діаметри.

Лінійний двигун 10 здійснює зміну положення модуля 11 вздовж осі заготовки. Затиск заготовки виконують відвідним притискачем 12, який забезпечує безперешкодне зняття обробленої деталі й установлення нової заготовки. Затискання-розтискання заготовки, а також переналагодження ВП для

обробки деталей іншого типорозміру здійснюють автоматично за командами від системи ЧПК верстата.

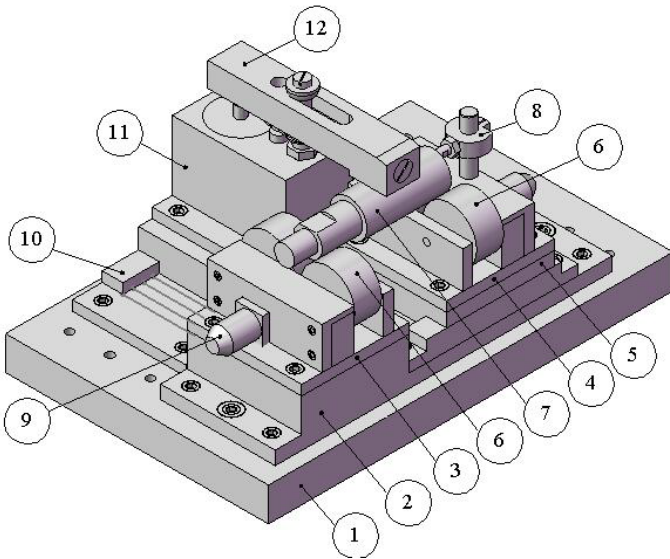


Рис. 7.32. Установлення ступінчастого вала в універсально-збірному переналагоджуваному пристрої

Аналіз технічних характеристик запропонованої конструкції УЗПП на основі базуючої призми підтвердив доцільність її застосування для оснащення металорізальних верстатів із ЧПК у багатомономенклатурному виробництві.

До переваг цієї конструкції належить можливість:

- автоматизованого переналагодження опорних дисків на необхідний діаметр оброблюваної заготовки;
- автоматизованого переміщення однієї з наладок, що регулюються, при зміні відстані між базовими поверхнями заготовки;
- прикладання затискного зусилля у будь-якій точці заготовки вздовж її осі.

Для розглянутих компоновань ВП виконано порівняльний аналіз за коефіцієнтом часової гнучкості, на який

значний вплив чинять такі показники: час переналагодження ВП, величина партії запуску деталей та час обробки деталі.

Кожне компонування ВП характеризується певними технологічними можливостями. Однією із основних характеристик ВП в умовах багатомноменклатурного виробництва є час переналагодження ВП для установлення деталей іншого типорозміру. На ці витрати впливають підготовчо-заключна складова норми часу, пов'язана з переналагодженням установлювальних та затискних елементів, а також допоміжна складова норми часу, що залежить від витрат часу на установлення-зняття та затискання-розтискання деталей у ВП. Величина партії запуску деталей – це кількість деталей певного типорозміру, що підлягають обробці у заданому компонуванні ВП. При розрахунках прийнято, що величина партії запуску деталей змінюється у діапазоні 1–10 шт., а обробка однієї деталі здійснюється за 0,5–5 хв.

Встановлено, що компонування з елементів системи УЗПП (див. рис. 7.31) має найвищі показники часової гнучкості порівняно з іншими компонуваннями ВП. У табл. 7.1 сірим кольором виділено коефіцієнт часової гнучкості, який перевищує величину 0,25, що відповідає високій гнучкості ВП, тобто визначає раціональну область застосування наведених компонувань ВП. На рис. 7.33 а наведено залежність коефіцієнта часової гнучкості від величини партії запуску деталей для компонувань ВП за умови, що час обробки заготовки становить  $T_0 = 1$  хв.

Для компонувань ВП, призначених для обробки заготовок з партією запуску  $N = 5$  шт., залежність коефіцієнта часової гнучкості від часу обробки деталей має характер, показаний на рис. 7.33 б.

Як бачимо, запропоноване компонування ВП з елементів системи УЗПП характеризується високим коефіцієнтом часової гнучкості порівняно з іншими компонуваннями ВП. Раціональною областю її використання є обробка заготовок з величиною партії запуску  $N > 3$  шт.

Таблиця 7.1

## Аналіз компонувань ВП за коефіцієнтом часової гнучкості

ВП	Величина партії запуску деталей N, шт.	Коефіцієнт часової гнучкості залежно від часу обробки деталі, хв.									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Компонування ВП із елементів системи УЗПП (рис. 7.32)	1	0,09	0,17	0,23	0,29	0,33	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50
	2	0,17	0,29	0,38	0,44	0,50	0,55	0,58	0,62	0,64	0,67
	3	0,23	0,38	0,47	0,55	0,60	0,64	0,68	0,71	0,73	0,75
	4	0,29	0,44	0,55	0,62	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,80
	5	0,33	0,50	0,60	0,67	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83
	6	0,38	0,55	0,64	0,71	0,75	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86
	7	0,41	0,58	0,68	0,74	0,78	0,81	0,83	0,85	0,86	0,88
	8	0,44	0,62	0,71	0,76	0,80	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89
	9	0,47	0,64	0,73	0,78	0,82	0,84	0,86	0,88	0,89	0,90
	10	0,50	0,67	0,75	0,80	0,83	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91

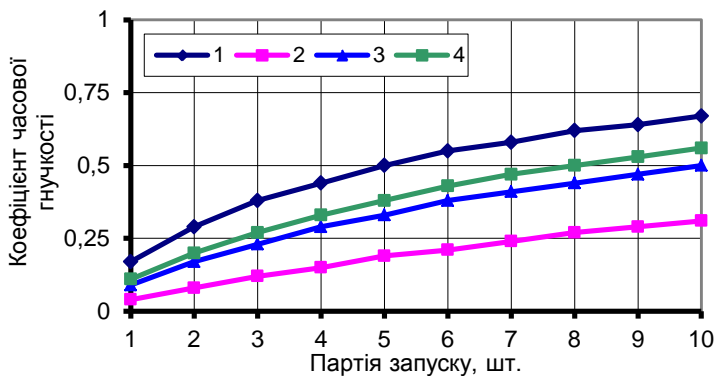
Продовження табл 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Компонування ВП із елементів системи УЗП (рис. 7.28)	1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19
	2	0,04	0,08	0,12	0,15	0,19	0,21	0,24	0,27	0,29	0,31
	3	0,06	0,12	0,17	0,21	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41
	4	0,08	0,15	0,21	0,27	0,31	0,35	0,39	0,42	0,45	0,48
	5	0,10	0,19	0,25	0,31	0,36	0,41	0,44	0,48	0,51	0,53
	6	0,12	0,21	0,29	0,35	0,41	0,45	0,49	0,52	0,55	0,58
	7	0,14	0,24	0,32	0,39	0,44	0,49	0,53	0,56	0,59	0,61
	8	0,15	0,27	0,35	0,42	0,48	0,52	0,56	0,59	0,62	0,65
	9	0,17	0,29	0,38	0,45	0,51	0,55	0,59	0,62	0,65	0,67
	10	0,19	0,31	0,41	0,48	0,53	0,58	0,61	0,65	0,67	0,69
Компонування ВП із елементів системи ЗРП (рис. 7.30)	1	0,05	0,09	0,13	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33
	2	0,09	0,17	0,23	0,29	0,33	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50
	3	0,13	0,23	0,31	0,38	0,43	0,47	0,51	0,55	0,57	0,60
	4	0,17	0,29	0,38	0,44	0,50	0,55	0,58	0,62	0,64	0,67
	5	0,20	0,33	0,43	0,50	0,56	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71
	6	0,23	0,38	0,47	0,55	0,60	0,64	0,68	0,71	0,73	0,75
	7	0,26	0,41	0,51	0,58	0,64	0,68	0,71	0,74	0,76	0,78
	8	0,29	0,44	0,55	0,62	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,80
	9	0,31	0,47	0,57	0,64	0,69	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82
	10	0,33	0,50	0,60	0,67	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83

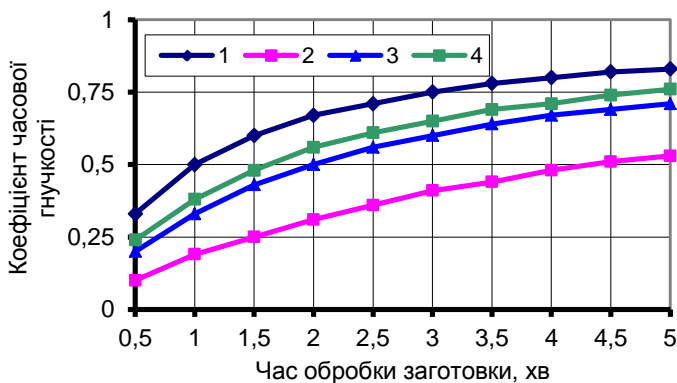


Продовження табл 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Машинні лещата (рис. 7.29)	1	0,06	0,11	0,16	0,20	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36	0,38
	2	0,11	0,20	0,27	0,33	0,38	0,43	0,47	0,50	0,53	0,56
	3	0,16	0,27	0,36	0,43	0,48	0,53	0,57	0,60	0,63	0,65
	4	0,20	0,33	0,43	0,50	0,56	0,60	0,64	0,67	0,69	0,71
	5	0,24	0,38	0,48	0,56	0,61	0,65	0,69	0,71	0,74	0,76
	6	0,27	0,43	0,53	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79
	7	0,30	0,47	0,57	0,64	0,69	0,72	0,75	0,78	0,80	0,81
	8	0,33	0,50	0,60	0,67	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83
	9	0,36	0,53	0,63	0,69	0,74	0,77	0,80	0,82	0,84	0,85
	10	0,38	0,56	0,65	0,71	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86



а)



б)

Рис. 7.33. Залежність коефіцієнта часової гнучкості від:  
 а – величини партії запуску деталей; б – часу обробки заготовки;  
 у компонованнях ВП: 1 – з комплекту УЗПП; 2 – з комплекту  
 УЗП; 3 – з комплекту ЗРП; 4 – машинні лещата

Крім того, доцільним є застосування запропонованого компоновання ВП при обробці заготовок із величиною партії запуску  $N = 2-3$  шт. та  $N = 1$  шт. за умови, що час обробки заготовки перевищуватиме 1 хв та 2 хв відповідно.

## 8. Аналітичні дослідження точності універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв

### 8.1. Верстатні пристрої для установлення корпусних деталей

При установленні корпусних деталей у ВП одна з поверхонь є установлювальною, позбавляючи заготовку трьох ступенів вільності. Установлювальною базовою поверхнею заготовка установлюється, як правило, на опори, які можуть бути нерегульовані та регульовані.

Регульовані опори застосовують для установлення заготовок по оброблених та необроблених базових поверхнях при значних коливаннях припусків на механічну обробку, при установленні заготовок за розмічальними рисками, а також при переході до обробки іншої деталі. Вони установлюються у корпусі ВП по різьбі та фіксується контргайкою.

Для регулювання опор використовують гвинтові, клинові, клиноплунжерні та зубчасті механізми регулювання залежно від ступеня автоматизації процес переналагодження УЕ виконується вручну, механізовано або автоматизовано.

Більш детально розглянуто регульовані опори з гвинтовим та клиновим механізмами регулювання. Час переналагодження УЕ залежить від їх конструкції та параметрів. Наприклад, для гвинтової регульованої опори основними параметрами, що впливають на час переналагодження, є діаметр опори  $d$ , крок різі  $P$  та довжина регулювання  $L$  [72].

Крок різьби гвинтової опори залежить від діаметра опори та істотно впливає на точність регулювання. Для опор діаметрами 6–10 мм рекомендується застосовувати різьби з кроком 0,5–1,5 мм, для опор діаметрами 12–20 мм – 0,5–2,5 мм, а для опор діаметром 24 мм – 0,5–4 мм.

Величина похибки, що виникає при установленні регульованої опори, залежить від похибок базування, закріплення, зносу, а також установлення ВП на верстаті. Знос установлювальної поверхні регульованої опори нерівномірний

за часом. Графік, що відображає характер зносу та формули для розрахунку його величини, наведено у [49]. Похибка установлення ВП на верстаті проявляється осьовим зазором, який виникає між профілями витків метричної різьби.

Довжина регулювання встановлюється залежно від обраної схеми базування та конструкції заготовки. За допомогою загальномашинобудівних нормативів [73] отримано формулу для визначення часу переналагодження  $T_{пер}$  положення опори ВП залежно від її діаметра (6–42 мм), кроку різьби (0,5–4 мм) та довжини регулювання (8–40 мм):

$$T_{пер} = (0,563 + 0,011 \cdot d) \cdot (0,114 + 0,038 \cdot L) \cdot (1,881 \cdot e^{-1,009 \cdot P} + 0,312)$$

Похибки розрахунку за розробленою залежністю не перевищують 9%.

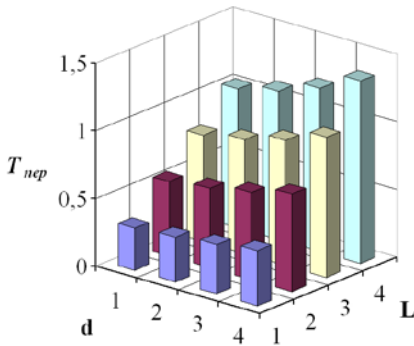
Зі збільшенням діаметра опори та довжини регулювання, а також зі зменшенням величини кроку різьби час переналагодження збільшується (рис. 8.1).

Для переналагодження опори у межах 10 мм доцільно використовувати опори з клиновим механізмом регулювання (рис. 8.2). При величині кута скосу  $\alpha \leq 10^\circ$  він є самогальмівним [49].

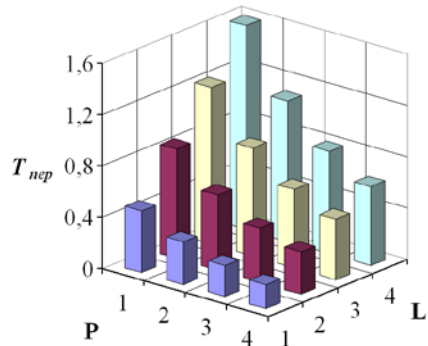
При переналагодженні клинової регульованої опори основними параметрами, що впливають на час переналагодження, є крок різьби  $P$  гвинта, висота регулювання  $H$ , на яку виконується переналагодження, та величина кута скосу клина  $\alpha$  [72].

Виконано аналіз й отримано залежність часу переналагодження  $T_{пер}$  регульованої клинової опори від кроку різьби гвинта, висоти переналагодження та величини кута скосу клина:

$$T_{пер} = (2,132 - 0,61 \cdot P) \cdot \left( 0,061 + 0,019 \cdot \frac{H}{tg \alpha} \right)$$



а)



б)

Рис. 8.1. Діаграми залежності часу переналагодження  $T_{пер}$  гвинтової регульованої опори: а – від діаметра опори та довжини регулювання при  $P = 1$  мм: 1 –  $d = 6$  мм; 2 –  $d = 10$  мм; 3 –  $d = 16$  мм; 4 –  $d = 24$  мм; 1 –  $L = 10$  мм; 2 –  $L = 20$  мм; 3 –  $L = 30$  мм; 4 –  $L = 40$  мм; б – від кроку різьби та довжини регулювання при  $d = 10$  мм: 1 –  $P = 0,5$  мм; 2 –  $P = 1$  мм; 3 –  $P = 1,5$  мм; 4 –  $P = 2$  мм; 1 –  $L = 10$  мм; 2 –  $L = 20$  мм; 3 –  $L = 30$  мм; 4 –  $L = 40$  мм

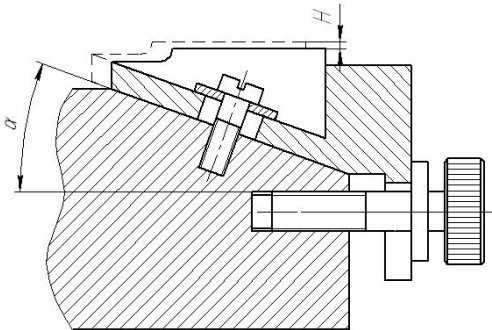


Рис. 8.2. Основні параметри клинової регульованої опори

Похибки розрахунку за розробленою залежністю не перевищують 10%. Діаграми, які наведено на рис. 8.3, свідчать про те, що час переналагодження збільшується при збільшенні висоти переналагодження та зменшенні кроку різьби та величини кута скосу клина.

Сучасне виробництво характеризується частою зміною номенклатури оброблюваних деталей, тому доцільним є дослідження регульованих опор.

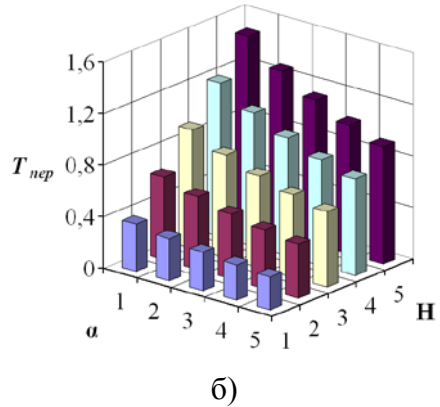
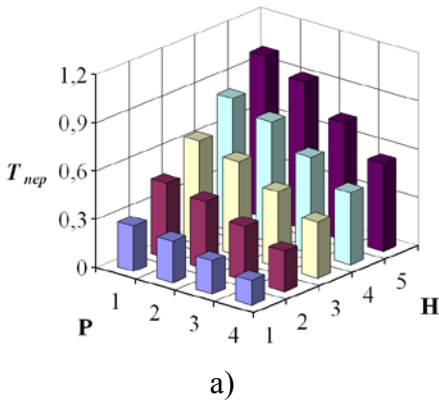


Рис. 8.3. Діаграми залежності часу переналагодження  $T_{пер}$  клинової регульованої опори: а – від кроку різьби та висоти переналагодження при величині кута скосу клина  $\alpha = 10^\circ$ :  
 1 –  $P = 0,75$  мм; 2 –  $P = 1$  мм; 3 –  $P = 1,5$  мм; 4 –  $P = 2$  мм;  
 1 –  $H = 1$  мм; 2 –  $H = 2$  мм; 3 –  $H = 3$  мм; 4 –  $H = 4$  мм;  
 5 –  $H = 5$  мм; б – від висоти переналагодження та кута скосу клина при величині крока різьби  $P = 1$  мм: 1 –  $\alpha = 6^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 7^\circ$ ;  
 3 –  $\alpha = 8^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 9^\circ$ ; 5 –  $\alpha = 10^\circ$ ; 1 –  $H = 1$  мм; 2 –  $H = 2$  мм;  
 3 –  $H = 3$  мм; 4 –  $H = 4$  мм; 5 –  $H = 5$  мм

Для вибору діаметрів гвинтових регульованих опор залежно від маси заготовки необхідно визначити максимальне навантаження на одну опору. Для цього розроблені 3D-моделі гвинтових опор (рис. 8.4 а) стандартних типорозмірів ( $\emptyset 6$ ,  $\emptyset 8$ ,  $\emptyset 10$ ,  $\emptyset 12$ ,  $\emptyset 16$ ). Потім виконано моделювання закріплення і навантаження опори подібно до установаження регульованої опори по різьбі у корпус ВП та здійснено розрахунок за методом скінченних елементів.

На рис. 8.5 наведено діаграми напружено-деформованого стану і пружних переміщень гвинтової регульованої опори діаметром 12 мм при навантаженні. Аналізуючи діаграму напружено-деформованого стану, можна зробити висновок, що найбільш навантаженою є ділянка, де циліндрична поверхня переходить у різьбову. Саме у цьому місці спостерігається

максимальне значення напружень за критерієм Мізеса (рис. 8.5 а).

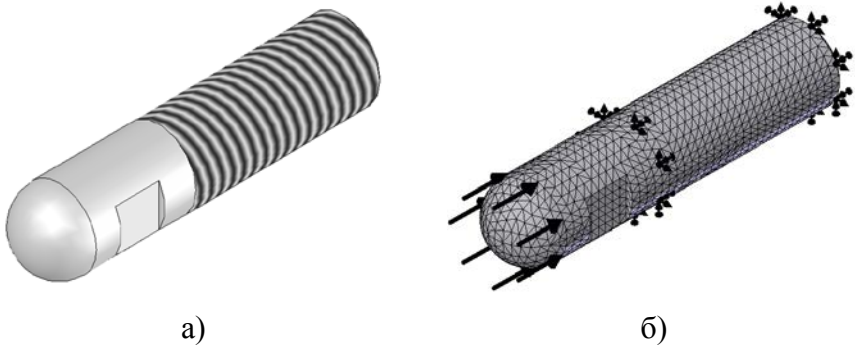


Рис. 8.4. 3D-модель (а) та скінченно-елементна модель з прикладеним навантаженням та граничними умовами (б) гвинтової регульованої опори

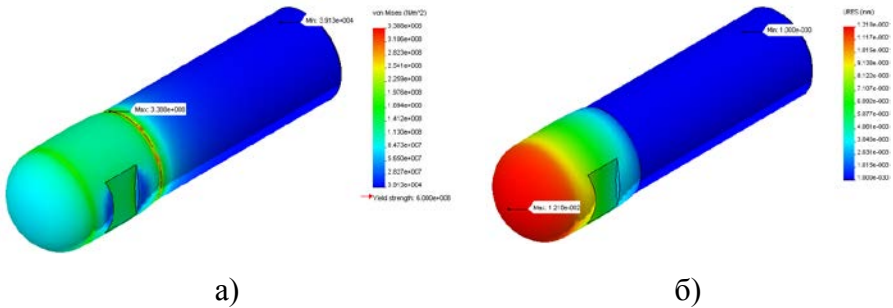


Рис. 8.5. Діаграми напружено-деформованого стану (а) і пружних переміщень (б) гвинтової регульованої опори діаметром 12 мм

Діаграма пружних переміщень відображає величину переміщення опори при навантаженні по відношенню до початкового положення без навантаження. Найбільше значення пружних переміщень відповідає точці опори, у якій відбувається контакт із заготовкою (рис. 8.5 б). При розрахунках вважали, що припустиме значення запасу міцності опор дорівнює 2,5.

Результати розрахунку зведено до табл. 8.1 [74]. На опори діють вага заготовки, сили різання, що виникають при механічній обробці, а також сила закріплення, що забезпечує незмінне положення заготовки у процесі формоутворення. Наприклад, три опори діаметром 12 мм можуть сприймати максимальне навантаження 39,6 кН. Таким чином, сили різання та закріплення, а також вага заготовки у сумі не повинні перевищувати розрахункове значення 39,6 кН.

Таблиця 8.1

Результати розрахунку напружено-деформованого стану  
гвинтових регульованих опор

Діаметр регульованої опори, мм	6	8	10	12	16
Максимальне навантаження на одну опору, кН	3,1	5,8	11,0	13,2	21,3
Максимальні еквівалентні напруження за критерієм Мізеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	$3,41 \cdot 10^8$	$3,39 \cdot 10^8$	$3,37 \cdot 10^8$	$3,39 \cdot 10^8$	$3,41 \cdot 10^8$
Пружні переміщення, мм	0,006	0,008	0,011	0,012	0,014

Відомо, що спочатку обирається компонування ВП, а потім призначається режим різання і необхідне затискне зусилля. Тому після призначення режиму різання необхідно уточнити прийнятий діаметр опор відповідно до отриманих розрахункових величин. Ідеальний варіант, коли вага заготовки рівномірно розподілена між трьома опорами, а центр мас заготовки знаходиться у центрі опорного трикутника і оброблювана поверхня не виходить за його межі. Допустиме



навантаження на одну опору  $[P_{on}]$  можна визначити за формулою

$$[P_{on}] = \frac{P_{заг} + P_{різ} + P_{закр}}{3},$$

де  $P_{заг}$  – вага оброблюваної заготовки, Н;

$P_{різ}$  – розрахункова величина сили різання, Н;

$P_{закр}$  – розрахункова величина сили закріплення, Н.

Часто необхідно обробити несиметричну заготовку, центр маси якої зміщено в одну зі сторін, або заготовку, у якій обробці підлягає тільки одна зі сторін, тобто виконується несиметрична або багатоінструментна обробка (наприклад, застосування багатощпindelної головки для свердління кількох отворів). Тому необхідно індивідуально підходити до вибору УЕ у компонованні ВП, урахувавши всі фактори, що впливають на опори у процесі механічної обробки й узгодити розрахункові величини з даними табл. 8.1.

Точність обробки на верстатах із ЧПК істотно залежить від точнісних характеристик ВП. Визначення похибок елементів ВП доцільно виконувати шляхом дослідження їх напружено-деформованого стану методом скінченних елементів [75]. В останні десятиріччя цей метод отримав широке застосування при аналітичних дослідженнях конструкцій у машинобудуванні. Сучасні програмні продукти на основі методу скінченних елементів дозволяють на етапі проектування ВП визначити характеристики точності як окремих елементів, так і компоновання ВП в цілому. В основу метода скінченних елементів покладено дослідження тіла на основі поведінки окремих його частин – скінченних елементів.

На основі цього методу досліджено похибки пружних деформацій, що виникають під дією сил різання при обробці корпусної деталі, установленної у компонованнях ВП з елементів систем УЗПО та УЗПП.

Базування заготовки у першому компонованні ВП здійснюється на три регульовані опори, що вгвинчені в отвори

базової плити (рис. 8.6). Установлення заготовки у компонуванні з елементів системи УЗПП здійснюється у запропонованому базуючому переналагоджуваному модулі [76], який забезпечує базування заготовок по площині, а також здійснює автоматизоване регулювання положення опор, що визначає високу ефективність запропонованої конструкції при частій зміні типорозмірів оброблюваних заготовок на свердлильних, фрезерних і багатоцільових верстатах.

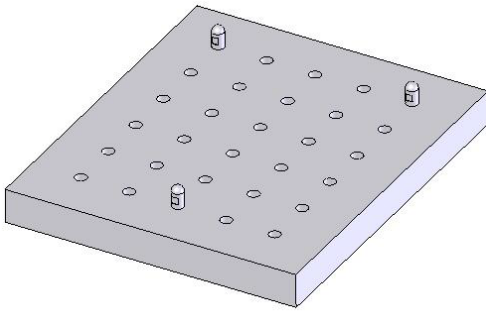


Рис. 8.6. Базуючий модуль системи УЗПО

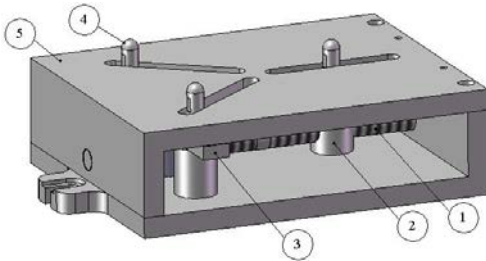


Рис. 8.7. Базуючий переналагоджуваний модуль (патент України № 31469)

Автоматизований привод рухає гвинт 1 (рис. 8.7), який одночасно переміщує опорний елемент 2 та напрямну планку 3, тим самим забезпечуючи переміщення опор 4 по призматичних пазах плити 5 на необхідний розмір. Використання гвинта 1 з лівою та правою різьбами дозволяє одночасно переміщувати опори 4 до центра або від центра плити 5 для встановлення заготовок з різними розмірами базових поверхонь. Використання запропонованого базуючого модуля сприяє підвищенню гнучкості пристрою, а також зменшенню

підготовчо-заключного часу на його переналагодження завдяки одночасному переміщенню опор.

Для порівняння точнісних можливостей наведених компонувань ВП виконано моделювання процесу свердління

отворів у корпусній деталі. Розглянуто два варіанта свердління кількох отворів діаметром 20 мм на глибину 30 мм:

а) у заготовці коробчастої форми (рис. 8.8) із чавуну масою 50 кг по черзі свердляться два отвори, один із яких знаходиться у межах опорного трикутника (рис. 8.9 а), а інший – поза опорним трикутником (рис. 8.9 б).

б) у такій самій заготовці з використанням багатошпindelної головки свердляться чотири отвори, розташовані на одному колі (рис. 8.9 в) та чотири отвори, розміщені у лінію (рис. 8.9 г).

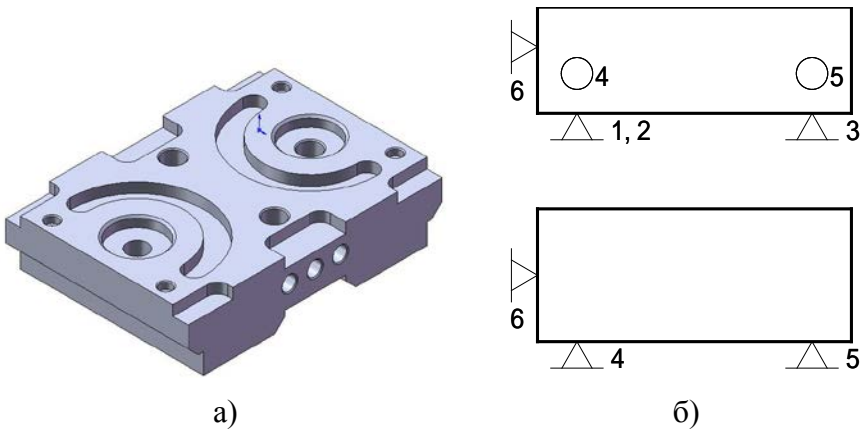


Рис. 8.8. Корпусна деталь:  
а – 3D-модель; б – схема базування

За нормативами [20] призначено такий режим свердління отворів свердлами, оснащеними твердим сплавом ВК8: подача  $S_o = 0,47$  мм/об., швидкість різання  $V = 63$  м/хв. При цьому частота обертання свердла  $n = 1000$  об./хв, крутний момент дорівнює  $M_{кр} = 28,7$  Н·м, осьова сила різання  $P_o = 5300$  Н.

На 3D-моделі оброблюваної заготовки призначаємо координати двох отворів: одного у межах опорного трикутника, а іншого – поза межами. Визначаємо напруження та величини пружних переміщень УЕ у місці контакту із заготовкою.

Після встановлення заготовки на УЕ і прикладання сили закріплення між заготовкою та опорами виникають контактні

деформації, внаслідок яких зминаються мікронерівності на оброблюваній заготовці. Під дією сил різання з'являються пружні деформації.

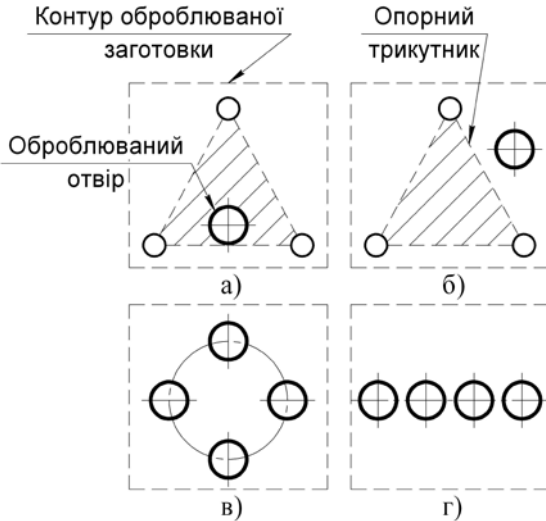
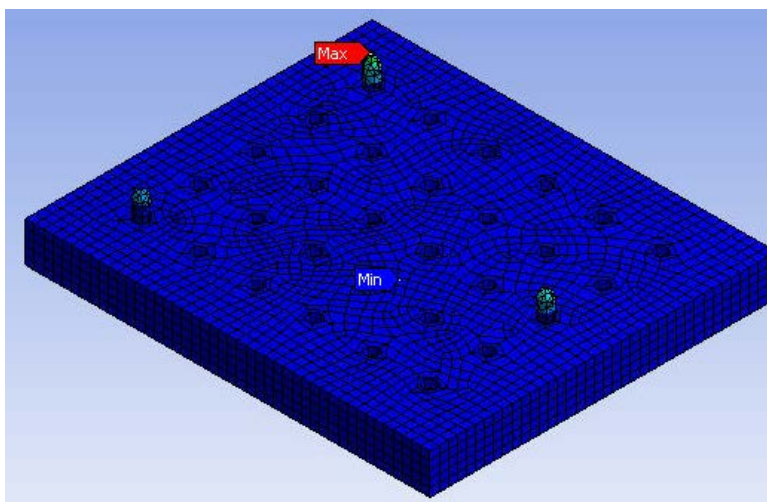


Рис. 8.9. Варіанти свердління отворів у заготовці: а – отвір у межах опорного трикутника; б – отвір поза межами опорного трикутника; в – чотири отвори, розміщені на одному колі; г – чотири отвори, розміщені у лінію

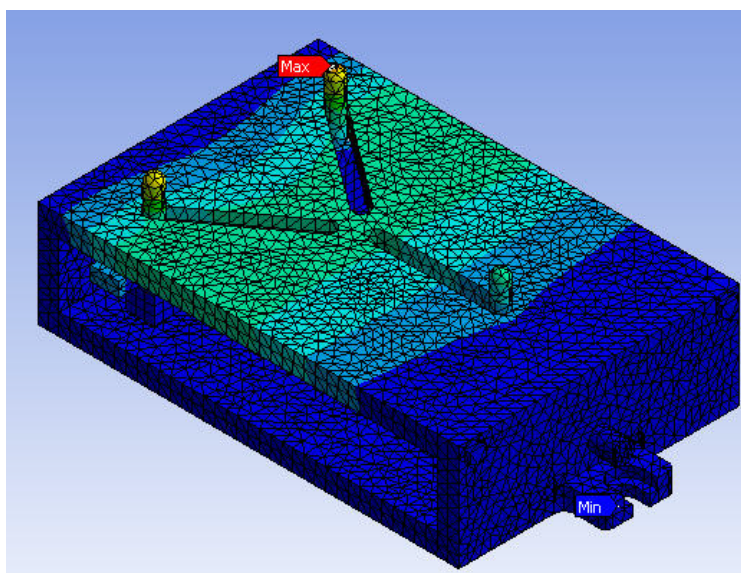
Діаграми напружено-деформованого стану опор базуючих модулів наведено на рис. 8.10, а результати розрахунку за методом скінченних елементів – у табл. 8.2.

При свердлінні отвору поза межами опорного трикутника напруження розподіляються нерівномірно, максимальні значення яких спостерігаються поблизу найбільш навантажених елементів – опор і, отже, у них виникають більші величини переміщень, ніж при свердлінні отворів, розміщених у межах опорного трикутника.

При обробці багатошпindelними головками напруження за критерієм Мізеса і величини переміщень значно більші, ніж при одноінструментній обробці. Якщо порівнювати конструктивне виконання багатошпindelних головок, то напруження будуть менші при обробці отворів, розміщених по колу.



а)



б)

Рис. 8.10. Діаграми пружних переміщень при свердлінні отворів, розміщених у межах опорного трикутника заготовки, для базуючих модулів: а – системи УЗПО; б – системи УЗПП

Таблиця 8.2

Результати розрахунку напружено-деформованого стану базуючих модулів при свердлінні

Розрахункові параметри	Базуючий модуль	Одноінструментна обробка		Багатоінструментна обробка	
		Отвір у межах опорного трикутника	Отвір поза межами опорного трикутника	Отвір у межах опорного трикутника	Отвір поза межами опорного трикутника
Еквівалентні напруження за критерієм Мізеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	УЗПО	$1,54 \cdot 10^8$	$1,72 \cdot 10^8$	$3,96 \cdot 10^8$	$4,85 \cdot 10^8$
	УЗПП	$1,27 \cdot 10^8$	$1,56 \cdot 10^8$	$2,74 \cdot 10^8$	$4,87 \cdot 10^8$
Пружні переміщення, мм	УЗПО	0,011	0,014	0,019	0,024
	УЗПП	0,013	0,016	0,028	0,03

## 8.2. Верстатні пристрої для установлення валів

Базування деталей типу тіл обертання у ВП на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах, як правило, здійснюється по зовнішніх циліндричних поверхнях і торцю, що відповідає подвійній напрямній та опорній базам. Для реалізації цієї схеми базування застосовуються різні конструкції призм, які можуть бути з кутами  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $120^\circ$ . Перевагою призм перед іншими установлювальними елементами є те, що вісь заготовки збігається з площиною симетрії призми. Найчастіше у ВП використовуються призми з кутом  $\alpha = 90^\circ$ , у яких забезпечується найкраща усталеність заготовки (порівняно з призмами з кутом  $\alpha = 120^\circ$ ) та ширший діапазон діаметрів установлювальних заготовок (порівняно з призмами з кутом  $\alpha = 60^\circ$ ).

При базуванні вала його центр може займати різні положення у площині симетрії призми через коливання зовнішнього діаметра у межах допуску на розмір заготовки. У зв'язку з цим при установленні заготовки у призму з'являється похибка базування.

Базування заготовки у ВП є одним із найважливіших етапів операції, що істотно впливає на точність обробки. Похибкою базування  $\varepsilon_\phi$  називають відхилення фактично досягнутого положення заготовки при базуванні від необхідного. Похибка базування – це відстань між граничними положеннями проєкцій вимірювальної бази на напрямок виконуваного розміру. Вона виникає у разі незбігання вимірювальної і технологічної баз. У зв'язку з цим положення вимірювальних баз різних заготовок у партії при базуванні буде різним відносно оброблюваної поверхні. У загальному випадку похибка базування визначається за алгоритмом, наведеним на рис. 8.11. Як правило, на кресленнях задають розміри оброблюваних поверхонь від різних баз. Наприклад, однією з найпоширеніших схем базування валів у призмах при обробці лисок на фрезерних верстатах є схема, наведена на рис. 8.12.



Рис. 8.11. Алгоритм визначення похибки базування

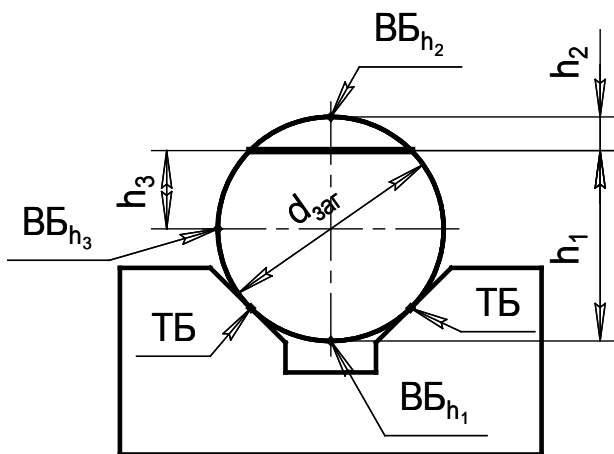


Рис. 8.12. Схема базування вала для обробки лиски на валу

Так, можуть бути задані такі розміри:  $h_1$  – від нижньої твірної вала до оброблюваної поверхні;  $h_2$  – від верхньої твірної вала до оброблюваної поверхні;  $h_3$  – від осі вала до



оброблюваної поверхні. Особливістю базування валів у призмах є те, що вимірювальні бази для розмірів, які розглядаються, не збігаються з технологічною базою. Отже, виникає похибка базування  $\varepsilon_{\delta}$ . Технологічна база при базуванні валів у призмах відповідає точкам дотику заготовки з призмою (точки ТБ), а вимірювальні бази для розмірів  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  знаходяться у точках ВБ<sub>h1</sub>, ВБ<sub>h2</sub>, ВБ<sub>h3</sub> відповідно.

Величина похибки базування вала  $\varepsilon_{\delta}$  для різних варіантів призначення розмірів відрізняється за величиною і залежить від допуску на базовий діаметр заготовки  $Td$  та кута призми  $\alpha$ . Похибки базування валів для розмірів  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  розраховуються за відповідними формулами [49]:

$$\varepsilon_{\delta_{h_1}} = \frac{Td}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right); \quad \varepsilon_{\delta_{h_2}} = \frac{Td}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right); \quad \varepsilon_{\delta_{h_3}} = \frac{Td}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Аналіз наведених формул показав, що при установленні у призми валів, базові поверхні яких виконано за однаковим квалітетом точності, величина похибки базування збільшується зі збільшенням діаметра базових поверхонь заготовок та зменшенням кута призми  $\alpha$ . У табл. 8.3 наведено числові значення похибок базування валів у призмах з кутами  $\alpha = 60^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $120^\circ$  для розмірів  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  для діапазону діаметрів заготовок  $d_{\text{зар}} = 18\text{--}120$  мм із точністю обробки базових поверхонь за квалітетом ІТ9. Як бачимо, найменша похибка базування спостерігається при дотриманні розміру  $h_1$ , найбільша – для розміру  $h_2$ . Отже, під час проектування виробів для зменшення похибки базування доцільно призначати саме розмір  $h_1$ . Результати розрахунків показали, що найменша похибка базування спостерігається для розміру  $h_1$  при установленні заготовок з діаметрами  $d_{\text{зар}} = 18\text{--}30$  мм у призмах із кутом  $\alpha = 120^\circ$  (рис. 8.13 а).

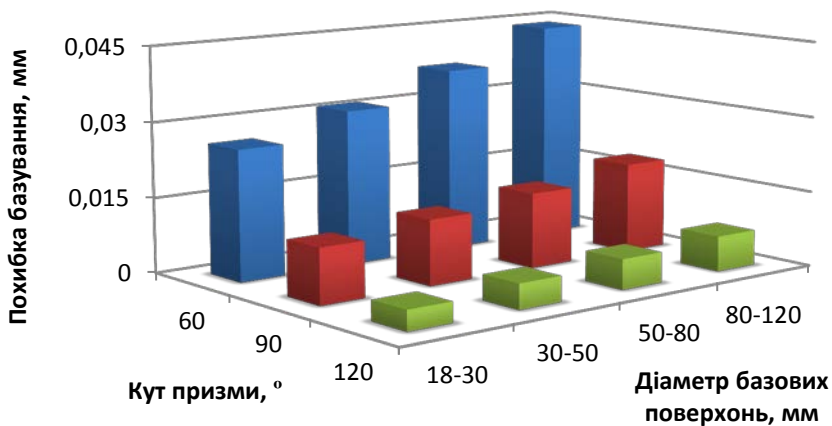
Таблиця 8.3

## Похибки базування валів у призмах

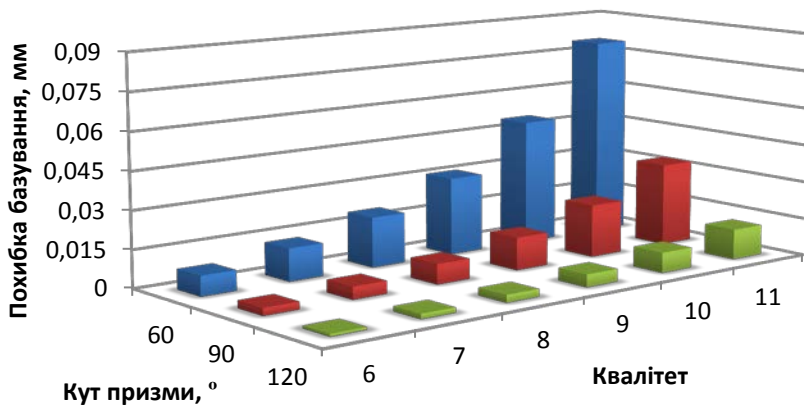
Діапазон діаметрів заготовок, мм	Похибка базування вала $\varepsilon_{\sigma}$ , мм, при величині кута призми $\alpha$ , °		
	60	90	120
для розміру $h_1$			
18–30	0,026	0,011	0,004
30–50	0,031	0,013	0,005
50–80	0,037	0,015	0,006
80–120	0,044	0,018	0,007
для розміру $h_2$			
18–30	0,078	0,063	0,056
30–50	0,093	0,075	0,067
50–80	0,111	0,089	0,080
80–120	0,131	0,105	0,094
для розміру $h_3$			
18–30	0,052	0,037	0,030
30–50	0,062	0,044	0,036
50–80	0,074	0,052	0,043
80–120	0,087	0,062	0,050

При установленні у призму заготовок однакового діаметра з базовими поверхнями, виконаними за різними квалітетами точності, спостерігається збільшення величини похибки базування при збільшенні квалітета й зменшенні величини кута призми  $\alpha$  (рис. 8.13 б). У табл. 8.4 наведено числові значення похибок базування валів для призм з кутами  $\alpha = 60^\circ; 90^\circ; 120^\circ$  для розмірів  $h_1, h_2, h_3$  для діапазону діаметрів базових поверхонь заготовок  $d_{\text{заг}} = 30\text{--}50$  мм, оброблених за квалітетами точності IT6–IT11.

Для установлення валів діаметрами 5–150 мм на свердлильних та фрезерних верстатах необхідно мати комплект з 10 типорозмірів стандартних жорстких опорних призм. Кожен типорозмір призми дозволяє базування валів у невеликому діапазоні діаметрів, який у середньому становить 10–15 мм.



а)



б)

Рис. 8.13. Діаграми залежності похибок базування валів для розміру  $h_1$  від кута призми  $\alpha$ : а – та діаметра базових поверхонь заготовок; б – та квалітета базових поверхонь

Таблиця 8.4

## Похибки базування валів у призмах

Квалітет точності базових поверхонь заготовки	Похибка базування вала $\varepsilon_\delta$ , мм, при величині кута призми $\alpha$ , °		
	60	90	120
для розміру $h_1$			
IT6	0,008	0,003	0,001
IT7	0,013	0,005	0,002
IT8	0,020	0,008	0,003
IT9	0,031	0,013	0,005
IT10	0,050	0,021	0,008
IT11	0,080	0,033	0,012
для розміру $h_2$			
IT6	0,024	0,019	0,017
IT7	0,038	0,030	0,027
IT8	0,059	0,047	0,042
IT9	0,093	0,075	0,067
IT10	0,150	0,121	0,108
IT11	0,240	0,193	0,172
для розміру $h_3$			
IT6	0,016	0,011	0,009
IT7	0,025	0,018	0,014
IT8	0,039	0,028	0,023
IT9	0,062	0,044	0,036
IT10	0,100	0,071	0,058
IT11	0,160	0,113	0,092

При установленні валів іншого типорозміру необхідно забезпечити паралельність осі заготовки до площини робочого стола верстата, що досягається ручним перекомпонуванням призм із використанням комплекту підкладок та прокладок. Це призводить до значних витрат підготовчо-заключного часу на переналагодження.

Метою проектування запропонованої базуючої призми є підвищення ступеня гнучкості конструкції шляхом збільшення діапазону діаметрів заготовок, що підлягають установленню. Новизною запропонованої конструкції базуючої призми є те, що вісь повороту опорних дисків зміщено на величину ексцентриситету відносно осі дисків [62].

Така властивість конструкції базуючої призми забезпечує ширший діапазон діаметрів заготовок порівняно зі стандартною жорсткою опорною призмою.

Відомо, що у машинобудуванні найбільш поширені ступінчасті вали у діапазоні діаметрів 30–80 мм, які становлять понад 85% від загальної кількості типорозмірів валів. Отже, доцільним є розроблення конструкції базуючої призми для установлення заготовок саме цього діапазону діаметрів. Для обробки таких валів доцільно використання верстатів з шириною робочих столів 250–400 мм.

Граничні значення діаметрів установлюваних заготовок залежать від таких параметрів: радіуса опорних дисків  $R$ ; величини ексцентриситету  $e$ , на яку зміщено вісь повороту опорного диска від його центра; відстані між осями повороту опорних дисків  $L$  (рис. 8.14).

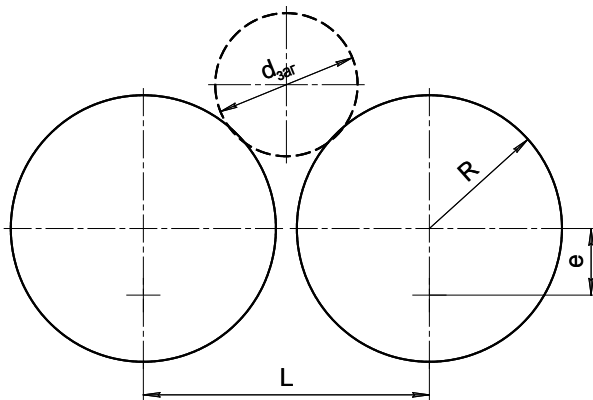


Рис. 8.14. Схема визначення основних параметрів базуючої призми, що впливають на величину діапазону діаметрів установлюваних валів

Параметри зубчастої передачі на діапазон діаметрів валів впливають посередньо, оскільки для проектування базуючої призми достатньо мати інформацію щодо розміщення осей опорних дисків. Інші параметри (передаточне відношення, міжцентрова відстань, діаметри зубчастих коліс тощо) призначаються виключно з конструктивних міркувань.

Виходячи з того, що ширина призми не повинна перевищувати ширину робочого стола верстата, доцільно встановити граничну ширину базуючої призми величиною 250 мм. При такому обмеженні радіус опорних дисків відповідатиме величині, яка знаходиться у діапазоні 20–40 мм.

Установлено, що найменша величина ексцентриситету, яка забезпечує розширення діапазону діаметрів валів, відповідає величині  $R/4$ . Для попередження скручування вала під дією зовнішнього навантаження збільшувати величину ексцентриситету більш ніж  $R/2$  не рекомендується. Отже, для визначення впливу ексцентриситету на діапазон діаметрів заготовок беремо такі величини ексцентриситету:  $e_1 = R/4$  та  $e_2 = R/2$ .

Відстань між осями повороту опорних дисків також впливає на величину діапазону діаметрів заготовок. Найменша відстань, яку можливо забезпечити, відповідає випадку, коли опорні диски дотикаються один одного, і дорівнює  $L = 2 \cdot R$ . Враховуючи задане технічне обмеження на ширину призми, максимальна відстань дорівнюватиме  $L = 3 \cdot R$ .

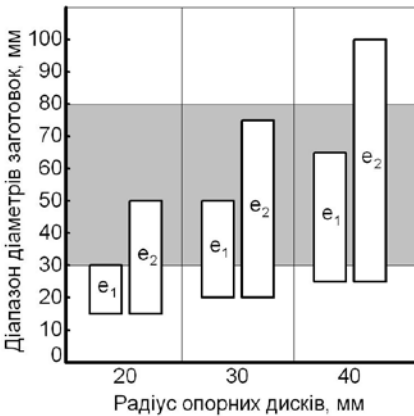
Проведений аналіз показав (табл. 8.5), що найбільший діапазон діаметрів установлюваних заготовок відповідає двом конструкціям базуючих призм: із радіусом опорних дисків  $R = 40$  мм та величиною ексцентриситету  $e = R/2$  і дорівнює 75 мм (рис. 8.15 а) та 80 мм (рис. 8.15 б) для конструкцій з відстанню між осями повороту опорних дисків  $L = 2 \cdot R$  та  $L = 3 \cdot R$  відповідно. Причому в першому випадку технологічні можливості запропонованої конструкції дозволяють повністю перекрити найпоширеніший діапазон діаметрів валів (див. рис. 8.15 а – виділено сірим кольором).

Як бачимо на рис. 8.15 б, збільшення відстані між осями повороту опорних дисків до величини  $L = 3 \cdot R$  дозволяє здійснювати базування заготовок з діаметрами 80–160 мм.

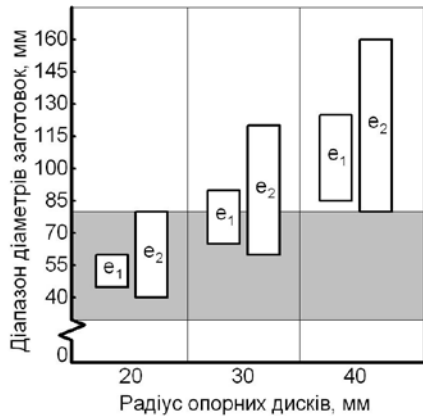
Таблиця 8.5

Діапазони діаметрів валів при установленні у базуючу призму

Величина ексцентриситету $e$ , мм	Діапазони діаметрів валів при радіусі опорних дисків $R$ , мм		
	20	30	40
при $L = 2 \cdot R$			
$R/4$	15–30	20–50	25–65
$R/2$	15–50	20–75	25–100
при $L = 3 \cdot R$			
$R/4$	45–60	65–90	85–125
$R/2$	40–80	60–120	80–160



а)



б)

Рис. 8.15. Діапазони діаметрів валів при установленні у базуючу призму залежно від радіуса опорних дисків та величини ексцентриситету  $e_1 = R/4$  та  $e_2 = R/2$  при відстані між осями повороту дисків: а –  $L = 2 \cdot R$ ; б –  $L = 3 \cdot R$

Отже, можна стверджувати, що конструкція базуючої призми з радіусом опорних дисків  $R = 40$  мм, величиною

ексцентриситету  $e = R/2$  та відстанню  $L = 2 \cdot R$  є найвигіднішою порівняно з іншими базуючими призмами, що розглядалися.

Аналіз технологічних можливостей комплексу стандартних жорстких опорних призм порівняно із запропонованою базуючою призмою показав, що остання забезпечує установа валів у діапазоні діаметрів 25–100 мм та дозволяє замінити 5 типорозмірів стандартних жорстких опорних призм, а саме типорозміри 5–9 (рис. 8.16).



Рис. 8.16. Типорозміри базуючих модулів: 1–10 – стандартні жорсткі опорні призми; 11, 12 – запропоновані базуючі призми

Для установа валів, які не входять у визначений діапазон діаметрів, можна застосовувати стандартні жорсткі опорні призми (типорозміри 1–4, 10) або базуючу призму з відстанню між осями повороту опорних дисків  $L = 3 \cdot R$  (див. рис. 8.16, поз. 12), яка дозволяє замінити типорозміри 9 та 10 стандартних жорстких опорних призм і забезпечує скорочення витрат часу на переналагодження. Для визначення похибок базування заготовок у компонованнях запропонованої системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв як приклад розглянуто базування валів у розробленій конструкції базуючої



призми з радіусом опорних дисків  $R = 40$  мм, величиною ексцентриситету  $e = R/2$  та відстанню  $L = 2 \cdot R$ .

Положення опорних дисків навколо осі повороту (вісь 1) визначається величиною  $\gamma$  – кутом повороту опорного диска, який відповідає куту між осями заготовки (вісь 2) та опорного диска (вісь 3) (рис. 8.17). Необхідно зауважити, що осі 1 та 2 мають незмінне положення одна відносно одної та конструкції базуючої призми, а вісь 3 – змінює своє положення при переналагодженні на інший типорозмір заготовок та визначає кут повороту опорного диска.

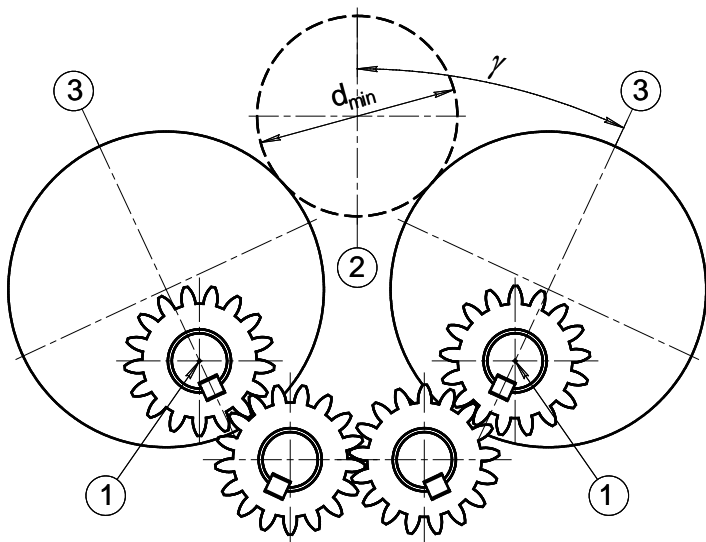


Рис. 8.17. Визначення кута повороту опорного диска  $\gamma$ :  
 1 – вісь повороту опорного диска; 2 – вісь заготовки;  
 3 – вісь опорного диска

Граничні значення величини кута  $\gamma$  визначаються особливостями конструкції базуючої призми. При положенні опорних дисків, коли їх осі 3 паралельні осі заготовки 2, тобто кут  $\gamma = 0^\circ$ , опорні диски дотикаються у точці А (рис. 8.18 а). У цьому положенні забезпечується установа заготовки з мінімально можливим діаметром  $d_{\min}$  відповідно до технічної характеристики конструкції базуючої призми.

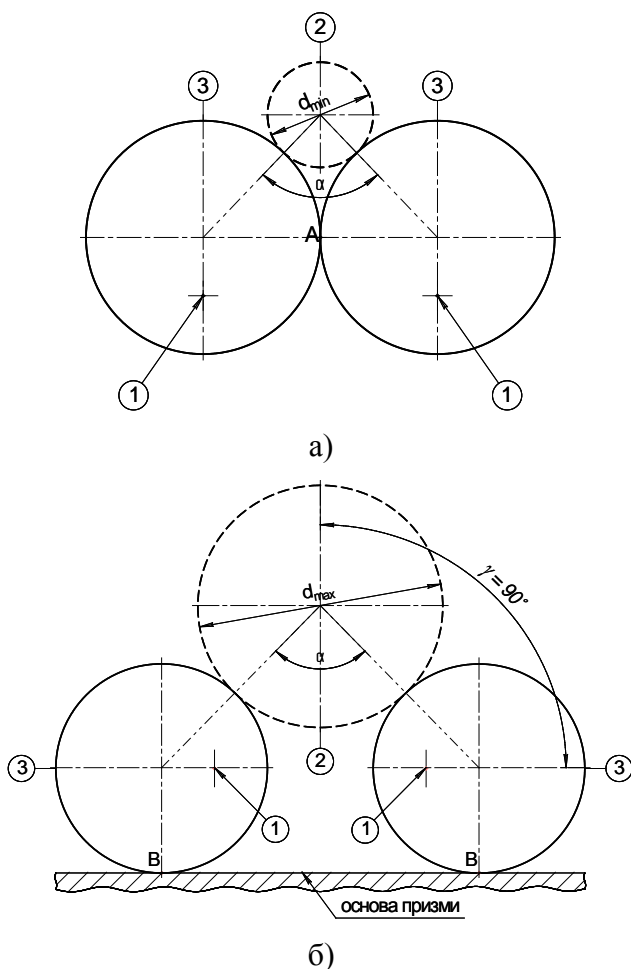


Рис. 8.18. Граничні положення опорних дисків базуючої призми:  
а – при куті  $\gamma = 0^\circ$ ; б – при куті  $\gamma = 90^\circ$

При базуванні заготовка встановлюється таким чином, що кут  $\alpha$  між точками заготовки, якими вона дотикається опорних дисків, дорівнює  $90^\circ$  і залишається сталим при повороті опорних дисків на будь-яку величину. Інше граничне положення опорного диска відповідає положенню, коли осі опорного диска перпендикулярні до осі заготовки, тобто кут  $\gamma = 90^\circ$ . При цьому положенні опорні диски дотикаються з основою призми у точці В (рис. 8.18 б), що забезпечує встановлення заготовки з



базуванні заготовки технологічна база для максимального та мінімального діаметрів заготовок знаходиться на твірній вала у точках Т та Т<sub>1</sub> відповідно, а вимірювальні бази, наприклад, при дотриманні розміру h<sub>1</sub> відповідають точкам В та В<sub>1</sub>. Відстань між ними є похибкою базування для розміру h<sub>1</sub>.

Таким чином, похибку базування для розміру h<sub>1</sub> можна визначити зі співвідношення

$$\varepsilon_{\delta_{h_1}} = OB - O_1B_1 - OO_1.$$

Ураховуючи, що  $OB = \frac{d_{\max}}{2}$ ;  $O_1B_1 = \frac{d_{\min}}{2}$ , а

$\frac{d_{\max}}{2} - \frac{d_{\min}}{2} = \frac{Td}{2}$ , то вищенаведена формулу можна записати у вигляді

$$\varepsilon_{\delta_{h_1}} = \frac{Td}{2} - OO_1,$$

де  $OO_1$  – зміщення осі центрів вала внаслідок різниці діаметрів заготовок в оброблюваній партії.

Величина  $OO_1$  визначається із розгляду двох прямокутних трикутників  $OFD$  та  $O_1FD$ :

$$OO_1 = OF - O_1F = \sqrt{OD^2 - FD^2} - \sqrt{O_1D^2 - FD^2}.$$

Величина  $OD$  визначається з геометричних співвідношень  $OD = OT + TD$ . Як бачимо зі схеми  $OT = \frac{d_{\max}}{2}$ ,

$\frac{d_{\max}}{2} = \frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2}$ , а  $TD = R$ . Таким чином,  $OD = \frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2} + R$ .

Аналогічно визначається величина  $O_1D$ :

$$O_1D = O_1T_1 + T_1D = \frac{d_{\min}}{2} + R.$$

Складова  $FD$  визначається за формулою  $FD = FK + KD$ . Відрізок  $OF$  з прямокутного трикутника  $OFD$  збігається з віссю

заготовки і становить лінію симетрії базуючої призми, отже,  
 $FK = \frac{L}{2}$ , де  $L$  – відстань між осями повороту опорних дисків.

Величину  $KD$  розраховують за залежністю  $KD = e \cdot \sin \gamma$ , де  $e$  – величина ексцентриситету, на яку зміщено вісь повороту опорного диска;  $\gamma$  – кут повороту опорного диска. Після підстановки всіх складових для визначення величини  $OO_1$  формула має вигляд

$$OO_1 = \sqrt{\left(\frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2}.$$

Отже, залежність для визначення похибки базування для розміру  $h_1$  має вигляд

$$\varepsilon_{\delta_{h_1}} = \frac{Td}{2} - \sqrt{\left(\frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2}.$$

Похибка базування для розміру  $h_2$  визначається за залежністю

$$\varepsilon_{\delta_{h_2}} = \frac{Td}{2} + \sqrt{\left(\frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2}.$$

Похибка базування для розміру  $h_3$  дорівнює величині  $OO_1$ , а отже, визначається за формулою

$$\varepsilon_{\delta_{h_3}} = OO_1 = \sqrt{\left(\frac{Td}{2} + \frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d_{\min}}{2} + R\right)^2 - \left(\frac{L}{2} + e \cdot \sin \gamma\right)^2}$$

Дослідження показали, що для валів із базовими поверхнями однакового діаметра похибка базування збільшується при збільшенні квалітета точності базових поверхонь заготовки, тобто при збільшенні величини поля допуску (табл. 8.6).

Отже, наприклад, при установленні валів діаметром 30 мм, найменшою буде похибка базування для заготовок з базовими поверхнями, обробленими за шостим квалітетом точності, й дорівнюватиме 0,003–0,019 мм залежно від заданого конструктором розміру (рис. 8.20).

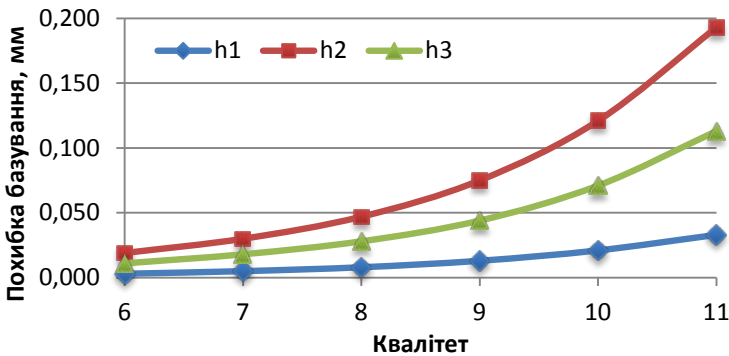


Рис. 8.20. Залежність похибки базування від квалітета точності базових поверхонь заготовок

Таким чином, при установленні у базуючій призмі валів діаметром 30 мм, базові поверхні яких оброблені за квалітетами IT6–IT11, похибка базування для розміру  $h_1$  знаходиться у межах 0,003–0,033 мм, для розміру  $h_2$  – 0,019–0,193 мм, для розміру  $h_3$  – 0,011–0,113 мм.

Таблиця 8.6

## Похибки базування валів у базуючій призмі

Квалітет точності базових поверхонь заготовки	Похибка базування вала $\varepsilon_\delta$ , мм, при величині кута призми $\gamma$ , °		
	0	45	90
для розміру $h_1$			
IT6	0,003	0,005	0,006
IT7	0,005	0,008	0,009
IT8	0,008	0,013	0,015
IT9	0,013	0,020	0,022
IT10	0,021	0,033	0,037
IT11	0,033	0,052	0,060
для розміру $h_2$			
IT6	0,019	0,024	0,027
IT7	0,030	0,038	0,042
IT8	0,047	0,059	0,065
IT9	0,075	0,094	0,105
IT10	0,121	0,153	0,169
IT11	0,193	0,242	0,266
для розміру $h_3$			
IT6	0,011	0,015	0,016
IT7	0,018	0,023	0,025
IT8	0,028	0,036	0,038
IT9	0,044	0,057	0,062
IT10	0,071	0,093	0,099
IT11	0,113	0,147	0,156

Під час дослідження впливу кута повороту опорного диска на похибку базування встановлено, що при збільшенні кута  $\gamma$  похибка базування збільшується. На рис. 8.21 наведено залежність похибки базування заготовки від кута повороту опорного диска для розміру  $h_1$  для валів із базовими поверхнями, обробленими за квалітетами точності IT6–IT11.

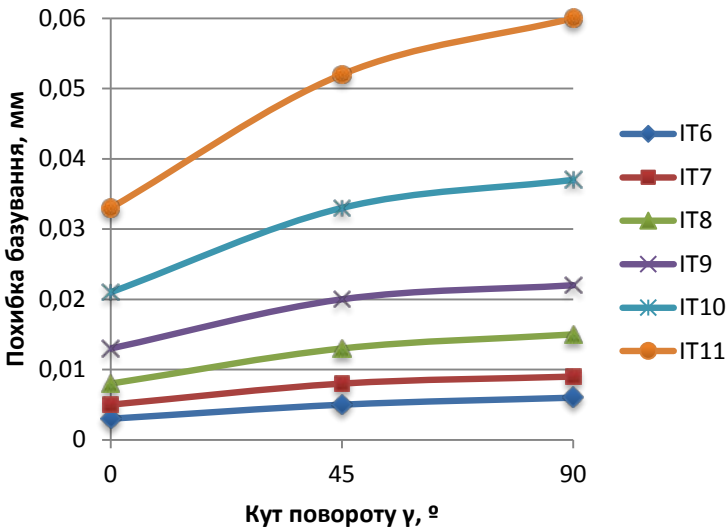


Рис. 8.21. Залежність похибки базування від кута повороту опорних дисків  $\gamma$

Результати аналітичних розрахунків похибок базування за розробленими математичними залежностями показали, що при базуванні валів діаметрами 30–100 мм з базовими поверхнями, обробленими за квалітетами IT6–IT11, похибка базування знаходиться у межах 0,003–0,06 мм для розміру  $h_1$ , 0,019–0,266 мм для розміру  $h_2$  та 0,011–0,156 мм для розміру  $h_3$ .

Розрахунки за теорією розмірних ланцюгів [77] дозволяють визначити похибки базування валів у призмах залежно від точності виготовлення установлювальних елементів, які забезпечують переналагодження при переході до установлення заготовки іншого типорозміру.

Розглянемо розмірні ланцюги компонувань ВП для випадку установлення вала по зовнішніх циліндричних поверхнях із діаметрами 30–50 мм з допуском  $Td = 160$  мкм.

Для базуючої призми визначили ланки, які впливають на точність встановлення вала, і призначили допуски на виготовлення всіх елементів, що входять до розмірного ланцюга. Розмірний ланцюг складається з 11 ланок, які



враховують коливання діаметрів вала у партії, зазори між спряженими деталями, а також бокові зазори у зубчастій передачі (рис. 8.22).

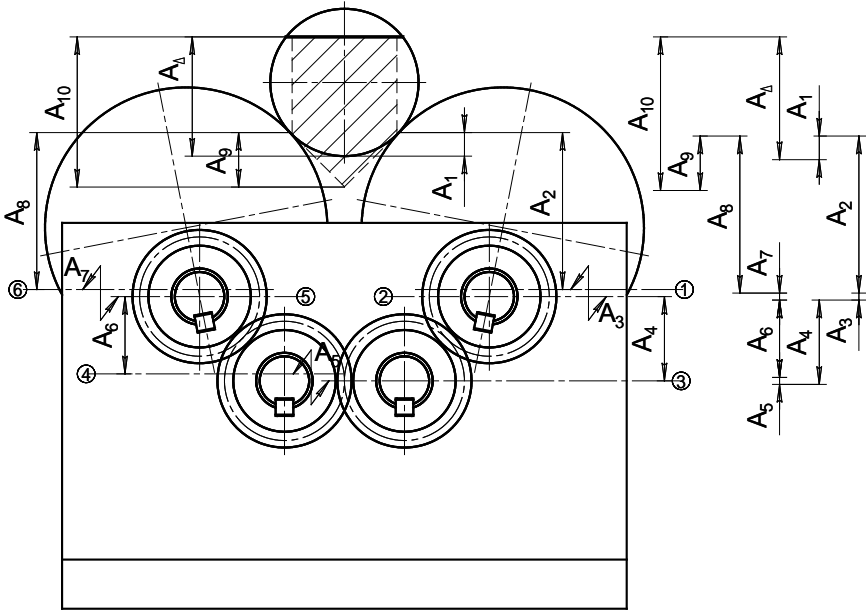


Рис. 8.22. Базуюча призма (патент України № 31416) і розмірний ланцюг для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски, паралельної до робочої поверхні стола верстата

Допуски на ланки розмірного ланцюга призначаємо відповідно до робочих креслень деталей базуючої призми та їх геометричних співвідношень, а також допусків на зубчасті передачі (табл. 8.7).

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$ , визначений за методом максимуму-мінімуму, розраховуємо за формулою

$$TA_{\Delta} = TA_1 + TA_2 + TA_3 + TA_4 + TA_5 + TA_6 + TA_7 + TA_8 + TA_9 + TA_{10};$$

$$TA_{\Delta} = 24 + 17 + 29 + 23 + 30 + 23 + 29 + 17 + 11 + 10 = 213 \text{ мкм.}$$

Розрахунок допуску замикальної ланки  $TA_{\Delta}$ , визначений за ймовірнісним методом, виконуємо за формулою

$$TA_{\Delta} = \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2 + TA_3^2 + TA_4^2 + TA_5^2 + TA_6^2 + TA_7^2 + TA_8^2 + TA_9^2 + TA_{10}^2};$$

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 17^2 + 29^2 + 23^2 + 30^2 + 23^2 + 29^2 + 17^2 + 11^2 + 10^2} = 70.$$

Аналогічно виконується розрахунок похибки базування вала для випадку фрезерування лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата (рис. 8.23). Величини допусків на розмірні ланки наведені у табл. 8.8.

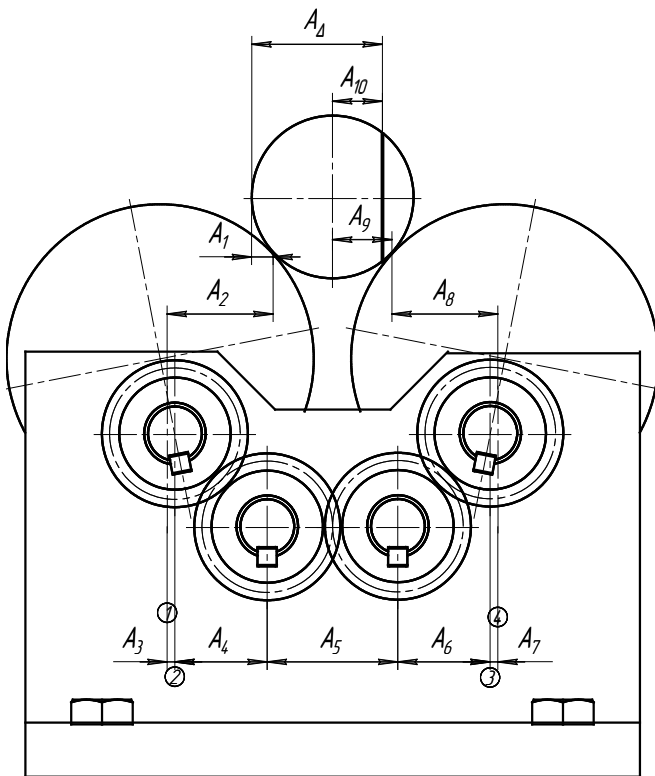


Рис. 8.23. Базуюча призма (патент України № 31416) і розмірний ланцюг для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата

Таблиця 8.7

Допуски на ланки розмірного ланцюга базуючої призми  
(при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата)

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ),$ де $Td_{заг}$ – допуск на діаметр заготовки
TA <sub>2</sub>	17	Допуск на розмір між технологічною базою заготовки і віссю обертання опорного диска (вісь 1)	$TA_2 = \frac{Td_{диска}}{2} \cdot \cos 45^\circ + Te \cdot \sin \gamma,$ де $e$ – ексцентриситет; $\gamma$ – кут повороту диска
TA <sub>3</sub>	29	Можливий максимальний зазор між осями вала й отвору у кутнику (осі 1 і 2 відповідно)	Відповідно до креслень вала і кутника
TA <sub>4</sub>	23	Допуск на боковий зазор $j_{n \min}$ між парою зубчастих коліс із урахуванням косинуса кута, під яким розміщені колеса	$TA_4 = j_{n \min} \cdot \cos 45^\circ$ відповідно до ГОСТ 1643-81

Продовження табл. 8.7

1	2	3	4
TA <sub>5</sub>	30	Можливий максимальний зазор між осями отворів у кутнику (осі 3 і 4)	Відповідно до креслення кутника
TA <sub>6</sub>	23	Допуск на боковий зазор $j_{n \min}$ між парою зубчастих коліс із урахуванням косинуса кута, під яким розміщені колеса	$TA_6 = j_{n \min} \cdot \cos 45^\circ$ відповідно до ГОСТ 1643-81
TA <sub>7</sub>	29	Можливий максимальний зазор між осями отвору у кутнику і вала (осі 5 і 6 відповідно)	Відповідно до креслень вала і кутника
TA <sub>8</sub>	17	Допуск на розмір між віссю обертання опорного диска (вісь 6) і технологічною базою заготовки	$TA_8 = \frac{Td_{\text{диска}}}{2} \cdot \cos 45^\circ +$ $+ Te \cdot \sin \gamma$
TA <sub>9</sub>	11	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
TA <sub>10</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Таблиця 8.8

Допуски на ланки розмірного ланцюга базуючої призми  
(при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата)

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	3	Допуск на розмір між технологічною базою заготовки і віссю обертання опорного диска (вісь 1)	$TA_2 = Te \cdot \sin \gamma - \frac{Td_{диска}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
TA <sub>3</sub>	29	Можливий максимальний зазор між осями вала й отвору в кутнику (осі 1 і 2 відповідно)	Відповідно до креслень вала та кутника
TA <sub>4</sub>	23	Допуск на боковий зазор $j_{n\min}$ між парою зубчастих коліс із урахуванням синуса кута, під яким розміщені колеса	$TA_4 = j_{n\min} \cdot \sin 45^\circ$ відповідно до ГОСТ 1643-81
TA <sub>5</sub>	32	Допуск на боковий зазор $j_{n\min}$ між парою зубчастих коліс	$TA_5 = j_{n\min}$ відповідно до ГОСТ 1643-81

Продовження табл. 8.8

1	2	3	4
ТА <sub>6</sub>	23	Гарантований боковий зазор $j_{n\min}$ між парою зубчастих коліс із урахуванням синуса кута, під яким розміщені колеса	$TA_6 = j_{n\min} \cdot \sin 45^\circ$ відповідно до ГОСТ 1643-81
ТА <sub>7</sub>	29	Можливий максимальний зазор між осями отвору в кутнику і вала (осі 3 і 4 відповідно)	Відповідно до креслень вала та кутника
ТА <sub>8</sub>	3	Допуск на розмір між віссю обертання опорного диска (вісь 4) і технологічною базою заготовки	$TA_8 = Te \cdot \gamma -$ $-\frac{Td_{\text{диска}}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
ТА <sub>9</sub>	11	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
ТА <sub>10</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$ , визначений за методом максимуму-мінімуму, дорівнює

$$TA_{\Delta} = 24 + 3 + 29 + 23 + 32 + 23 + 29 + 3 + 11 + 10 = 187 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$ , визначений за ймовірнісним методом, дорівнює

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 3^2 + 29^2 + 23^2 + 32^2 + 23^2 + 29^2 + 3^2 + 11^2 + 10^2} = 67.$$

На рис. 8.24 наведено жорстку опорну призму і розмірний ланцюг для визначення похибки базування при фрезеруванні лиски. Розмірний ланцюг складається із чотирьох ланок, які враховують коливання діаметрів вала у партії заготовок і допуск на виготовлення еталону.

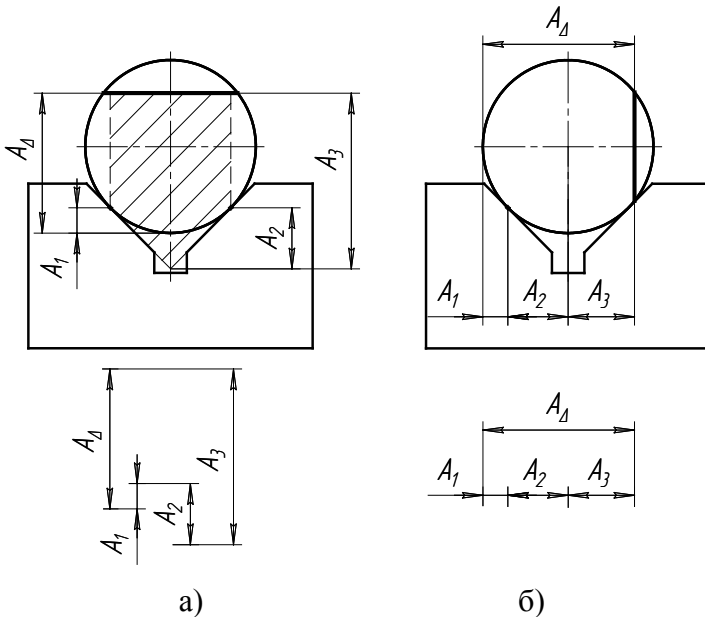


Рис. 8.24. Жорстка опорна призма і розмірні ланцюги для визначення похибки базування при фрезеруванні лиски:

- а – паралельної робочій поверхні стола верстата;
- б – перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата

Виконаємо розрахунки розмірних ланцюгів за методом максимуму-мінімуму та ймовірнісним. Допуски на складові ланки наведено у табл. 8.9.

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата (рис. 8.24 а), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 11 + 10 = 45 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 11^2 + 10^2} = 28 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата (рис. 8.24 б) визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 11 + 10 = 45 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 11^2 + 10^2} = 28 \text{ мкм.}$$

Аналогічно виконується розрахунок похибки базування вала у призмі з опорами, що регулюються незалежно (рис. 8.25). Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 8.10.

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата (рис. 8.25 а), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 78 + 30 + 78 + 11 + 10 = 231 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:



Таблиця 8.9

## Допуски на ланки розмірного ланцюга жорсткої опорної призми

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
При фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$ , де $Td_{заг}$ – допуск на діаметр заготовки
TA <sub>2</sub>	11	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
TA <sub>3</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту
При фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	11	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів

Таблиця 8.10

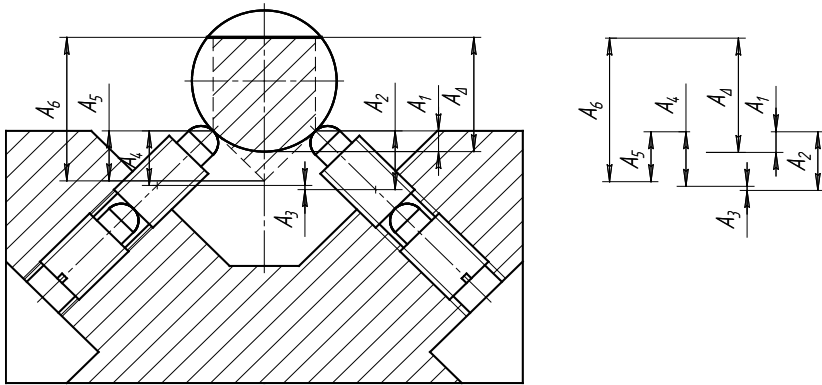
Допуски на ланки розмірного ланцюга призми з опорами, що регулюються незалежно

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	10	Допуск на розмір опори з урахуванням косинуса кута, під яким встановлено опору	$TA_2 = TL \cdot \cos 45^\circ$ , де $L$ – розмір конструктивного елемента опори
TA <sub>3</sub>	30	Допуск на симетричність отворів відносно осі призми	Відповідно до креслення призми
TA <sub>4</sub>	10	Допуск на розмір опори з урахуванням косинуса кута, під яким встановлено опору	$TA_4 = TL \cdot \cos 45^\circ$
TA <sub>5</sub>	11	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів

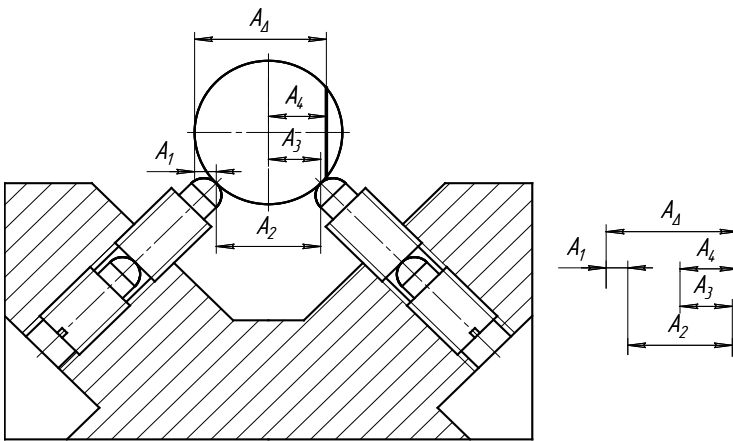
Продовження табл. 8.10

1	2	3	4
ТА <sub>6</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту
При фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата			
ТА <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
ТА <sub>2</sub>	13	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
ТА <sub>3</sub>	56	Допуск на розмір між технологічною базою і віссю заготовки	$TA_3 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
ТА <sub>4</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 78^2 + 30^2 + 78^2 + 11^2 + 10^2} = 118 \text{ мкм.}$$



а)



б)

Рис. 8.25. Призма з опорами, що регулюються незалежно і розмірні ланцюги для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски: а – паралельної робочій поверхні стола верстата; б – перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата (рис. 8.25 б), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 13 + 56 + 10 = 103 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 13^2 + 56^2 + 10^2} = 63 \text{ мкм.}$$

Визначимо величину похибки базування вала у призмі, що регулюється (рис. 8.26) [61]. Вихідні дані для розрахунку призначаємо згідно з конструкцією призми та геометричними співвідношеннями її елементів (табл. 8.11).

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезерування лиски, паралельної до робочої поверхні стола верстата (рис. 8.26 а), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 78 + 30 + 10 + 10 = 152 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

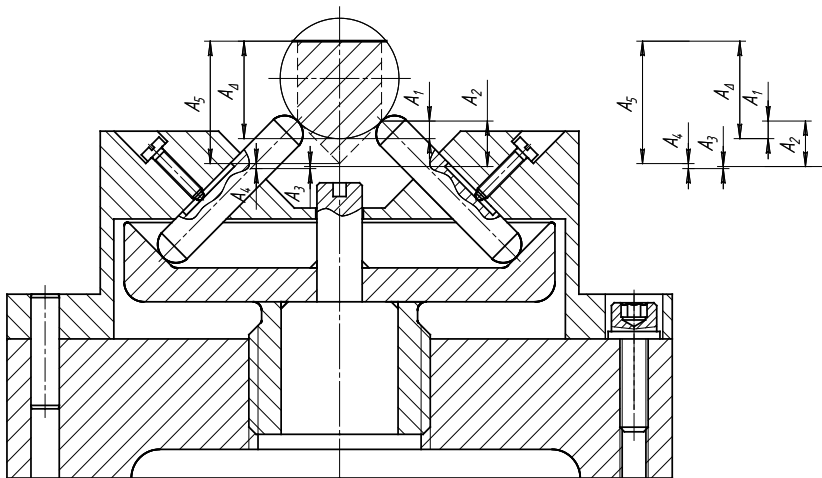
$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 78^2 + 30^2 + 10^2 + 10^2} = 88 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата (рис. 8.26 б), визначений за методом максимуму-мінімуму:

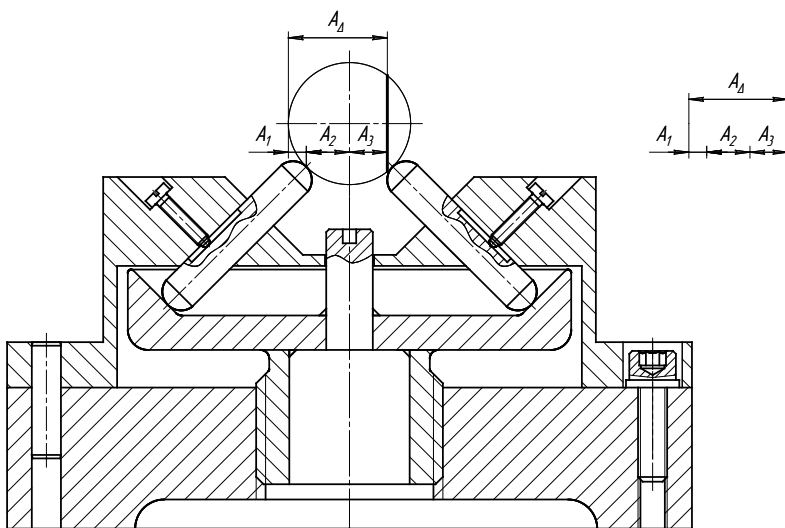
$$TA_{\Delta} = 24 + 56 + 10 = 90 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 56^2 + 10^2} = 62 \text{ мкм.}$$



а)



б)

Рис. 8.26. Призма, що регулюється (патент України № 29823) і розмірні ланцюги для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски: а – паралельної робочій поверхні стола верстата; б – перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата

Таблиця 8.11

Допуски на ланки розмірного ланцюга призми, що регулюється

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата			
$TA_1$	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
$TA_2$	78	Допуск на розмір опори з урахуванням косинуса кута, під яким встановлено опору	$TA_2 = TL \cdot \sin 45^\circ$ , де $L$ – розмір опори
$TA_3$	30	Допуск на симетричність отворів відносно осі призми	Відповідно до креслення призми
$TA_4$	10	Допуск на розмір між опорою і еталонном	Відповідно до складального креслення
$TA_5$	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Продовження табл. 8.11

1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата			
$TA_1$	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг.}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
$TA_2$	56	Допуск на розмір між технологічною базою і віссю заготовки	$TA_2 = \frac{Td_{заг.}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
$TA_3$	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту



Розмірний ланцюг призми, що входить до комплексу ЗРП, наведено на рис. 8.27, а вихідні дані для його розрахунку в табл. 8.12.

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата (рис. 8.27 а), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 30 + 25 + 30 + 10 = 119 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 30^2 + 25^2 + 30^2 + 10^2} = 56 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата (рис. 8.27 б), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 13 + 56 + 10 = 103 \text{ мкм.}$$

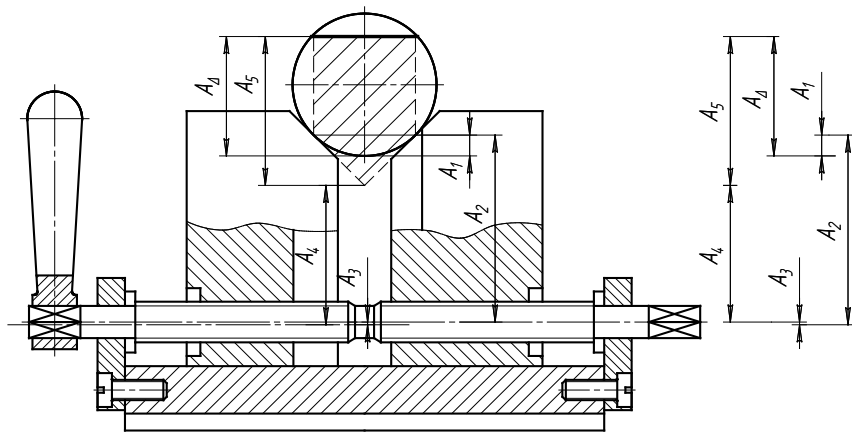
Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 13^2 + 56^2 + 10^2} = 63 \text{ мкм.}$$

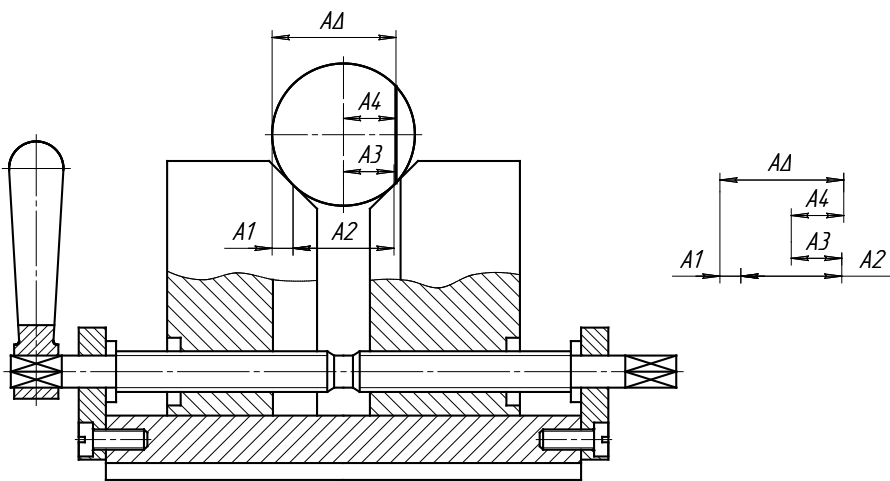
Конструкція машинних спеціалізованих лещат із призматичними губками наведена на рис. 8.28. Механізмом регулювання двох напівпризм є зубчато-рейкова передача. Вихідні дані для розрахунку розмірного ланцюга наведені в табл. 8.13.

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата (рис. 8.28 а), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 46 + 35 + 35 + 12 + 10 = 162 \text{ мкм.}$$

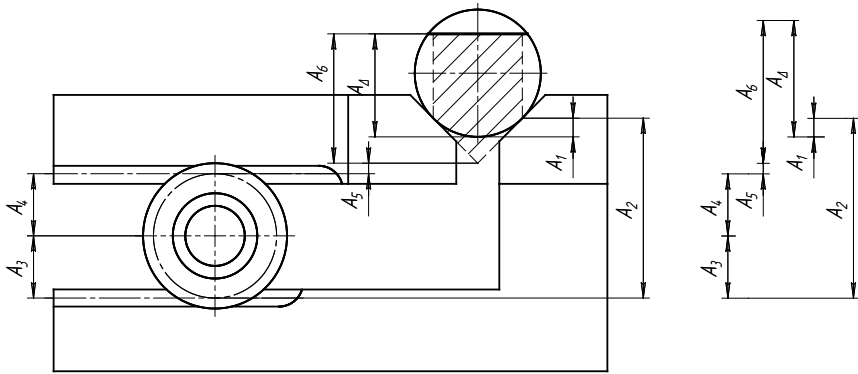


а)

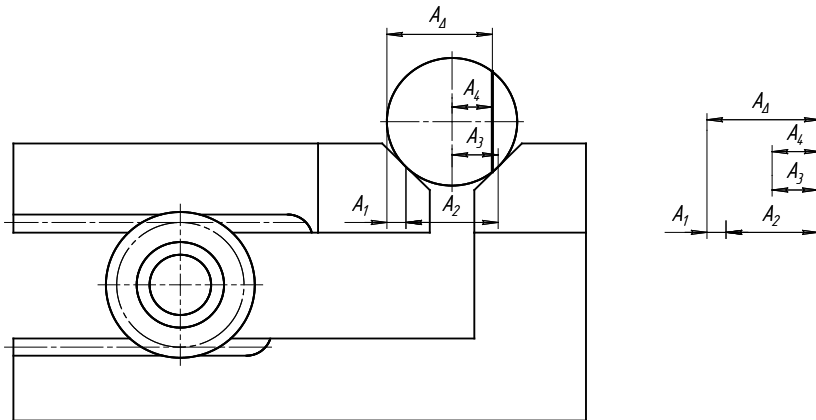


б)

Рис. 8.27. Призма з комплекту ЗРП і розмірні ланцюги для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски:  
 а – паралельної робочій поверхні стола верстата;  
 б – перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата



а)



б)

Рис. 8.28. Самоцентрувальні лещата і розмірні ланцюги для визначення похибки базування вала при фрезеруванні лиски:

- а – паралельної робочій поверхні стола верстата;
- б – перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 46^2 + 35^2 + 35^2 + 12^2 + 10^2} = 74 \text{ мкм.}$$

Таблиця 8.12

## Допуски на ланки розмірного ланцюга призми з комплекту ЗРП

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	30	Допуск на розмір між технологічною базою заготовки і віссю отвору в напівпризмі	Відповідно до складального креслення
TA <sub>3</sub>	25	Допуск на співвісність між отворами напівпризм	Відповідно до ГОСТ 24643-77
TA <sub>4</sub>	30	Допуск на розмір між отвором у напівпризмі й еталоном	Відповідно до складального креслення
TA <sub>5</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Продовження табл. 8.12

1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	13	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
TA <sub>3</sub>	56	Допуск на розмір між технологічною базою і віссю заготовки	$TA_3 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
TA <sub>4</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Таблиця 8.13

## Допуски на ланки розмірного ланцюга самоцентрувальних лещат

Позначення допуску	Величина допуску, мкм	Пояснення	Спосіб визначення
1	2	3	4
При фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата			
TA <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
TA <sub>2</sub>	46	Допуск на розмір між технологічною базою заготовки і ділильною прямою зубчатої рейки	Відповідно до складального креслення
TA <sub>3</sub>	35	Допуск на відстань між ділильною прямою і віссю зубчатого колеса	TA <sub>3</sub> = f <sub>a</sub> відповідно до ГОСТ 1643-81
TA <sub>4</sub>	35	Допуск на відстань між віссю зубчатого колеса і ділильною прямою	TA <sub>4</sub> = f <sub>a</sub> відповідно до ГОСТ 1643-81
TA <sub>5</sub>	12	Допуск на розмір між ділильною прямою зубчатої рейки й еталоном	Відповідно до складального креслення

Продовження табл. 8.13

1	2	3	4
ТА <sub>6</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту
При фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата			
ТА <sub>1</sub>	24	Допуск на розмір між технологічною і вимірювальною базами заготовки	$TA_1 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot (1 - \cos 45^\circ)$
ТА <sub>2</sub>	13	Допуск на розмір еталона	Відповідно до технічних вимог на виготовлення еталонів
ТА <sub>3</sub>	56	Допуск на розмір між технологічною базою і віссю заготовки	$TA_3 = \frac{Td_{заг}}{2} \cdot \cos 45^\circ$
ТА <sub>4</sub>	10	Допуск на розмір для налагодження різального інструменту	Відповідно до вимог на налагодження різального інструменту

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  при фрезерування лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата (рис. 8.28 б), визначений за методом максимуму-мінімуму:

$$TA_{\Delta} = 24 + 13 + 56 + 10 = 103 \text{ мкм.}$$

Допуск замикальної ланки  $TA_{\Delta}$  визначений за ймовірнісним методом:

$$TA_{\Delta} = \sqrt{24^2 + 13^2 + 56^2 + 10^2} = 63 \text{ мкм.}$$

Зіставлення результатів розрахунків за методами максимуму-мінімуму та ймовірнісним (табл. 8.14) показало, що при однакових допусках на складові ланки розмірного ланцюга, допуск замикальної ланки менший при розрахунку за ймовірнісним методом.

Для досягнення такого самого значення допуску на замикальну ланку за методом максимуму-мінімуму необхідно призначати більш жорсткі допуски на виготовлення елементів, що входять у розмірний ланцюг. Це призводить до збільшення витрат на виготовлення, а отже, до підвищення вартості конструкції в цілому. За результатами розрахунку за ймовірнісним методом похибка базування вала у запропонованій базуючій призмі становить  $\varepsilon_{\delta} = 70$  мкм при фрезеруванні лиски, паралельної робочій поверхні стола верстата і  $\varepsilon_{\delta} = 67$  мкм при фрезеруванні лиски, перпендикулярної до робочої поверхні стола верстата [60].

Ураховуючи заданий конструктором допуск ( $Td = 160$  мкм), можна зробити висновок, що запропонована конструкція базуючої призми дозволить отримати розмір із заданою точністю.



Таблиця 8.14

## Похибки базування валів у призмах

Конструкція призми	Похибка базування вала, мкм, при установленні у призмах для обробки лиски			
	паралельної робочій поверхні стола верстата за методом		перпендикулярної до робочій поверхні стола верстата за методом	
	максимуму- мінімуму	імовірнісним	максимуму- мінімуму	імовірнісним
Базуюча призма (рис. 8.22, рис. 8.23)	213	70	187	67
Жорстка опорна призма (рис. 8.24)	45	28	45	28
Призма з опорами, що регулюються незалежно (рис. 8.25)	231	118	103	63
Призма, що регулюється (рис. 8.26)	152	88	90	62
Призма ЗРП (рис. 8.27)	119	56	103	63
Самоцентрувальні лещата (рис. 8.28)	162	74	103	63

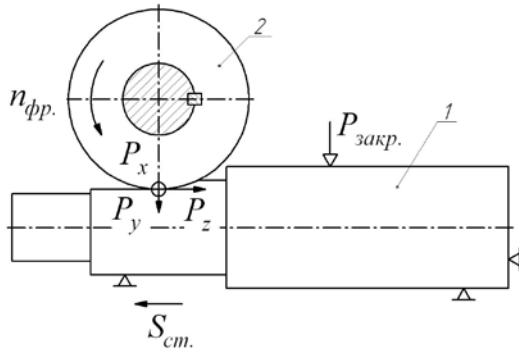
Для визначення похибок, що виникають унаслідок пружних деформацій під дією сил різання, проведено скінченноелементний аналіз для базуючих модулів на основі запропонованої базуючої призми [62] та стандартної жорсткої опорної призми. Виконано моделювання процесу фрезерування лиски на валу циліндричною та кінцевою фрезами за схемою, наведеною на рис. 8.29.

До заготовки прикладають силу закріплення та силу різання, розраховану за нормативами [20]. Силу різання визначали для умов, коли глибина різання  $t = 1$  мм, що відповідає напівчистовому фрезеруванню і  $t = 4$  мм – чорновому фрезеруванню.

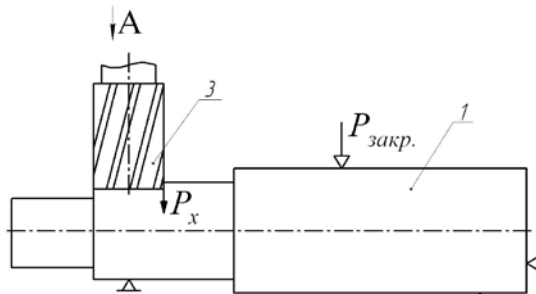
На рис. 8.30 і 8.31 наведено скінченноелементні моделі й діаграми пружних переміщень при фрезеруванні лиски на консолі вала циліндричною фрезою при закріпленні заготовки у базуючій та у стандартній жорсткій опорній призмі відповідно. Як бачимо з наведених діаграм, при обробці виникають пружні переміщення, які відрізняються за величиною залежно від умов обробки та впливають на точність отриманого розміру.

Результати моделювання за методом скінченних елементів свідчать, що при глибині різання  $t = 1$  мм деформації при обробці як циліндричною, так і кінцевою фрезою заготовок, установлених на обох типах призм, однакові й знаходяться у діапазоні 0,002–0,008 мм залежно від місця обробки лиски на валу (табл. 8.16) [78].

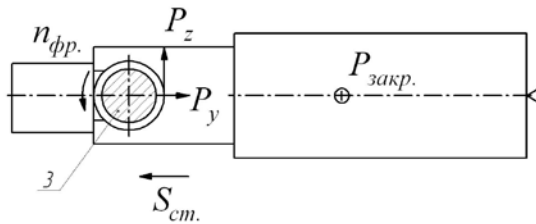
При обробці заготовок циліндричною фрезою ( $t = 4$  мм) переміщення збільшуються, однак їх величина не перевищує 0,016 мм для жорсткої опорної призми і 0,024 мм для запропонованої базуючої призми [79]. Для діаметрів заготовок у діапазоні 18–30 мм допуск виконуваного розміру становить  $T_d = 0,13$  мм, для діаметрів 30–50 мм –  $T_d = 0,16$  мм, а для діаметрів 50–80 мм –  $T_d = 0,19$  мм.



а)

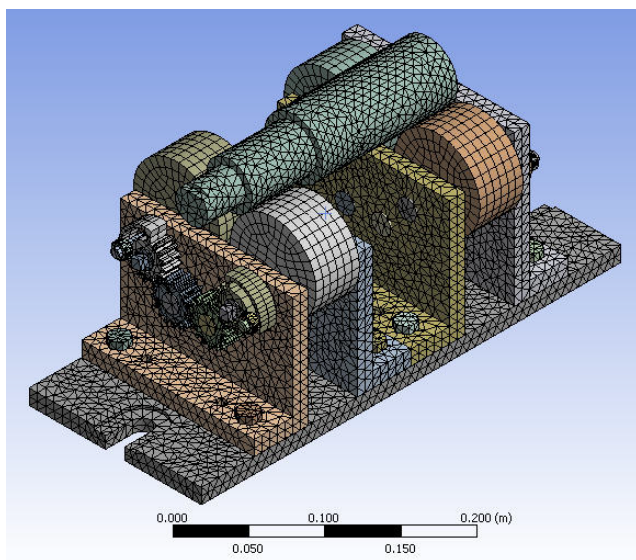


A

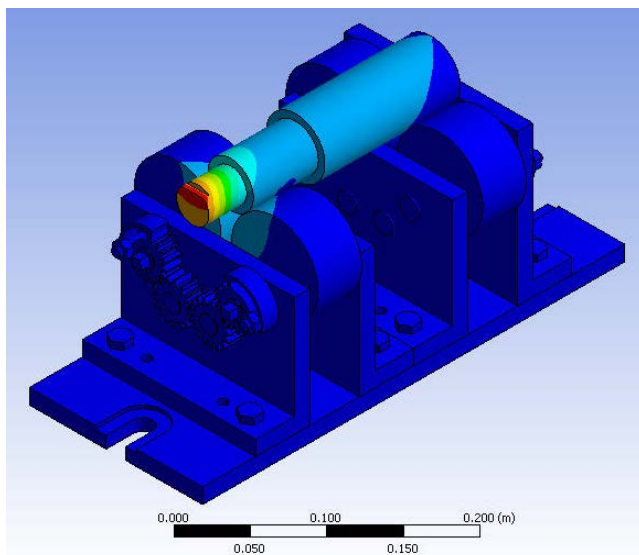


б)

Рис. 8.29. Схеми сил різання при фрезеруванні циліндричною фрезою (а) і кінцевою фрезою (б): 1 – ступінчастий вал; 2 – циліндрична фреза; 3 – кінцева фреза;  $P_x$  – осьова складова сили різання;  $P_y$  – радіальна складова сили різання;  $P_z$  – дотична складова сили різання;  $P_{закр.}$  – сила закріплення;  $n_{фр.}$  – частота обертання фрези;  $S_{ст.}$  – подача стола верстата

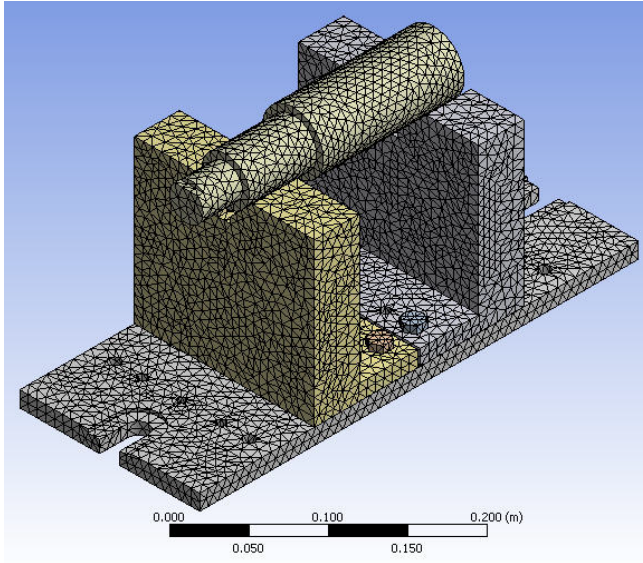


а)

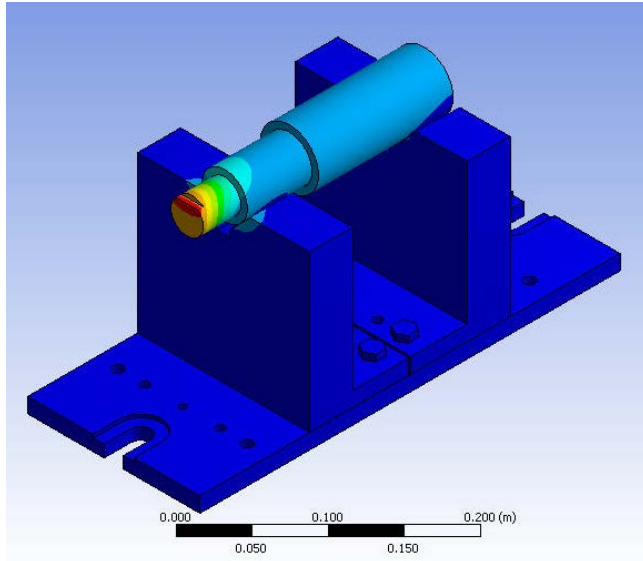


б)

Рис. 8.30. Скінченноелементна модель (а) і діаграма пружних переміщень (б) запропонованої базуючої призми



а)



б)

Рис. 8.31. Скінченноелементна модель (а) і діаграма пружних переміщень (б) жорсткої опорної призми

Таблиця 8.16

Пружні переміщення, які виникають при фрезеруванні лиски на валу, мм

Базуючий модуль	Місце обробки вала					
	на консолі		над опорою		між двома опорами	
	при глибині різання $t$ , мм					
	1	4	1	4	1	4
Фрезерування циліндричною фрезою						
Запропонована базуюча призма	0,006	0,024	0,004	0,014	0,006	0,024
Стандартна жорстка опорна призма	0,006	0,016	0,004	0,008	0,006	0,015
Фрезерування кінцевою фрезою						
Запропонована базуюча призма	0,004	0,008	0,002	0,005	0,004	0,008
Стандартна жорстка опорна призма	0,004	0,007	0,002	0,005	0,004	0,007

Як бачимо, похибки, отримані в результаті моделювання напружено-деформованого стану, значно менші за поля допусків на фрезерування відповідних поверхонь, тому запропонована конструкція базуючої призми повністю задовольняє виробничі умови.

## **9. Експериментальне дослідження точності установлювальних елементів універсально-збірних переналаджувальних пристроїв**

### **9.1. Конструкція базуючої призми**

Для визначення точніших можливостей та підтвердження адекватності аналітичних розрахунків були проведені експериментальні дослідження обробки ступінчастих валів у запропонованій конструкції базуючої призми (патент України № 31416). Для цього розроблено конструкторсько-технологічну документацію, на основі якої виготовлено дослідний зразок базуючої призми (рис. 9.1), а її технічна характеристика наведена у табл. 9.1.

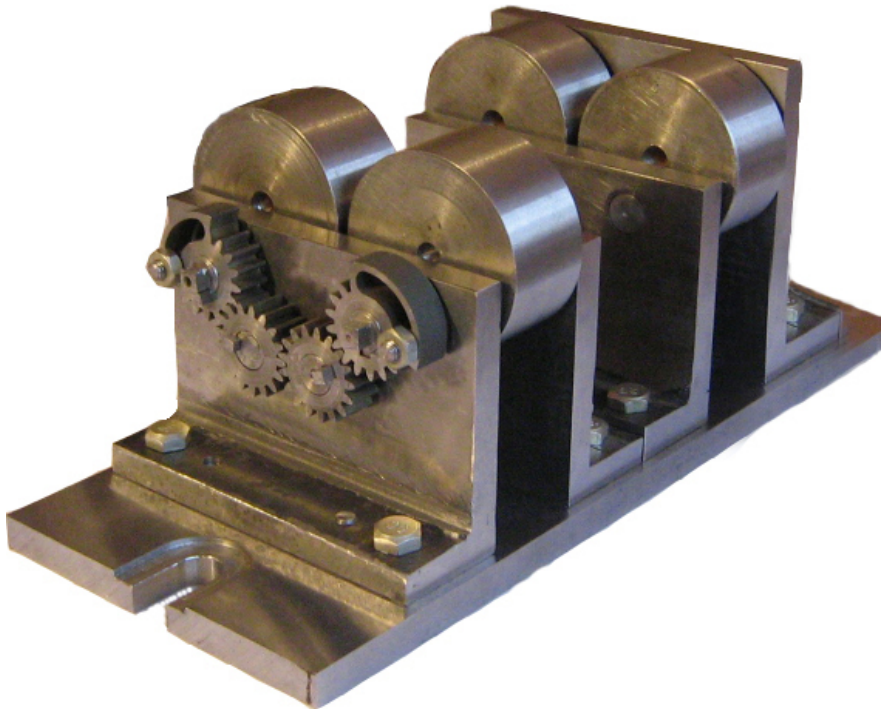


Рис. 9.1. Дослідний зразок базуючої призми

Таблиця 9.1

Технічна характеристика дослідного зразка базуючої призми

Показник базуючої призми	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
Мінімальний діаметр установлюваної заготовки	$d_{\text{заг min}}$	мм	25
Максимальний діаметр	$d_{\text{заг max}}$	мм	100
Максимальний кут повороту опорних дисків	$\gamma_{\text{max}}$	град	90
Відстань між осями повороту опорних дисків	L	мм	80
Величина ексцентриситету	e	мм	20
Радіус опорних дисків	R	мм	40
Ширина опорних дисків базуючої призми	–	мм	40
Мінімальна відстань між опорними дисками двох призм	–	мм	100
Вага базуючої призми	–	кг	8

На рис. 9.2 наведено схему механізму регулювання установлювальних елементів дослідного зразка базуючої призми із зазначеними її основними параметрами.



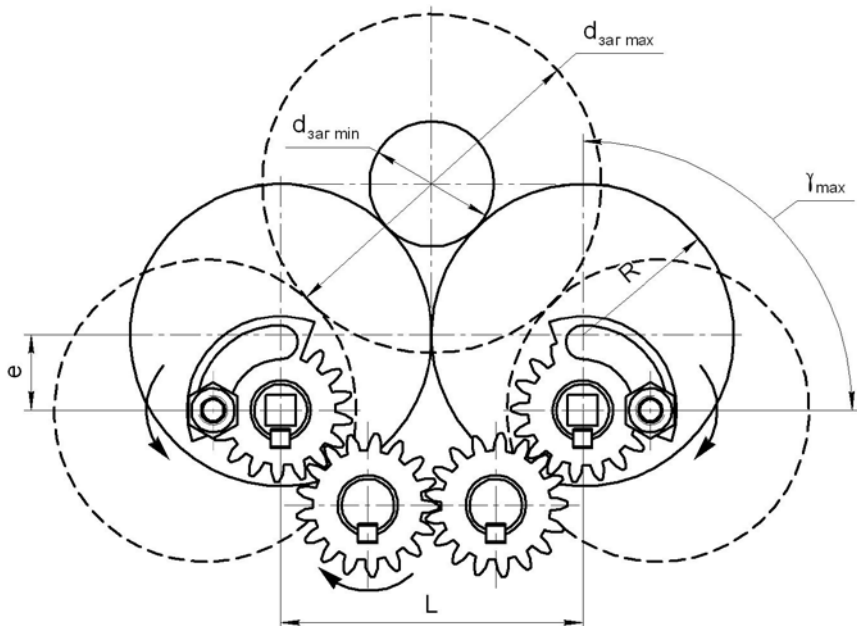


Рис. 9.2. Схема механізму регулювання установлювальних елементів дослідного зразка базуючої призми із зазначеними основними параметрами

Для експериментальних досліджень використовувалися трьохступінчасті вали (рис. 9.3) з базовими поверхнями діаметрами  $d = 42h9$  мм та  $d = 54h9$  мм.



Рис. 9.3. Оброблюваний ступінчастий вал (експериментальний зразок)

Установлення дослідного зразка базуючої призми на робочому столі верстата здійснювалося шпонками по Т-подібних пазах стола та закріплювався гвинтами. Налаштування опорних дисків на заданий базовий діаметр заготовки здійснювалося за допомогою шаблона-установки (рис. 9.4), який встановлювався та закріплювався на одній зі стійок базуючої призми.

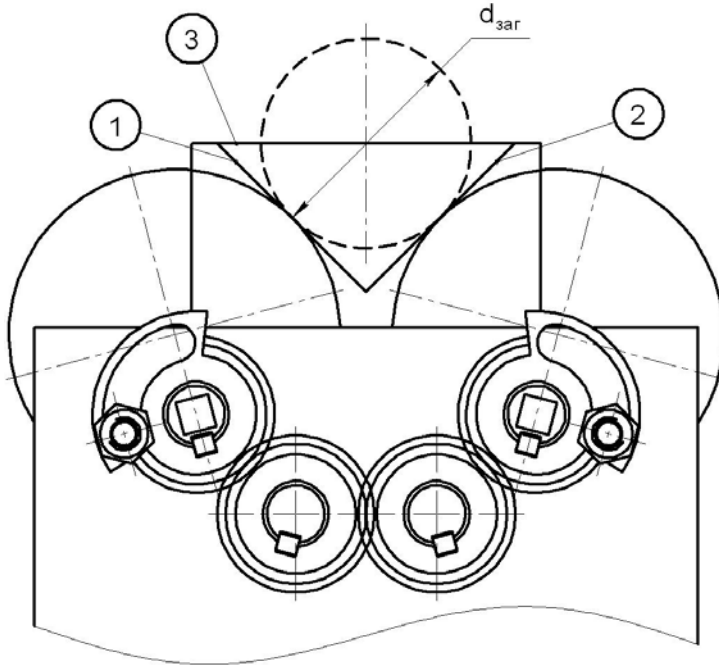


Рис. 9.4. Налаштування базуючої призми за допомогою шаблона-установки: поверхні 1 та 2 – відповідають діаметру заготовки; поверхня 3 – для налаштування різального інструменту

Після цього опорні диски за допомогою зубчастої передачі одночасно підводилися до дотику із шаблоном-установкою, поверхні 1 та 2 якого виготовлені з високої точністю та якістю і відповідають базовому діаметру заготовки  $d_{заг}$ . Фіксація опорних дисків у цьому положенні виконується шляхом загвинчування гайок. Таким чином забезпечується

точне і нерухоме положення опорних дисків базуючої призми. Налагодження іншої базуючої призми виконується аналогічно. Поверхня 3 шаблона-установа відповідає осі встановлюваної заготовки і може служити для налагодження різального інструменту.

## **9.2. Дослідження похибки обробки валів на горизонтально-фрезерному верстаті**

Метою експериментального дослідження передбачалося визначення похибок розмірів обробки при фрезеруванні лисок на валах при їх установленні на запропоновану базуючу призму. Для визначення точнісних можливостей отримані величини похибок розмірів порівнювали з похибками розмірів обробки валів при їх установленні на стандартну жорстку опорну призму.

Для порівняння результатів аналітичних та експериментальних досліджень обробку валів здійснювали для тієї самої схеми обробки, що й при аналітичних розрахунках. На валах фрезерувалися лиски, розташовані у різних місцях вала: консольно ( $d = 30$  мм), над опорою ( $d = 42$  мм) і між двома опорами ( $d = 54$  мм). Фрезерування лисок виконувалося для режимів обробки, які відповідають чорновій (глибина різання  $t = 4$  мм) та напівчистовій обробці ( $t = 4$  мм). Таким чином, при обробці лисок необхідно отримати розміри за квалітетом IT11: при глибині різання  $t = 1$  мм –  $29_{(-0,13)}$ ,  $41_{(-0,16)}$ ,  $53_{(-0,19)}$  відповідно; а при глибині  $t = 4$  мм –  $26_{(-0,13)}$ ,  $38_{(-0,16)}$  та  $50_{(-0,16)}$  відповідно.

Обробку виконували на горизонтально-фрезерному верстаті мод. 6P82Г. Для фрезерування лисок використовували циліндричну фрезу  $\varnothing 80$  мм. Частоти обертання шпинделя та подачі робочих столів верстата призначалися відповідно до загальномашинобудівних нормативів часу та режимів різання. Вимірювання розмірів валів після обробки здійснювалися мікрометрами МК-50 та МК-75 із ціною поділки 0,01 мм.

На рис. 9.5 наведено фотографії процесу фрезерування лиски на горизонтально-фрезерному верстаті мод. 6Р82Г при установленні заготовок у порівнюваних базуючих модулях.

Установлено, що внаслідок пружних деформацій технологічної системи спостерігаються похибки розмірів, які відрізняються за величиною залежно від умов обробки. При глибині різання  $t = 1$  мм (напівчистове фрезерування) похибки оброблюваних розмірів при установленні заготовок на обох типах призм однакові й не перевищують 0,01 мм (табл. 9.2).

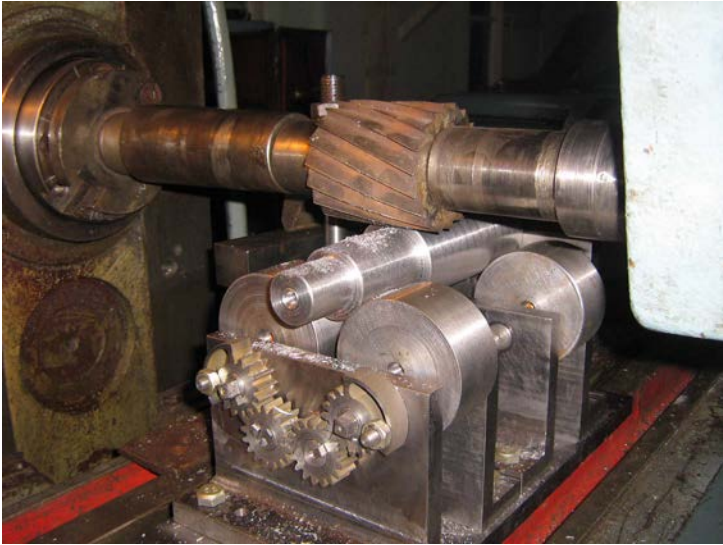
Таблиця 9.2

Похибки розмірів обробки при фрезеруванні циліндричною фрезою, мм

Базуючий модуль	Місце обробки вала					
	на консолі		над опорою		між двома опорами	
	при глибині різання $t$ , мм					
	1	4	1	4	1	4
Запропонована базуюча призма	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03
Стандартна жорстка опорна призма	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02

При збільшенні глибини різання циліндричною фрезою до  $t = 4$  мм (чорнове фрезерування) похибки розмірів обробки знаходяться в межах 0,01–0,02 мм та 0,02–0,03 мм при установленні заготовки на стандартну жорстку опорну призму та на запропоновану базуючу призму відповідно залежно від місця обробки лиски на валу [80]. Для розмірів у діапазоні 18–30 мм допуск виконуваного розміру  $T_d = 0,13$  мм, для розмірів 30–50 мм –  $T_d = 0,16$  мм, для розмірів 50–80 мм – 0,19 мм.

Для порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами моделювання за методом скінченних елементів розглянемо графіки, які наведено на рис. 9.6.



а)



б)

Рис. 9.5. Фрезерування лиски на горизонтально-фрезерному верстаті мод. 6Р82Г при установленні заготовок:

а – на запропоновану базуючу призму;

б – на стандартну жорстку опорну призму

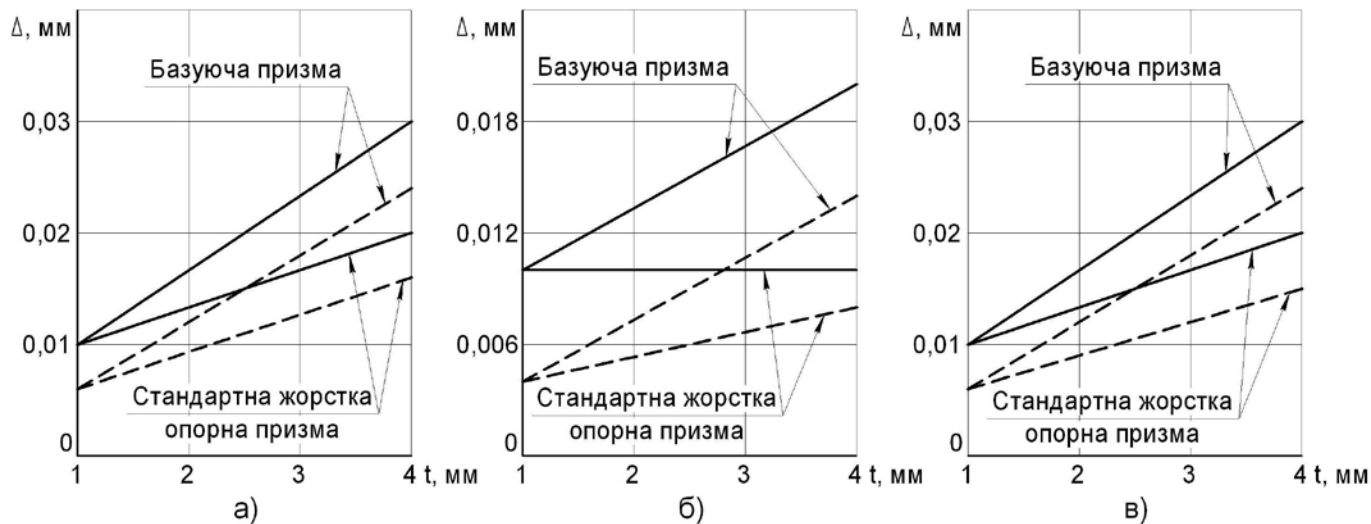


Рис. 9.6. Графіки залежності похибок обробки від глибини різання при циліндричному фрезеруванні лисок, які розміщені:  
 а – на консолі; б – над опорою; в – між опорами;  
 ————— результати експериментальних досліджень;  
 - - - - - результати моделювання за методом скінченних елементів

Як бачимо, результати експериментальних досліджень неістотно відрізняються за величиною від результатів моделювання за методом скінченних елементів, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

### 9.3. Дослідження похибки обробки валів на вертикально-фрезерному верстаті

Обробку виконували на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6P13Ф3. Для фрезерування лисок використовували кінцеву фрезу Ø30 мм. Частоти обертання шпинделя та подачі робочих столів верстата призначалися відповідно до загальномашинобудівних нормативів часу та режимів різання. Вимірювання розмірів валів після обробки здійснювалися мікрометрами МК-50 та МК-75.

На рис. 9.7 наведено фотографію процесу фрезерування лиски на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6P13Ф3 при установленні заготовок на запропоновану базуючу призму. Результати похибок розмірів обробки при фрезерування лисок кінцевою фрезою наведено у табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Похибки розмірів обробки при фрезеруванні кінцевою фрезою, мм

Базуючий модуль	Місце обробки вала					
	на консолі		над опорою		між двома опорами	
	при глибині різання $t$ , мм					
	1	4	1	4	1	4
Запропонована базуюча призма	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Стандартна жорстка опорна призма	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

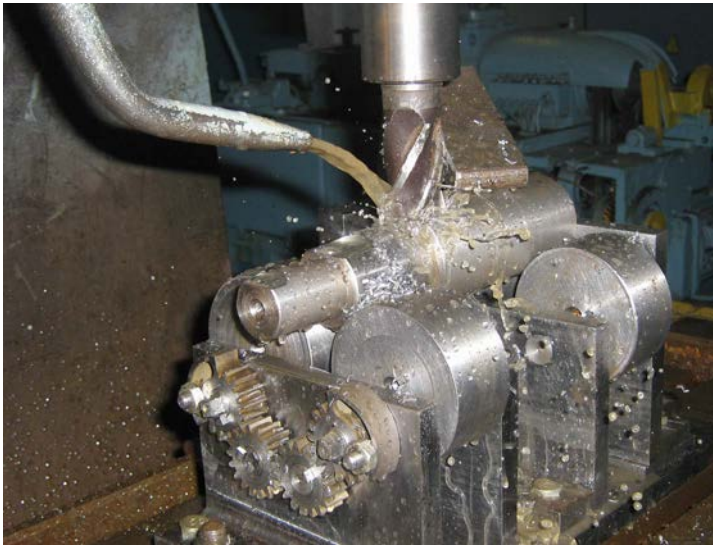


Рис. 9.7. Фрезерування лиски на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6P13Ф3 при установленні заготовок на запропоновану базуючу призму

Як показали результати експериментальних досліджень, похибки обробки кінцевою фрезою практично не змінюються залежно від глибини різання та застосовуваних конструкцій базуючих модулів і не перевищують величину 0,01 мм [80]. На рис. 9.8 наведено графіки залежності похибки розмірів від глибини різання при фрезеруванні лиски кінцевою фрезою для порівняння отриманих експериментальних результатів із результатами аналітичних досліджень.

Порівняльний аналіз похибок обробки, отриманих шляхом експериментальних досліджень та за допомогою моделювання за методом скінченних елементів підтверджує високу достовірність аналітичних розрахунків.

Таким чином, значне розширення технологічних можливостей запропонованого базуючого модуля і гнучкості відповідних ВП не пов'язане з погіршенням їх точнісних показників, які повністю задовольняють виробничі умови.



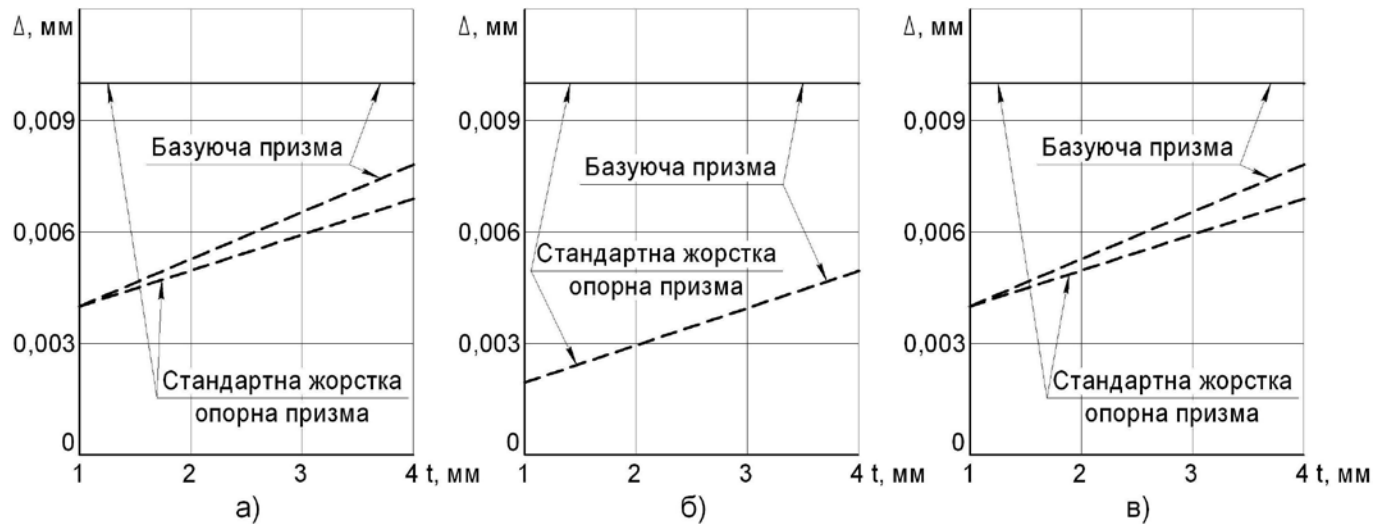


Рис. 9.8. Графіки залежності похибок обробки від глибини різання при кінцевому фрезеруванні лисок, які розміщені:  
 а – на консолі; б – над опорою; в – між опорами;  
 ————— результати експериментальних досліджень;  
 - - - результати моделювання за методом скінченних елементів

Результати експериментальних досліджень обробки ступінчастих валів підтвердили достовірність аналітичних розрахунків за методом скінченних елементів, що свідчить про високі точнісні можливості запропонованої конструкції базуючої призми, а отже, підтверджує доцільність застосування системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв для універсальних та багатоцільових верстатів із ЧПК.

Величини похибок оброблюваних розмірів при напівчистовому фрезеруванні ( $t = 1$  мм) циліндричною фрезою при установленні заготовок на обох типах призм однакові й не перевищують 0,01 мм, при чорновій обробці валів ( $t = 4$  мм) похибки розмірів обробки знаходяться у межах 0,01–0,02 мм та 0,01–0,03 мм при установленні заготовок на стандартну жорстку опорну призму й на запропоновану базуючу призму відповідно.

При фрезеруванні лисок кінцевою фрезою як при напівчистовій ( $t = 1$  мм), так і при чорновій обробці заготовок ( $t = 4$  мм) похибки обробки практично не змінюються залежно від конструкцій базуючих модулів і не перевищують величину 0,01 мм.

## Список джерел інформації

1. Карпусь В. Е. Технологические основы структурно-параметрического синтеза многономенклатурного агрегатного металлорежущего оборудования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. Е. Карпусь. – 1998. – 276 с.
2. Карпусь В. Е. Интенсивность формообразования технологических систем / В. Е. Карпусь // Вестник машиностроения. – 2000. – № 2. – С. 30–34.
3. Карпусь В. Е. Анализ автоматизированных технологических систем по интенсивности формообразования / В. Е. Карпусь // Резание и инструмент. – Харьков : Вища шк. – 1986. – Вып. 36. – С. 61–65.
4. Формирование хозяйственных решений / В. М. Хобта, О. А. Солодова, С. И. Кравченко и др.; под общ. ред. В. М. Хобты. – Донецк : Каштан, 2003. – 416 с.
5. Экономика предприятия : учеб. пособие / под ред. А. Е. Карлика. – М. : ИНФА-М, 2001. – 432 с.
6. Швец И. Б. Управление энергетическими ресурсами на предприятии / И. Б. Швец. – Донецк : Ин-т экономики промышленности, 2002. – 184 с.
7. Антушев Г. С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем / Г. С. Антушев. – М. : Наука, 1989. – 88 с.
8. Хмеловский Г. Л. Основы автоматизации технологического проектирования / Г. Л. Хмеловский, О. С. Кроль, Ю. М. Сурнин. – К. : УМК ВО, 1989. – 188 с.
9. Перегудов Ф. И. Введение в системный анализ : учеб. пособие / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М. : Высш. шк, 1989. – 367 с.
10. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ: в 2 ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.
11. Режимы резания металлов: Справочник / под ред. Ю. В. Барановского. – М. : Машиностроение, 1972. – 407 с.

12. United States Patent 7226250 B2, Int. CL B23B 51/02, B23B 51/08, U.S. CL 408/1 R, 408/218, 408/191, 408/192, 408/225, Tool and method for forming a lug hole / Gepffrey L. Gatton, Dave Seiler, assignee Hayes Lemmerz International, Inc; – Appl №. 10/744118, Dec. 22, 2003; Date of Patent Jun. 5, 2007.
13. United States Patent 7131798 B2, Int. CL B23B 51/08, B23B 51/10, U.S. CL 408/191; 408/118; 408/181; 408/224, Countersink for chip removing machining tool / Ronny Karlsson, Alain Freyermuth, assignee Seco Tools AB; – Appl №. 10/878053, Jun. 23, 2004; Date of Patent Nov. 1, 2006.
14. Grunland. Main Catalogue, Sweden, 2009, 40 p.
15. Пат. на корисну модель № 45699 Україна, МПК (2009), B23B 51/00. Збірний комбінований осьовий інструмент / Карпусь В. Є., Іванова М. С., Котляр О. В.
16. Пат. на корисну модель № 49356 Україна, МПК (2009), B23B 51/00. Модульний комбінований осьовий інструмент / Карпусь В. Є., Іванова М. С.
17. Карпусь В. Е. Определение величины смещения оси осевых инструментов под действием неуравновешенной радиальной силы / В. Е. Карпусь, М. С. Иванова // Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей і транспорту : матер. міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих вчених. – Севастополь : СевНТУ, 2010. – С. 126–128.
18. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. – Т.2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд. – М. : Машиностроение, 2001. – 942 с.
19. Малышко И. А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) / И. А. Малышко. – Донецк : ПКТИ, 1996. – 135 с.
20. Гузеев В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков. – М. : Машиностроение, 2005. – 368 с.

21. Потапов В. А. Многоцелевые станки становятся многофункциональными / В. А. Потапов // Машиностроение. – 2002. – №4. – С. 18–21.
22. Фадюшин И. Л. Инструменты для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин, А. Я. Музыкант, А. И. Мещеряков. – М. : Машиностроение, 1996. – 240 с.
23. Маслов А. Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ / А. Р. Маслов, С. М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.
24. Пат. на корисну модель № 31383 Україна, МПК (2006) В23В 9/00. Багатошпindelна головка / Карпусь В. Є., Котляр О. В.
25. Пат. на корисну модель № 36304 Україна МПК (2006) В23В 39/00. Багатошпindelна головка / Карпусь В. Є., Котляр О. В.
26. Карпусь В. Е. Технологическая оснастка для обработки отверстий на станках с ЧПУ / В. Е. Карпусь, Д. А. Миненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 224–235.
27. Карпусь В. Е. Анализ интенсивности формообразования автоматических линий / В. Е. Карпусь // Вестник машиностроения. – 2000. – №3. – С. 38–40.
28. Карпусь В. Е. Выбор режимов максимальной производительности обработки на многоцелевых станках / В. Е. Карпусь, Д. А. Миненко, А. А. Фуников // Вестник НТУ «ХПИ» «Технологии в машиностроении». – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 18. – С. 107–115.
29. Карпусь В. Е. Экономичные режимы резания на многоцелевых станках / В. Е. Карпусь, Д. А. Миненко // Вестник НТУ «ХПИ»: «Технологии в машиностроении». – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – Вып. 1. – С. 90–105.
30. Карпусь В. Е. Технологическая оснастка для обработки отверстий на станках с ЧПУ / В. Е. Карпусь, Д. А. Миненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 224–235.

31. Оправка для обработки отверстий под нарезку резьбы. Декл. пат. 16598U, Украина, В23 В49/ 00. Карпусь В.С., Міненко Д.О.
32. Карпусь В. Е. Повышение гибкости агрегатных станков / В. Е. Карпусь, Ю. Р. Гаврилюк // Машиностроитель. – М. : Машиностроение, 1997. – № 9. – С. 43–48.
33. Карпусь В. Е. Синтез технологических компоновок многономенклатурного агрегатного металлорежущего оборудования / В. Е. Карпусь // Вестник машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 53–57.
34. Карпусь В. Е. Выбор оптимальных исходных режимов многоинструментной обработки комплектом режущих инструментов / В. Е. Карпусь // Вестник машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 42–44.
35. Подиновский В. В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В. В. Подиновский, В. М. Гаврилов. – М. : Сов. радио, 1975. – 192 с.
36. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / Н. Д. Жолткевич, И. Я. Мовшович, А. С. Кобзев и др. – К. : Техніка, 1992. – 216 с.
37. Чумаков Г. С. Технологическая оснастка : учеб. пособие / Г. С. Чумаков. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2001. – 216 с.
38. Технологическая оснастка многократного применения / В. Д. Бирюков, В. М. Дьяконов, А. И. Егоров и др. – М. : Машиностроение, 1981. – 404 с.
39. Черпаков Б. И. Технологическая оснастка : учебник для учреждений сред. проф. образования / Б. И. Черпаков. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 288 с.
40. Шолохов В. М. Станочные приспособления / В. М. Шолохов // Мир техники и технологий. – 2008. – № 4 (77). – С. 12–14.
41. Оснастка для станков с ЧПУ : справочник / Ю. И. Кузнецов, А. Р. Маслов, А. Н. Байков. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
42. Hoffman E. Jig and Fixture Design / E. Hoffman. – 5th Edition. – Delmar Learning Drafting, 2003. – 384 p.

43. Stevens Modular Fixturing: Catalog of Stevens Engineering Inc. – Phoenix, Michigan : Stevens Engineering Inc, 2009. – 76 p.
44. Modular fixturing: Catalog of Fixtureworks. – Fraser, Michigan : Fixtureworks, 2009. – 150 p.
45. Standard Components for Tooling and Production : Catalog of Carr Lane Mfg. Co. – St. Louis, Missouri : Carr Lane Mfg. Co, 2009. – 710 p.
46. Drozda T. Tool and manufacturing Engineers Handbook, Vol. 1: Machining / T. Drozda. – 4th Edition. – Society of Manufacturing Engineers, 1983. – 854 p.
47. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Fixture Direction // International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39 (13), pp. 2867–2894.
48. Ракович А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / под ред. Е. А. Стародетко. – Мн. : Наука и техника, 1985. – 285 с.
49. Корсаков В. С. Основы конструирования приспособлений : учеб. для вузов / В. С. Корсаков. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 277 с.
50. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. – М. : Машиностроение, 1984. – Т.1. – 591 с.
51. Микитянский В. В. Точность приспособлений в машиностроении / В. В. Микитянский. – М. : Машиностроение, 1984. – 128 с.
52. Карпусь В. Е. Оптимизация выбора установочно-зажимных приспособлений для станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Современные проблемы машиностроения : труды IV Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 ноября 2008 г., Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – С. 627–632.
53. Карпусь В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.

54. Karpus' V. E., Ivanov V.A. Universal-composite adjustable machine-tool attachments // Russian Engineering Research, 2008. – Vol. 28, No. 11. – pp.1077–1083.
55. Карпусь В. Е. Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 1 (16). – С. 125–134.
56. Пат. на корисну модель № 44718 Україна, МПК (2006) В23В 39/00. Самоцентруюча збірна втулка для беззazorного базування елементів верстатних пристроїв / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
57. Пат. на корисну модель № 31000 Україна, МПК (2006) В23В 39/00. Опора регульована / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
58. Карпусь В. Е. Конструктивно-технологическое обеспечение эффективной эксплуатации станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов, А. В. Котляр // Авиационно-космическая техника и технология. – Харків : НАУ ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», 2008. – № 7 (54). – С. 32–35.
59. Пат. на корисну модель № 29824 Україна, МПК (2006) В23В 39/00. Упор регульований / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
60. Карпусь В. Є. Вибір базуючих модулів для установлення валів при обробці на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах / В. Є. Карпусь, В. О. Иванов, К. С. Вараксіна // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. научно-техн. сб. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – Вип. 76. – С. 55–62.
61. Пат. на корисну модель № 29823 Україна, МПК (2006) В23В 39/00. Призма регульована / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
62. Пат. на корисну модель № 31416 Україна, МПК (2006) В23В 39/00. Базуюча призма, що автоматично регулюється / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
63. Иванов В. А. Структура механизмов регулирования зажимных элементов переналаживаемых установочно-зажимных приспособлений / В. А. Иванов // Труды Одесского политехнического университета : научный и



- произв.-практ. сб. – Одесса : ОНПУ, 2008. – Вып. 2 (30). – С. 47–51.
64. Пат. на корисну модель № 38073 Україна, МПК (2006) В23Q 3/00. Затискний модуль / Карпусь В. Є., Іванов В. О.
  65. Карпусь В. Є. Швидкопереналагоджувана технологічна оснастка / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, О. В. Котляр // Авиационно-космическая техника и технология. – Харків : НАУ ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», 2009. – № 10 (67). – С. 78–81.
  66. Пат. на корисну модель № 27551 Україна, МПК (2006) В23В 39/00; В23Q 3/06. Губки верстатних лещат / Карпусь В. Є., Іванов В. О.
  67. Пат. на корисну модель № 30999 Україна, МПК (2006) В23Q 3/06. Оправка розтискна / Карпусь В. Є., Іванов В. О.
  68. Карпусь В. Е. Высокопроизводительная оснастка для станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, А. В. Котляр, В. А. Иванов // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2008. – Вип. 36. – С. 71–75.
  69. Пат. на корисну модель № 31468 Україна, МПК (2006) В23В 39/00, В23Q 3/06. Токарний самоцентруючий патрон з автоматичним приводом / Карпусь В. Є., Іванов В. О.
  70. Карпусь В. Е. Технологическая оснастка для токарных станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов, А. В. Котляр // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – Суми : Вид-во СумДУ. – 2008. – № 3. – С. 25–28.
  71. Пат. на корисну модель № 34438 Україна, МПК (2006) В23В 39/00, В23Q 3/06. Змінна плита / Карпусь В. Є., Іванов В. О.
  72. Карпусь В. Е. Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – № 22. – С. 23–35.
  73. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Мелкосерийное и единичное

- производство. – изд. 2-е. – М. : Машиностроение, 1974. – 220 с.
74. Карпусь В. Е. Исследование напряженно-деформированного состояния установочных элементов станочных приспособлений / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Вип. 75. – С. 141–147.
75. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров : справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 510 с.
76. Пат. на корисну модель № 31469 Україна, МПК (2006) B23B 39/00. Базуючий вузол / Карпусь В. Є., Иванов В. О.
77. Солонин И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.
78. Карпусь В. Є. Дослідження напружено-деформованого стану елементів технологічної оснастки / В. Є. Карпусь, В. О. Иванов, О. В. Котляр // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – Вип. 38. – С. 99–105.
79. Карпусь В. Є. Аналіз пружних деформацій елементів технологічної оснастки верстатів з ЧПК / В. Є. Карпусь, В. О. Иванов, О. В. Котляр // Aktualne problemy nowoczesnych nauk – 2009 : Materialy V miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, 07–15 czerwca 2009 roku, Przemysl, Poland. – Przemysl : Nauka i studia, 2009. – Vol. 22. – P. 55–59.
80. Карпусь В. Є. Експериментальні дослідження ефективності технологічного оснащення для верстатів з ЧПК / В. Є. Карпусь, В. О. Иванов, О. В. Котляр, М. С. Иванова // Наукові нотатки : міжвузівський зб. (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк : ЛНТУ, 2009. – Вип. 25, Ч. 1. – С. 161–166.

Додаток А  
(довідковий)

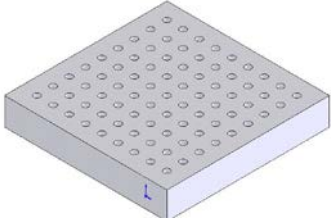
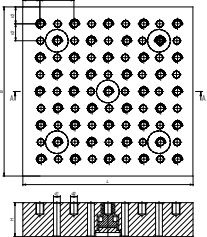
Таблиця А. 1

Фрагмент таблиць рішень для вибору круглих базових плит

Характеристика круглих базових плит	Типове зображення та код круглих базових плит			
				
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Діаметр плити D, мм	300	400	500	600
Висота плити H, мм	90	90	90	90
Діаметр базових отворів d1, мм	12	12	16	16
Діаметр різбових отворів d2, мм	M12	M12	M16	M16
Глибина різбових отворів, мм	20	20	30	30
Крок між базовими (різбовими) отворами t, мм	60	60	80	80
Крок між базовими і різбовими отворами t/2, мм	30	30	40	40
Кількість вбудованих гідроциліндрів, шт.	1	1	1	1

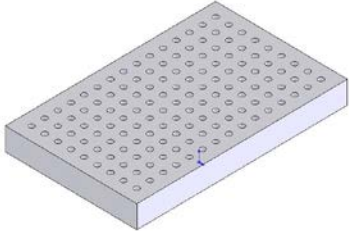
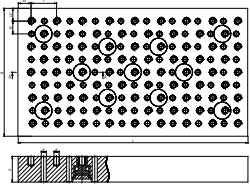
Таблиця А. 2

## Фрагмент таблиць рішень для вибору квадратних базових плит

Характеристика квадратних базових плит	Типове зображення та код квадратних базових плит					
						
	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>
Ширина плити В, мм	300	400	500	600	800	1000
Довжина плити L, мм	300	400	500	600	800	1000
Висота плити Н, мм	90	90	90	90	90	90
Діаметр базових отворів d1, мм	12	12	16	16	22	22
Діаметр різбових отворів d2, мм	M12	M12	M16	M16	M22	M22
Глибина різбових отворів, мм	20	20	30	30	40	40
Крок між базовими (різбовими) отворами t, мм	60	60	80	80	100	100
Крок між базовими і різбовими отворами t/2, мм	30	30	40	40	50	50
Кількість вбудованих гідроциліндрів, шт.	5	5	5	5	5	5

Таблиця А. 3

Фрагмент таблиць рішень для вибору прямокутних базових плит

Характеристика прямокутних базових плит	Типове зображення та код прямокутних базових плит					
						
	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>
Ширина плити В, мм	300	400	500	600	800	1000
Довжина плити L, мм	500	600	600	800	1000	1200
Висота плити Н, мм	90	90	90	90	90	90
Діаметр базових отворів d1, мм	12	12	16	16	22	22
Діаметр різьбових отворів d2, мм	M12	M12	M16	M16	M22	M22
Глибина різьбових отворів, мм	20	20	30	30	40	40
Крок між базовими (різьбовими) отворами t, мм	60	60	80	80	100	100
Крок між базовими і різьбовими отворами t/2, мм	30	30	40	40	50	50
Кількість вбудованих гідроциліндрів, шт.	11	11	11	11	11	11

Таблиця А. 4

Фрагмент таблиць рішень для вибору опорних пластин








Характеристика опорних пластин	Код та типове зображення опорних пластин						
	101	102	103	104	105	106	107
							
Функціональна поверхня	1; 4	1; 4	1; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4
Якість базової поверхні заготовки	1	1	1	1	1	1	1
Відношення довжини L до ширини B пластини	1	1	2	1	1	2	2
Спосіб переналагодження	1	1	1	1	1	1	1
Можливість з'єднання з іншими установлювальними елементами	0	0	0	1	1	1	1

Таблиця А. 5

Фрагмент таблиць рішень для вибору немеханізованих опор

Характеристика немеханізованих опор	Код та типове зображення опор						
	201	202	203	204	205	206	207
							
Функціональна поверхня	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1	1; 2; 4	1; 2; 4
Якість базової поверхні заготовки	1	0	1	0	1	1	0
Вид головки опори	1; 4	2; 3	1; 4	2; 3	1	1	3
Величина максимального навантаження на опору, кН	50	50	50	50	50	15	15
Регулювання по висоті, мм	0	0	5	5	0	0	0
Регулювання по довжині, мм	0	0	0	0	0	0	0
Регулювання під кутом, °	0	0	0	0	0	15	15
Ступінь автоматизації переналагодження	0	0	0	0	0	0	0

Продовження табл. А. 5

Характеристика немеханізованих опор	Код та типове зображення немеханізованих опор						
	208	209	210	211	212	213	214
							
Функціональна поверхня	1; 2; 4	1; 2; 4	1	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4
Якість базової поверхні заготовки	1	0	1	0	1	1	0
Вид головки опори	1	3	1	2	1; 2; 4	1; 2	3
Величина максимального навантаження на опору, кН	15	15	20	0,5	50	50	15
Регулювання по висоті, мм	5	5	10	40	40	40	40
Регулювання по довжині, мм	0	0	0	0	0	0	0
Регулювання під кутом, °	15	15	0	0	0	0	15
Ступінь автоматизації переналагодження	0	0	0	0	0	0	0









Фрагмент таблиць рішень для вибору механізованих опор

Характеристика механізованих опор	Код та типове зображення механізованих опор						
	231	232	233	234	235	236	237
							
Функціональна поверхня	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4	1; 2; 4
Якість базової поверхні заготовки	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1
Вид головки опори	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2
Величина максимального навантаження на опору, кН	15	20	25	30	35	40	50
Регулювання по висоті, мм	20	20	10	20	20	20	20
Регулювання по довжині, мм	0	0	0	0	0	0	0
Регулювання під кутом, °	0	0	0	0	0	0	0
Ступінь автоматизації переналагодження	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця А. 7

## Фрагмент таблиць рішень для вибору бокових опор

Характеристика бокових опор	Код та типове зображення бокових опор					
	251	252	253	254	255	256
						
Функціональна поверхня	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2
Якість базової поверхні заготовки	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1
Вид головки опори	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2
Величина максимального навантаження на опору, кН	10	10	10	10	10	10
Регулювання по висоті, мм	0	20	40	5	20; 25; 30	20; 30
Регулювання по довжині, мм	40	20	40	40	40	40
Регулювання під кутом, °	0	0	0	15	0	0
Ступінь автоматизації переналагодження	0	0	0	0	0	0

Таблиця А. 8

Фрагмент таблиць рішень для вибору додаткових опор

Характеристика додаткових опор	Код та типове зображення додаткових опор						
	271	272	273	274	275	276	277
							
Функціональна поверхня	1	1	1	1	1	1	1
Якість базової поверхні заготовки	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1	0; 1
Вид головки опори	2	2	2	2	2	2	2
Величина максимального навантаження на опору, кН	0,4	9	9	1	3	2,5	10
Регулювання по висоті, мм	3	6	10	6	15	15	15
Регулювання по довжині, мм	0	0	0	0	0	0	0
Регулювання під кутом, °	0	0	0	0	0	0	0
Ступінь автоматизації переналагодження	0	0	0	0	0	0	1



Таблиця А. 10

Фрагмент таблиць рішень для вибору установлювальних пальців

Характеристика установлювальних пальців	Код та типове зображення установочних пальців					
	401	402	403	404	405	406
						
Функціональна поверхня	1; 3	1; 3	1; 3	1; 3	1; 3	1; 3
Вид установлювального пальця	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1	1
Якість базової поверхні заготовки	1	1	1	1	1	1
Мінімальний діаметр базового отвору заготовки, мм	Комплект з 8 установ- люваль- них пальців (Ø6–20)	Комплект з 10 установ- люваль- них пальців (Ø6–25)	Комплект з 14 уста- новлю- вальних пальців (Ø6–35)	Комплект з 17 установ- лювальних пальців (Ø6–50)	10	20
Максимальний діаметр базового отвору заготовки, мм					60	120
Глибина базового отвору, мм	25	30	45	65	40	50
Спосіб переналадження	1	1	1	1	2	2

Таблиця А. 11

Фрагмент таблиць рішень для вибору бокових затискних елементів

Характеристика бокових затискних елементів	Код та типове зображення бокових затискних елементів						
	101	102	103	104	105	106	107
							
Функціональна поверхня	6	6	6	6	6	6	6
Ступінь механізації процесу переналагодження	0	0	0	0	0	1	1
Діапазон регулювання, мм	7	4	5	3	10	8	8
Мінімальна висота заготовки, мм	0	0	15	25	30	5	20
Максимальна висота заготовки, мм	15	25	40	60	50	25	35
Величина максимальної сили закріплення, кН	3,5	5,0	6,5	7,0	11,0	3,5	6,0
Вага, кг	0,2	0,1	0,45	0,15	0,5	0,9	1,3

Таблиця А. 12

Фрагмент таблиць рішень для вибору немеханізованих затискних елементів

Характеристика затискних елементів	Код та типове зображення затискних елементів						
	201	202	203	204	205	206	207
							
Функціональна поверхня	6	6	6	6	6	6	6
Ступінь механізації процесу переналагодження	0	0	0	0	0	0	0
Діапазон регулювання, мм	100	95	100	15	15	50	15
Мінімальна висота заготовки, мм	0	15	20	30	40	50	60
Максимальна висота заготовки, мм	100	110	120	45	55	100	75
Величина максимальної сили закріплення, кН	5,0	3,5	5,0	6,5	8,0	8,5	3,5
Вага, кг	0,4	0,35	0,45	0,35	0,9	0,8	0,4

Таблиця А. 13

Фрагмент таблиць рішень для вибору механізованих затискних елементів

Характеристика затискних елементів	Код та типове зображення затискних елементів						
	231	232	233	234	235	236	237
							
Функціональна поверхня	6	6	6	6	6	6	6
Ступінь механізації процесу переналагодження	1	1	1	1	1	1	1
Діапазон регулювання, мм	40	40	40	40	15	40	40
Мінімальна висота заготовки, мм	0	20	40	60	70	80	100
Максимальна висота заготовки, мм	40	60	80	100	85	120	140
Величина максимальної сили закріплення, кН	7,5	10,0	7,5	9,5	8,5	10,0	8,5
Вага, кг	0,54	1,8	0,9	0,41	0,7	1,9	1,5



Наукове видання

**Карпусь** Владислав Євгенович,  
**Іванов** Віталій Олександрович,  
**Котляр** Олексій Віталійович та ін.

# **Інтенсифікація процесів механічної обробки**

Монографія

За редакцією В. Є. Карпуся

Відповідальний за випуск О. Г. Гусак  
Редактор Н. А. Гавриленко  
Художнє оформлення обкладинки Ю. В. Міненко  
Комп'ютерне верстання В. О. Іванова, О. В. Котляра

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 25,58. Обл.-вид. арк. 19,42. Тираж 500 пр. Зам. № 451

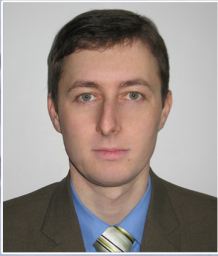
Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.



**Карпусь Владислав Євгенович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Сфера наукових інтересів: інтенсифікація процесів механічної обробки; оптимізація технологічних систем; багатомоноклітурні агрегатні верстати та агрегатні верстатні системи; багатоінструментна обробка на верстатах із ЧПК; система універсально-збірних переналаджуваних пристроїв; оптимізація обробки комбінованим осьовим інструментом.

[in www.linkedin.com/in/karpusvladislav](https://www.linkedin.com/in/karpusvladislav)



**Іванов Віталій Олександрович**, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету.

Сфера наукових інтересів: інтенсифікація процесів механічної обробки; оптимізація технологічних систем; система універсально-збірних переналаджуваних пристроїв; автоматизоване проектування верстатних пристроїв; удосконалення технологічної підготовки виробництва.

[in www.linkedin.com/in/ivanovvitalii](https://www.linkedin.com/in/ivanovvitalii)



**Котляр Олексій Віталійович**, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Сфера наукових інтересів: інтенсифікація процесів механічної обробки; багатокритеріальна оптимізація технологічних систем; багатоінструментна обробка на верстатах із ЧПК, точність багаторізевої обробки на токарних верстатах із ЧПК.

[in www.linkedin.com/in/kotliarolexii](https://www.linkedin.com/in/kotliarolexii)



**Міненко Дем'ян Олександрович**, кандидат технічних наук, асистент кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету.

Сфера наукових інтересів: інтенсифікація процесів механічної обробки основних та допоміжних отворів на багатоцільових верстатах; плазмовий розкрій металу; гравірування металевих та надтвердих композиційних матеріалів.

[in www.linkedin.com/in/minenkodemian](https://www.linkedin.com/in/minenkodemian)



**Іванова Марина Сергіївна**, асистент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Сфера наукових інтересів: інтенсифікація процесів механічної обробки; оптимізація параметрів та режимів обробки комбінованим осьовим інструментом.

[in www.linkedin.com/in/ivanovamarina](https://www.linkedin.com/in/ivanovamarina)