

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

# ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

## Частина 2

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів  
спеціальності 131 «Прикладна механіка,*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 2 [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю.В.Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,7 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.–102с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 27.02.2020 р.)  
за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 7 від 24.02.2020 р.)*

*Електронне мережне навчальне видання*

## **Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 2**

Укладачі ***Петраков Юрій Володимирович***, д-р техн. наук, проф.  
***Сохань Сергій Васильович***, д-р. техн. наук, доц.  
***Фролов Володимир Костянтинович***, канд. техн. наук, доц.  
***Кореньков Володимир Миколайович***, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор ***Петраков Юрій Володимирович***, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: ***Клименко С. А.***, д-р техн. наук, проф.

У навчальному посібнику розглянуто сучасні технологічні процеси механічної обробки деталей складної форми на сучасних верстатах з ЧПК. Розглядається методи лезової і алмазно-абразивної обробки, оброблюваність сучасних важкооброблюваних матеріалів, підходи до оцінки шорсткості оброблених деталей. Велика увага приділяється процесам оброблення деталей авіаційної промисловості, зокрема, лопаток газотурбінних двигунів. Надано технології та інструментальне забезпечення виготовлення деталей в металургійній промисловості. Звертається увага на квазістаціонарність процесів різання при виготовлення складної форми, виявляються фактори, що впливають на зношування інструментів, вивчається структура матеріалів з позицій полегшення їх механічної обробки.

Посібник допоможе студенту у підготовці до занять, самостійному виконанні контрольних завдань, оволодінні методикою проектування технологічних процесів механічної обробки деталей складної форми в рамках курсу «Процеси і технології формоутворення» у вищих інженерних та технічних вузах.

## ЗМІСТ

<i>Розділ 1. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК.....</i>	4
1.1. Математичне і технологічне забезпечення шліфування калібрів станів холодної прокатки труб.....	4
1.2. Математичне і технологічне забезпечення шліфування оправок станів холодної прокатки труб.....	18
1.3. Математичне і технологічне забезпечення шліфування канавок гайок гвинтових передач кочення.....	41
1.4. Математичне і технологічне забезпечення механічної обробки робочої поверхні колінних протезів.....	62
<i>Розділ 2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ АЛМАЗНОЇ ОБРОБКИ СПЕЦІАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ.....</i>	85
2.1. Технологія й лезовий інструмент, оснащений кіборитом для точіння фасонних поверхонь на верстатах з ЧПК.....	85
2.2. Технологічні можливості лезового інструменту, оснащеного пластинами BSN (борсініт).....	89
2.3. Технологічні можливості лезового інструменту, оснащеного алмазнокерамічними пластинами.....	90
2.4. Технологія алмазного свердління глибоких отворів у міцних й одночасно крихких матеріалах.....	94
2.5. Технологія мікроточіння дзеркальної поверхні виробів.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	99

## Розділ 1. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

### 1.1. Математичне і технологічне забезпечення шліфування калібрів станів холодної прокатки труб

Винайдений у 20-х роках ХХ століття спосіб холодної пільгерної прокатки труб дозволяє отримувати труби з малопластичних матеріалів. За час свого існування цей спосіб став основним для виробництва труб з більшості відомих металів і сплавів, через те, що він дозволяє виготовляти труби з високолегованих сталей і сплавів, багато з яких відносяться до групи таких, які важко деформуються, а виробництво традиційним способом волочіння, тобто із застосуванням різного роду волочильного інструменту, є утрудненим або взагалі неможливим. Неабияку роль у поширенні способу пільгерної прокатки труб зіграла мобільність: для переходу на прокат труби іншого розміру потрібно замінити тільки робочий інструмент.

Труби, виготовлені методом холодної пільгерної прокатки, мають високу якість і надійність, відсутність зварного шва, однорідну дрібнозернисту структуру і міцність металу по всій довжині. Такі труби використовуються в різних галузях промисловості, де працюють із агресивними середовищами, або середовищами з високими і надвисокими температурами і тисками, іншими агресивними умовами. Основні галузі застосування таких труб – це атомна та теплова енергетика; паливно-енергетичний комплекс; хімічна промисловість; всі види машинобудування, включаючи літакобудування та космічну техніку.

Виготовлення холоднодеформованих безшовних труб виконується на станах холодної прокатки труб (ХПТ) – рис. 1.1, що реалізують процес пільгерування, при якому деформування заготовки в трубу необхідного діаметру відбувається за рахунок взаємодії з робочими поверхнями калібрів і оправки, які мають складні форми

(рис. 1.2-1.3). Процес прокатки на станах ХПТ має періодичний характер, оскільки труба прокатується окремими ділянками по її довжині при зворотно-поступальному русі кліті. Початковий розмір канавки відповідає зовнішньому діаметру заготовки, кінцевий розмір – зовнішньому діаметру готової труби. Якщо деформуючі елементи пільгерування матимуть навіть незначні похибки

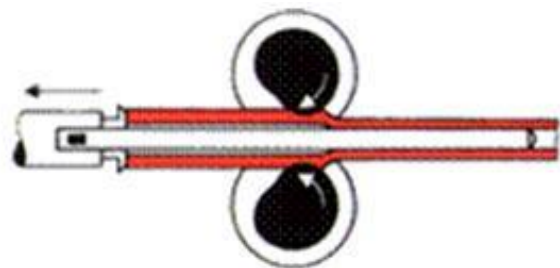


Рисунок 1.1 – Схема холодної пільгерної прокатки труб (ХПТ)

форм робочих поверхонь, то в процесі прокатки в цих місцях можуть виникнути концентрації навантажень, що призведуть до тріщин або до моментального руйнування інструменту без можливості повторного перешліфовування.

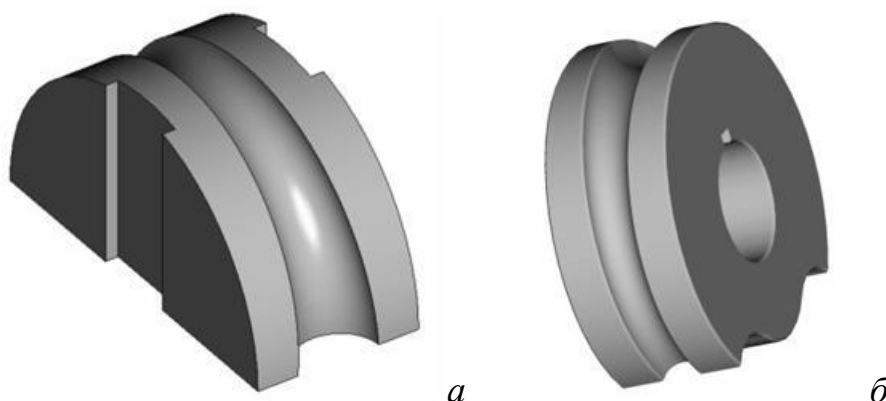


Рисунок 1.2 – Сегментний (а) і круговий (б) калібри станів ХПТ



Рисунок 1.3 – Оправка станів холодної прокатки труб

Калібр та оправка є відповідальними елементами процесу деформування. Для реалізації правильного процесу потрібно забезпечити точну форму робочої поверхні калібру та оправки з високими показниками якості. Через те, що деформація металу відбувається в холодному стані, робочий інструмент – валки і оправка – в процесі пільгерування сприймає надзвичайно великі навантаження, близько 150 тонн, і піддається постійному зношуванню. Як правило, зношені оправки і валки-калібри перешліфовують на інший типорозмір для повторного використання. Отже, умовою отримання якісних труб на стані холодної прокатки труб є зносостійкий інструмент достатньої твердості і міцності в умовах нагрівання до 150-200 °С, який має хороші показники опору згину, пружності і в'язкості, шорсткість робочої поверхні  $Ra$  0,16...0,25 мкм і точні геометричні розміри (точність до 0,05...0,06 мм). Ця вимога задовольняється застосуванням сталі відповідних марок та її термічною обробкою, а шорсткість поверхні і точність розмірів досягаються шліфуванням і поліруванням робочих поверхонь інструменту.

З моменту виникнення способу холодної пільгерної прокатки труб велика увага приділялася калібруванню інструмента. Завданням калібрування є визначення геометричної форми і розрахунок розмірів оправки і калібру, які забезпечують основні показники процесу для конкретного прокатного стану і металу, що деформується.

Методика калібрування постійно розвивалася і вдосконалювалася, наслідком чого став спосіб так званого калібрування пропорційних обтиснень (КПО) з використанням оправок з криволінійною утворюючою калібрування, який було розроблено в Трубному інституті у Дніпропетровську. Однак стримуючим фактором поширенню застосування способу КПО з використанням оправок з криволінійною утворюючою калібрування стало відсутність на трубних заводах обладнання для їх виготовлення.

Спосіб калібрування пропорційних обтиснень признаний винаходом і захищений авторським свідоцтвом № 1823251 і патентом України № 9919 (1990 г.), за яким поточний діаметр профілю оправки описується формулою:

$$d_x = d_o + (d_{\delta} - d_o - \alpha_{\min} l_o) \cdot \left(\frac{x}{l_o}\right)^n + \alpha_{\min} x, \quad (1.1)$$

де  $D_o$  – умовний діаметр канавки в кінці його робочої частини;  $d_o$  – діаметр оправки (в кінці робочої частини канавки калібру),  $\alpha_{\min}$  і  $\gamma_{\min}$  – мінімальна конусність канавки і оправки,  $l$  – довжина зони обтиску;  $x$  – координата довжини зони обтиску;  $n$  – показник степеню, який визначає крутизну профілю гребня канавки і оправки;  $d_u$  – діаметр циліндричної частини оправки.

Оправка стану ХПТ представляє собою більш просту ніж калібр деталь типу тіла обертання з лінійною або криволінійною утворюючою. Обов'язковими конструктивними елементами оправки є хвостова частина з різьбою для кріплення оправки до стрижня, перехідна циліндрична частина, власне робоча частина з криволінійною або прямолінійною утворюючою і різьбовий отвір для кріплення подовжувача, який задіяний у системі попередження поломки валків ХПТ. Оправки станів ХПТ мають жорсткі вимоги по точності (допуск на діаметр робочої частини  $\pm 0,03$  мм) та якості поверхні ( $Ra 0,16$  мкм).

В якості матеріалу для виготовлення оправок широкого використання набули сталі 60С2ХФА, Bohler S690, рідше 4Х5МФС. Інколи як замітник 4Х5МФС можуть застосовувати 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС. Хімічний склад сталей наведено у табл. 1.1.

**Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей для виготовлення оправки станів ХПТ**

Марка сталі	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S	V
60С2ХФА	0.56-0.64	1.4-1.8	0.4-0.7	< 0.25	0.9-1.2	< 0.2	< 0.025	< 0.025	0.1-0.2
S690	≤ 0.2	≤ 0.8	≤ 1.2	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.12
4Х5МФС	0.32-0.4	0.9-1.2	0.2-0.5	< 0.35	4.5-5.5	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.3-0.5
4Х5В2ФС	0.35-0.45	0.8-1.2	0.15-0.45	< 0.35	4.5-5.5	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.6-0.9
4Х4ВМФС	0.37-0.44	0.6-1.0	0.2-0.5	< 0.35	3.2-4.0	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.6-0.9

Перша з них – це конструкційна ресорно-пружинна сталь. Друга – це універсальна порошкова швидкорізальна сталь. Останні – це інструментальні шта-

мпові сталі, що використовують як інструмент при гарячому деформуванні конструкційних сталей і кольорових сплавів. Інструмент з цих марок сталей показав високу стійкість і твердість при відповідній термічній обробці (Сталь 60С2ХФА, твердість HRC 54...58; Сталь S 690 BOHLER, твердість HRC 58..64 тощо).

#### Технологія виготовлення канавок калібрів стану ХПТ.

Оскільки калібри, як відповідальна частина в технологічному процесі виготовлення холоднокатаних труб, який здійснюється в умовах підвищених навантажень, постійно зношуються, робоча поверхня калібрів потребує постійного відновлення.

Високі вимоги до точності форми і якості поверхневого шару вимагають застосування абразивних видів обробки, які виконуються інструментом спеціальної форми і на верстатах зі спеціальною кінематикою формоутворюючих рухів. Проблемами, що виникають під час обробки шліфуванням поверхні канавки калібру стану ХПТ, є необхідність створення певної системи рухів формоутворення поверхні канавки однопрофільним шліфувальним кругом, а також зміна геометричних параметрів шліфувального круга внаслідок правки.

Особливостями, що відрізняють фінішне шліфування робочої поверхні калібру від інших типів шліфувальних процесів, є:

- необхідність застосування багатокординатної оброблюваної системи;
- багатопрхідність обробки;
- нерівномірність припуску за проходами.

Ці особливості обумовлюють суттєву нестаціонарність процесу обробки і виникнення похибки обробки, що не дає можливості отримання потрібних якісних і геометричних показників профілю робочої поверхні калібру. Сегментний і круговий калібри станів ХПТ показані на рис. 1.2, вигляд калібрів у зношеному стані – на рис. 1.4, вигляд початку і закінчення канавки калібру під час шліфування – на рис. 1.5.



Рисунок 1.4 – Калібри зі зношеними робочими поверхнями

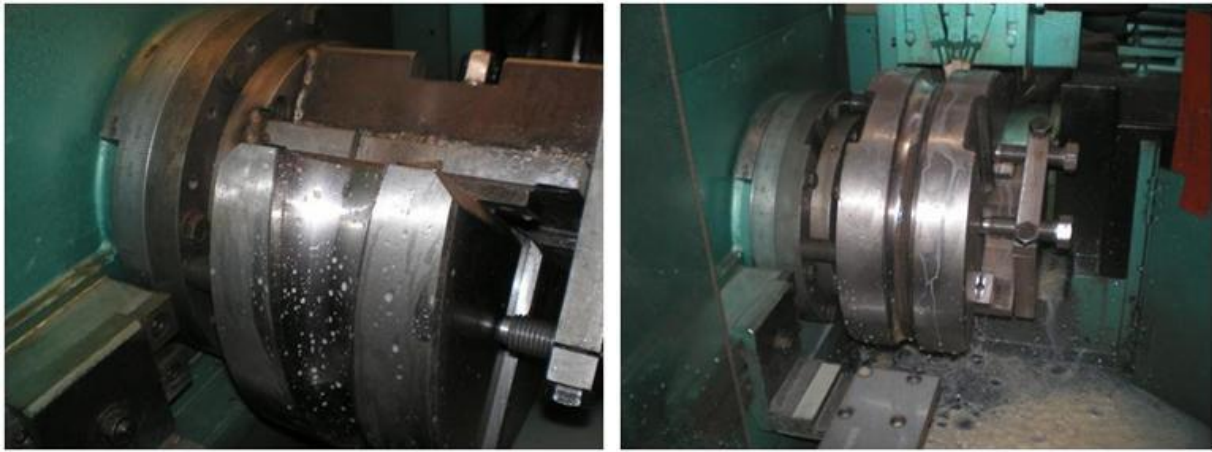


Рисунок 1.5 – Шліфування канавки калібру

Нерівномірність величини припуску обумовлює складний характер розмірного зносу шліфувального круга, а багатокоординатність оброблювальної системи вимагає використання спеціальних схем формоутворення.

З появою шліфувальних верстатів з ЧПК завдання формоутворення вирішується на рівні можливостей верстата (рис. 1.6), проте залишається науково-технічна проблема технологічної підготовки виробництва, створення засобів автоматичної підготовки управляючих програм для таких верстатів. Верстати для формоутворення складнопрофільних робочих поверхонь канавок калібрів станів ХПТ мають спеціальну кінематику, що виключає можливість використання відомих САМ--систем (Computer Aided Manufacturing), призначених для формоутворення в заданих «стандартних» системах координат верстатів з ЧПК, а спеціальних САМ--систем не існує.

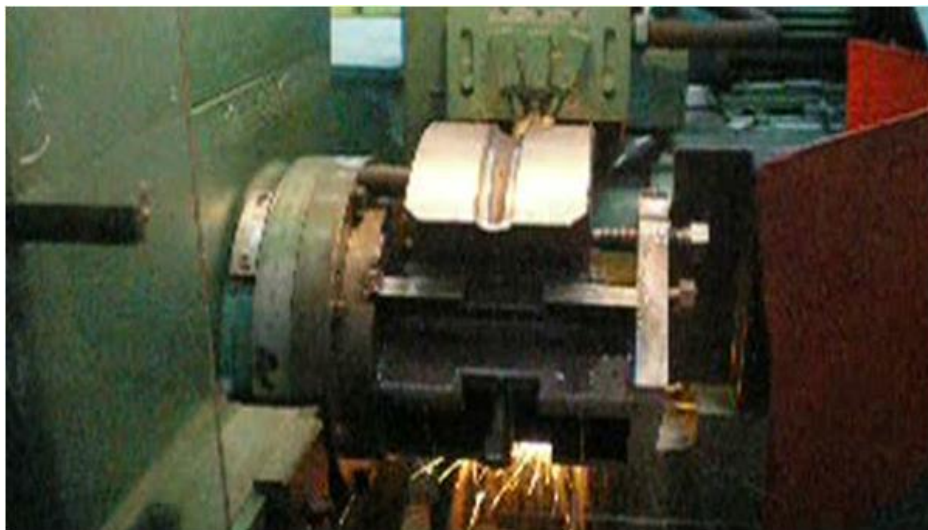


Рисунок 1.6 – Фінішна абразивна обробка робочої поверхні калібру

Як правило, відомі САМ- системи, які підтримують багатокоординатне формоутворення, спрямовані на лезову обробку і мають слабкий зв'язок схем



формування з кінематичними схемами спеціальних верстатів. Тому і виникла необхідність розробки спеціальної САМ- системи шліфування калібрів станів ХПТ, що дозволила б просту реалізацію підготовки управляючих програм для спеціального верстата з ЧПК у виробничих умовах.

Таким чином, створення системи автоматичного програмування (інтегрованої САД/САМ- системи) процесу шліфування калібрів станів ХПТ на верстатах з ЧПК є актуальною науково-технічною проблемою, яка успішно вирішена співробітниками кафедри технології машинобудування НТУУ "КПІ".

Для вирішення проблеми створення системи автоматичного програмування процесу шліфування калібрів станів ХПТ на верстатах з ЧПК необхідно було вирішити такі завдання:

1. Обґрунтувати необхідність застосування спеціальної кінематики формування для шліфування профілів калібрів станів холодної прокатки труб.

2. Розробити методику представлення 3D- поверхні калібру, незалежно від форми поперечного перетину, у вигляді дискретного чисельного масиву, придатного для моделювання на ПК.

3. Розробити математичну модель формування профілю калібру на 4-осьовому верстаті з ЧПК шліфувальним кругом у формі тору.

4. Розробити методику проектування траєкторій за всіма керованими осями верстата при холостих рухах.

5. Створити модуль САД/САМ- системи для автоматизації підготовки керуючої програми 4-координатного шліфувального верстата з ЧПК, що реалізує запропоновану технологічну схему зрізання припуску.

6. Розробити практичні рекомендації по використанню створеного модуля технологічної підготовки шліфування профілів калібрів станів ХПТ для реальних умов виробництва.

Для вирішення цих завдань проведено теоретичні дослідження, спрямовані на аналіз існуючих типів профілів робочих поверхонь станів ХПТ, визначення вимог до математичних моделей профілів калібрів, розробку математичних моделей поперечних перетинів профілів калібрів, визначення процедур згладжування вихідних даних, визначення параметрів для створення модуля САД- системи підготовки даних.

Вихідною інформацією для підготовки технологічних процесів обробки шліфуванням є модель робочої поверхні калібру стану ХПТ. Робоча поверхня калібру стану ХПТ може бути представлена у вигляді набору поперечних перетинів, що розташовуються на певній кривій (яка представляє собою повздовжній перетин калібру по дну канавки).

Аналіз типів поперечних перетинів, які використовуються в сучасних станах ХПТ показав, що найчастіше застосовують наступні типи поперечних пере-

тинів (рис. 1.7): а) – еліпсний профіль; б) – профіль, утворений дугами кіл з двома радіусами; в) – радіусний профіль з розвалом по прямій; г) – радіусний профіль з ексцентриситетом

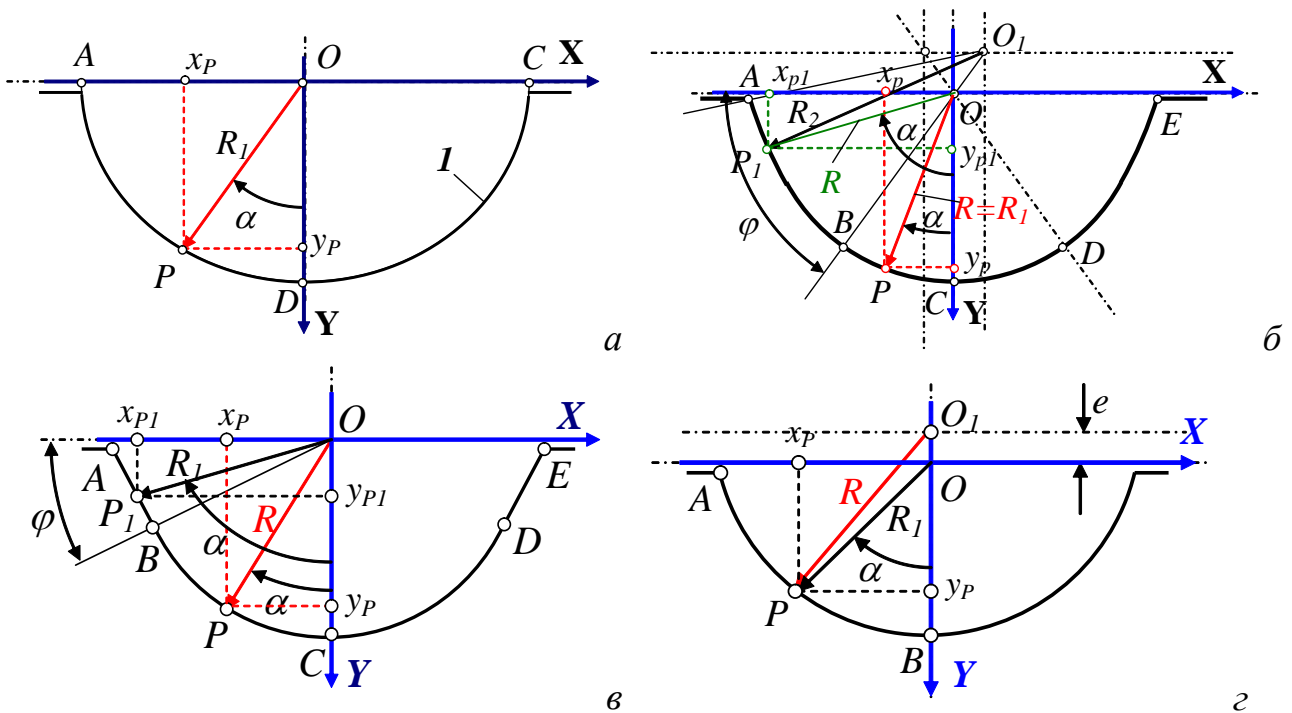


Рисунок 1.7 – Типи поперечних профілів калібру: еліпсний (а), утворений дугами окружностей з двома радіусами (б), радіусний з розвалом по прямій (в), радіусний з ексцентриситетом (г)

Для згаданих типів поперечних перетинів 3D- поверхня канавки калібру представлена у вигляді тривимірних числових масивів, що створені для повздовжнього перетину по дну канавки та поперечних перетинів відповідно до прийнятого кроку зміни перетину за допомогою спеціальних розрахункових програм.

Для створення цифрової моделі канавки, що має еліпсний профіль у поперечному перетині (рис. 1.7, а) були використані наступні залежності:

$$x = R \sin \alpha, \quad y = R \cos \alpha, \quad (1.2)$$

де полярний радіус визначається за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{B^2 H_p^2}{H_p^2 \sin^2 \alpha + B^2 \cos^2 \alpha}}. \quad (1.3)$$

Для поперечного перетину, утвореного двома дугами з радіусами (рис. 1.7, б), були розроблені дві математичні моделі. На ділянки BC (і CD) координати точки P профілю визначаються простими співвідношеннями у функції полярного кута  $\alpha$ :

$$\begin{cases} x_p = R_1 \sin \alpha \\ y_p = R_1 \cos \alpha \end{cases}, \quad (1.4)$$

На ділянці АВ (і DE) координати точки  $P_1$  профілю визначаються з геометричних співвідношень і представляються такою ж системою рівнянь, проте радіус  $R_1 = R$  і обчислюється за формулою:

$$R = \sqrt{R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 - 2R_2(R_2 - R_1)\cos(\angle P_1O_1B)}, \quad (1.5)$$

де кут  $P_1O_1O$ :

$$\angle P_1O_1B = (\varphi \mu \alpha) - \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[ \frac{R_1 - R_2}{R_2} \cos(\varphi \mu \alpha) \right]. \quad (1.6)$$

За таким принципом розроблено математичні моделі для всіх профілів, наведених на рис. 1.7, які надають можливість розрахувати числові тривимірні масиви, та створити цифрову модель 3D-поверхні канавки калібру.

Для перевірки якості створених таким чином математичних моделей та, за необхідності, проведення згладжування вхідних даних було розроблено алгоритм згладжування, узагальнена схема якого представлена на рис. 1.8. Згладжування виконується за першими похідними відповідно до залежності:

$$\mathcal{A}_{i+1} = (\mathcal{A}_i + 2\mathcal{A}_{i+1} + \mathcal{A}_{i+2})/4, \quad (1.7)$$

де  $\mathcal{A}$ ,  $\mathcal{A}$  – перші похідні: вихідне значення і нове, розрахункове значення відповідно,  $i$  – номер вузла.

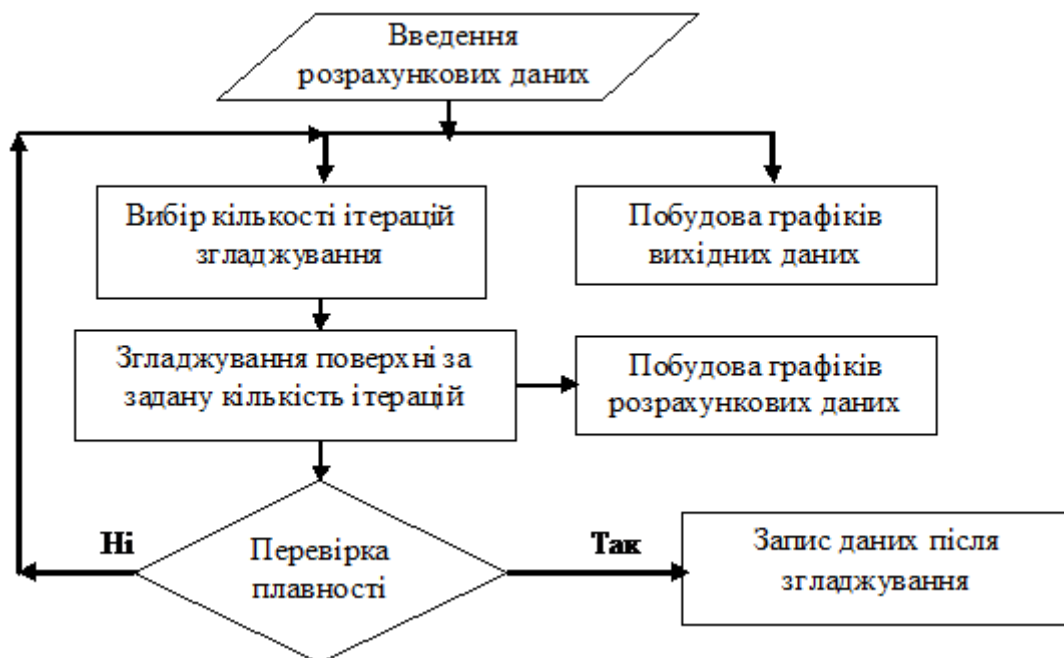


Рисунок 1.8 – Алгоритм згладжування розрахункових даних

Далі виконується відновлення функції за розрахованими значеннями похідних. Обчислювальний процес повторюється відповідно до заданої кількості

ітерацій. Запропонований алгоритм, що реалізований у формі програмного модуля, надає можливість візуалізувати результати згладжування у вигляді графіків, причому існує можливість представити одночасно старі й нові значення по функціям, першій і другій похідним.

Таким чином виконано завдання представити 3D- поверхню канавки калібру, незалежно від форми поперечного перетину у вигляді, придатному для комп'ютерного моделювання. Представлена в табличному вигляді така 3D- поверхня дає можливість при подальшому моделюванні використовувати однако-ві числові процедури незалежно від первинної геометричної інформації.

Після обробки вихідної розрахункової інформації по профілю калібру необхідно ввести вхідну інформацію по інструменту, та оцінити можливість формоутворення заданого профілю канавки калібру інструментом із заданими характеристиками. Ця задача теж відноситься до геометричної задачі і її рішення є обов'язковим для визначення максимально допустимого радіусу округлення шліфувального круга у вигляді тору, причому рекомендовано обирати якомога більший розмір для відповідної продуктивності та стійкості. Завдання вирішено через процедуру визначення масивів радіусів кривизни перетину профілю і оцінку можливості обробки кругом заданого радіуса. При наявності колізій програма автоматично визначає максимально допустимий радіус заокруглення.

Для формоутворення робочих поверхонь калібрів станів ХПТ використовують два варіанти – 4- або 5-координатна схема. 5-координатна схема обробки використовується на верстаті типу GG-52, а 4-координатна схема – на верстаті ЛЗ-250Ф3 (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – 4-осьовий спеціальний шліфувальний верстат з ЧПК мод. ЛЗ-250Ф3

Спеціальна кінематика формоутворення для шліфування робочих поверхонь калібрів станів холодної прокатки труб, повинна мати, як мінімум, чотири координати, що управляються: координата  $C$  – обертання заготовки, координати  $X, Y$  – лінійне переміщення, координата  $A$  – поворот шліфувального круга.

Розповсюдження процесу формоутворення на всю оброблювану поверхню відбувається за рахунок багатопрохідної обробки при зсуві формоутворюю-

чої траєкторії за еквідистантою до перетину профілю із заздалегідь вибраним кроком зміни полярного кута  $\alpha$  перетину профілю.

Для 4-координатної схеми формоутворення проаналізовано можливі стратегії обробки з урахуванням можливостей сучасних верстатів з ЧПК, визначено найсприятливіші варіанти стратегій обробки та розроблено математичну модель кінематичної взаємодії шліфувального круга і деталі (рис. 1.10).

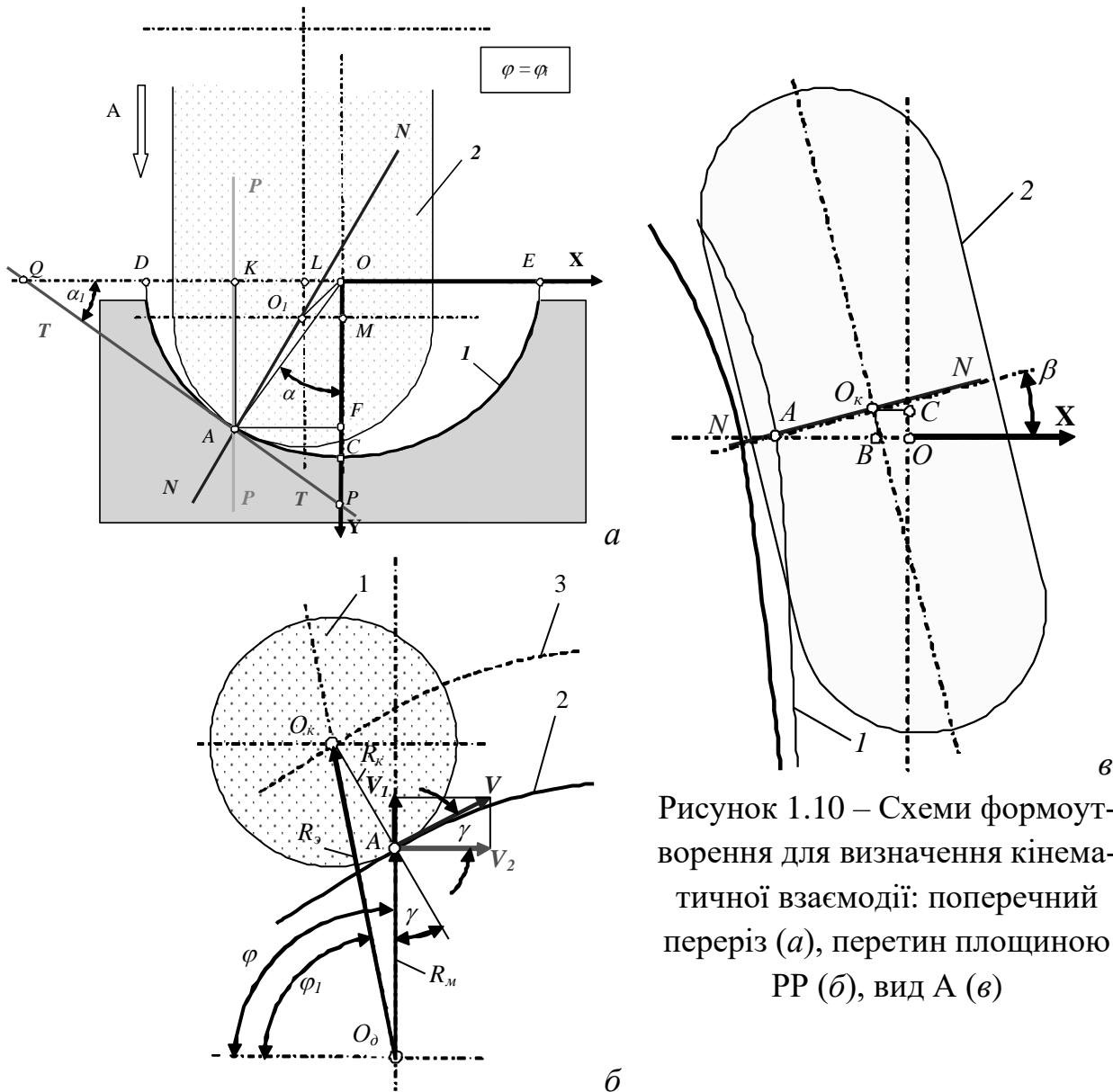


Рисунок 1.10 – Схеми формоутворення для визначення кінематичної взаємодії: поперечний переріз (а), перетин площиною PP (б), вид А (в)

Шліфувальний круг 1 при обробці профілю канавки має бути розташований за нормаллю до профілю. Так, для будь-якої точки  $A$  на рис. 1.10, а показано положення нормалі  $NN$  на якій має бути розташований центр  $O_l$  круга радіусом  $R_k$ . Отже, координати центра округлення шліфувального круга:

$$\begin{cases} x_k = x_A - R_k \sin \alpha_1 \\ y_k = y_A - R_k \cos \alpha_1 \end{cases} \quad (1.8)$$

де кут  $\alpha_1$  нахилу дотичної визначається за формулою:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \left( \frac{H_P^2}{x_A y_A} - \frac{y_A}{x_A} \right). \quad (1.9)$$

Радіус-вектор  $R_e$  визначається за схемою рис. 1.10, б:

$$R_e = \sqrt{R_m^2 + R_k^2 + 2R_m R_k \cos \gamma}, \quad (1.10)$$

де кут  $\gamma$  тиску розраховується за планом швидкостей:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{dR_m / d\varphi}{R_m}. \quad (1.11)$$

Зі схеми взаємодії на рис. 1.10, в видно, що шліфувальний круг 1, який, за умовами формоутворення і не підрізання профілю, обробляє траєкторію 1 на профілі канавки калібру. Кут  $\beta$  нахилу нормалі до осі X у будь-якій точці траєкторії, що обробляється, можна розрахувати за залежністю:

$$\beta = \arcsin \left( \frac{dx / d\varphi}{\delta D} \right), \quad (1.12)$$

де  $\delta D$  – прирощення дуги траєкторії за крок зміни полярного кута  $\varphi$ .

Поворот шліфувального круга відповідно до нормалі до траєкторії обробки викликає зміну координати  $x$  і полярного кута координати  $R_e$ . З геометричних співвідношень рис. 1.10, б з урахуванням (1.8) отримані відповідні поправки:

$$x_k = x_A - R_k \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta, \quad (1.13)$$

а зміна  $\delta\varphi_1$  полярного кута координати  $R_e$  в додаток до залежності (1.10) для  $\delta\varphi$  має вигляд:

$$\delta\varphi_1 = \frac{R_k \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta}{R_\delta}, \quad (1.14)$$

де  $R_\delta$  – радіус деталі в точці обробки.

При розрахунках за приведеним алгоритмом для кожного перетину профілю канавки, при умові задавання функції  $R_m(\varphi)$  у вигляді таблиці з рівномірним кроком зміни полярного кута  $\varphi$ , вихідні функції формоутворення  $R_e(\varphi_1)$  і  $x_k(\varphi_1)$  розраховуються з нерівномірним кроком зміни полярної координати  $\varphi_1$ . Тому, перед формуванням файлу CLDATE, виконується процедура інтерполювання, яка забезпечує представлення вихідних функцій з рівномірним кроком зміни аргументу.

Оскільки функції формоутворення залежать від радіусу шліфувального круга, який змінюється в процесі правки, була використана спеціальна методика оцінки похибки формоутворення при відхиленні радіусу круга від розрахункового значення за всім профілем та методика урахуванням зміни радіуса шліфувального круга при формуванні керуючої програми на верстат з ЧПК.

Таким чином, виконано наступне завдання: розробити математичну модель формоутворення профілю калібру на 4-координатному верстаті з ЧПК шліфувальним кругом у формі тору.

При застосуванні стратегії зрізування припуску, що передбачає безперервне обертання заготовки, виникає питання щодо формування законів руху за всіма координатами, що управляються, на холостому відрізку траєкторії формоутворення. Оскільки на такій ділянці траєкторії різання і відповідно формоутворення не відбувається, можна обирати будь-яку траєкторію руху. Проте, виходячи з мінімізації динамічних навантажень приводів верстату з ЧПК, необхідно забезпечити максимальну плавність руху, яка оцінюється за мінімальним значенням другої похідної – прискорення. Отже, оптимальною буде траєкторія, яка має найменше значення другої похідної і не має розривів законів руху.

У відповідності до прийнятого початку координат на верстаті та напрямку формоутворюючих рухів, на рис. 1.11 представлений фрагмент траєкторії за координатою  $Z$  та її параметри (перша  $dZ/d\varphi$  та друга  $d^2Z/d\varphi^2$  похідні) в кінці та на початку ділянок формоутворюючих рухів. При постійній швидкості зміни координати  $\varphi$  такі похідні прямо пропорційні швидкості та прискоренню руху за відповідною координатою.

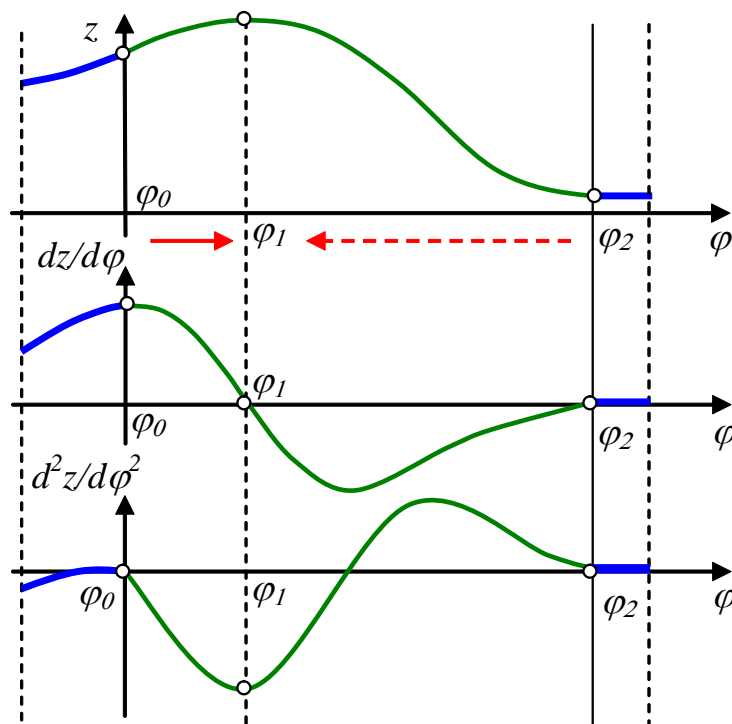


Рисунок 1.11 – Траєкторія холостого руху та її параметри

Проведений аналіз траєкторій показав, що найкращий за мінімумом другої похідної та максимальній плавності зміни буде рух за траєкторією, яка складається з двох законів: на ділянці траєкторії з кутом від  $\varphi_0$  до  $\varphi_1$  – за простим

гармонічним законом, на ділянці з кутом від  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$  – за подвійним гармонічним законом.

Отже, закон руху на першій ділянці визначається за такою формулою:

$$z = \frac{2\varphi_1(z_v)_n}{\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_1} + z_n, \quad (1.15)$$

де  $z_n$ ,  $(z_v)_n$  – величини переміщення і швидкості за координатою на початку траєкторії.

Відповідно, закон руху на другій ділянці:

$$z = \frac{3(z_v)_n \delta\varphi^2}{8\pi\varphi_1} - \frac{(z_v)_n \delta\varphi^2}{4\pi\varphi_1} \cos \frac{\pi\varphi}{\delta\varphi} + \frac{(z_v)_n \delta\varphi^2}{8\pi\varphi_1} \cos \frac{2\pi\varphi}{\delta\varphi} + z_k. \quad (1.16)$$

де  $z_k$ , – величина переміщення за координатою в кінці траєкторії.

Аналогічно виконується розрахунок траєкторій за іншими координатами, що управляються. Алгоритм передбачає визначення цифрових масивів, які представляють файл CLDATA також за всіма координатами, що управляються.

Таким чином, вирішено чергове завдання розробити методику проектування траєкторій за всіма керованими осями верстата при холостих рухах, виходячи з мінімізації динамічних навантажень приводів верстату з ЧПК.

Для вирішення завдання технологічної підготовки процесу шліфування робочої поверхні калібру на верстаті з ЧПК необхідною є спеціальна інтегрована CAD/CAM- система. Для цього на основі наведених математичних залежностей і алгоритмів розроблені програмні модулі в середовищі програмування *Borland Delphi*. Крім того, запропоноване програмне середовище дозволило спроектувати програмні продукти в модульному вигляді, що стало у потребі при визначенні початкових умов проведення поточних розрахунків характеристик процесу шліфування.

При створенні спеціальної CAD/CAM- системи шліфування робочих поверхонь калібрів станів ХПТ запропоновано призначати режими різання через швидкості зміни координат та їхню дискретизацію. Це дозволило формувати файл керуючої програми у вигляді дискретного масиву траєкторій обробки по кожній координаті верстату.

*Модуль CAD-системи підготовки даних.* В модулі виконується згладжування вихідних даних в інтерактивному режимі за допомогою створеного програмного забезпечення, що реалізує алгоритм згладжування, представлений на рис. 1.8. Результати функціонування такого модуля при проектуванні вихідних даних 3D-поверхні канавки калібру ХПТ-90 представлені на рис. 1.12.

Таким чином, у CAD- модулі вирішується завдання аналізу та корекції розрахункових даних, а також створення цифрової моделі робочої поверхні калібру стану ХПТ.



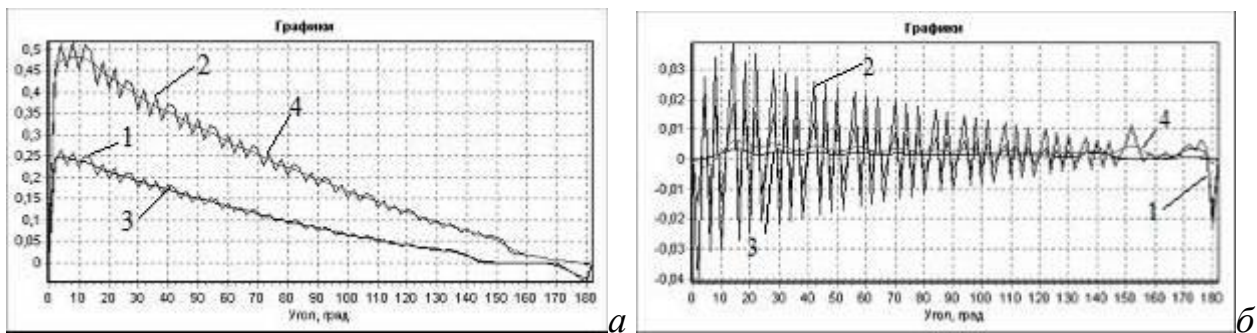


Рисунок 1.12 – Результати розрахунку і згладжування початкових даних:  
а) – перші, б) – другі похідні відповідно

*Модуль САМ- системи проектування управляючої програми.* В створеній САМ- системі ключову роль відіграє модуль моделювання, оскільки саме в цьому модулі фактично створюється файл траекторій формоутворення, який потім користувач зберігає у відповідному форматі для отримання G-кодів. Модуль моделювання має зручний інтерфейс (рис. 1.13) з відповідними системами захисту від введення неправдивої інформації щодо параметрів інструмента і дозволяє технологу-програмісту візуально відслідковувати весь процес моделювання у спеціальному графічному вікні, де відтворюються всі рухи формоутворення. Причому анімація відбувається в режимі *online* за результатами розрахунку процедур, що утворюють файл управління.

Результатом моделювання є автоматично створений файл CLDATE траекторій формоутворення, на основі якого на наступних етапах формується управляюча програма. Розроблена САМ- система містить у собі також різні модулі перевірки створеного автоматично файлу CLDATA в інтерактивному режимі за траекторіями формоутворення будь-якої координати. Аналіз виявлених відхилень дозволяє технологу-програмісту знайти причину і прийняти вірне рішення.

Таким чином, вирішено чергове завдання створити модуль САМ-системи для автоматизації підготовки керуючої програми 4-координатного шліфувального верстата з ЧПК.

В результаті експлуатації створеної інтегрованої САМ- системи протягом двох років на діючому виробництві підтверджена висока ефективність при технологічній підготовці виробництва (скорочення часу на порядок) і забезпечення вимог до точності і якості обробленої поверхні канавки калібрів.

Для перевірки точності і якості формоутворення, яка забезпечується відповідним управлінням за автоматично спроектованою програмою були виконані відповідні вимірювання оброблених канавок калібрів. Глибина канавки калібру в базових перетинах контролювалася на верстаті за допомогою спеціального пристрою.

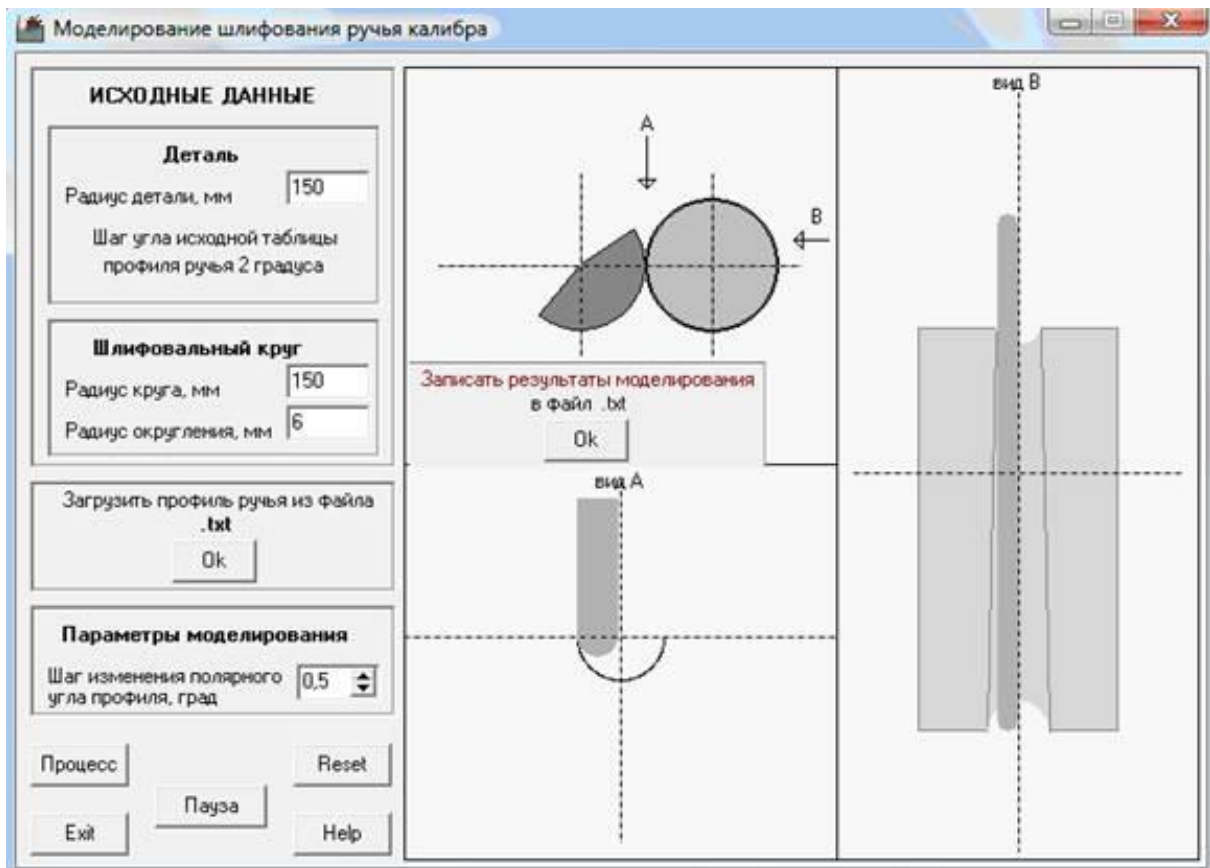


Рисунок 1.13 – Интерфейс модулю моделювання процесу формоутворення робочої поверхні калібру стану ХПТ (сегментний калібр)

Результати вимірювань довели відповідність кресленням з урахуванням допусків отриманих в результаті обробки розмірів в контрольних перетинах. Максимальне зафіксоване відхилення складало не більше  $\pm 0,01$  мм, що повністю задовольняє технічним вимогам.

Використання спеціальної САМ- системи та запропонованих в САМ- системі схем формоутворення при шліфуванні робочих калібрів станів ХПТ дозволило підвищити продуктивність обробки на 30-50%.

Таким чином, вирішена важлива науково-технічна проблема технологічної підготовки формоутворення шліфуванням 3D- поверхонь калібрів станів холодної прокатки труб на верстатах з ЧПК шляхом розроблення інтегрованої САД/САМ- системи, що забезпечує автоматичне генерування керуючої програми.

## 1.2. Математичне і технологічне забезпечення шліфування оправок станів холодної прокатки труб

Як показано у розділі 1.1, виготовлення холоднодеформованих безшовних труб виконується на станах холодної прокатки труб (ХПТ), що реалізують

процес пільгерування (рис. 1.1), при якому деформування заготовки в трубу необхідного діаметру відбувається за рахунок взаємодії з робочими поверхнями калібру і оправки, які мають складні форми (рис. 1.2-1.3). Через те, що деформація металу відбувається в холодному стані, робочий інструмент – калібр і оправка – в процесі пільгерування сприймає надзвичайно великі навантаження, близько 150 тонн, і піддається постійному зношуванню. Умовою отримання якісних труб на стані холодної прокатки труб є зносостійкий інструмент достатньої твердості і міцності в умовах нагрівання до 150-200 °С, який має хороші показники опору згину, пружності і в'язкості, шорсткості робочої поверхні.

З моменту виникнення способу холодної пільгерної прокатки труб велика увага приділялася калібруванню інструмента. Завданням калібрування є визначення геометричної форми і розрахунок розмірів оправки і калібру як відповідальних елементів даного процесу, які забезпечують основні показники процесу для конкретного прокатного стану і металу, що деформується.

#### Особливості виготовлення деталей малої жорсткості.

Оскільки за своїми геометричними параметрами оправка стану ХПТ відноситься до деталей малої жорсткості (відношення довжини до діаметру оправки складає більше 10), розглянемо коротко особливості механічної обробки маложорстких деталей.

Так звані маложорсткі деталі, які характеризуються великим відношенням довжини до діаметра (або площі поперечного перерізу) зустрічаються в різних галузях машинобудування. Обробка різанням таких деталей завжди викликає труднощі, пов'язані з неможливістю застосування стандартних режимів різання, з проблемами отримання необхідної точності та якості обробленої поверхні. Такі проблеми обумовлені суттєвим зниженням жорсткості технологічної обробляючої системи (ТОС), що навіть при невеликих силах різання призводить до виникнення значних пружних деформацій ТОС, які супроводжуються коливальними процесами і виникненням огранювання, хвилястості та інших дефектів обробленої поверхні деталі. Крім того, вісь деталі може бути легко викривлена внаслідок перерозподілу внутрішніх напружень після зрізування кожного шару металу. Найбільш часто такі проблеми виникають при обробці маложорстких деталей, які мають складну форму (лопатки газотурбінних двигунів, оправки станів ХПТ, некруглі вали тощо).

Як для процесів лезового, так і абразивного різання, 90% сумарної похибки при обробці нежорстких валів виникає через пружні деформації заготовок. Пружні деформації виникають під впливом нестабільності сил різання і жорсткості елементів технологічної системи внаслідок коливання твердості матеріалу деталі, нерівномірності припуску, вихідної похибки і жорсткості вала по довжині обробки, зміни в часі різальних властивостей шліфувального круга і ре-

жимів різання. Змінна по довжині вала жорсткість призводить до відхилення форми від циліндричності (бочкоподібність). Прагнення до зменшення цієї похибки вимагає зниження режимів обробки і, зокрема, поперечної подачі (глибини різання). Однак призначати завідомо малі (менше 0,005 мм) поперечні подачі не є слушним, оскільки це призводить до виникнення вібрацій, до втрати точності в поперечному перерізі і до зниження продуктивності.

Відомі різні способи та прийоми зниження величини пружних деформацій і амплітуди коливань при обробці маложорстких деталей. Більшість з них зводиться до застосування спеціальних верстатних пристроїв, зокрема люнетів, для підвищення жорсткості ТОС. При цьому схема установки люнетів, їх конструкція, характер закріплення, вибір технологічних баз має вирішальний вплив на продуктивність та точність обробки діаметральних розмірів валу. З точки зору вибору конструкції і місця встановлення люнетів, а також їх налаштування, найбільш зручною є обробка маложорстких валів у центрах.

#### Технологія виготовлення оправок стану ХПТ.

Поковки для оправок піддають поліпшенню (нагрівання до 880-900 °С з охолодженням у маслі до 550-600 °С з подальшим високотемпературним відпуском при 710-720 °С) або відпалу, який окрім зменшення твердості, сприяє зняттю напружень в металі і покращує його структуру. Метал поковок після первинної термообробки повинен мати твердість не вище *HRC* 22 і структуру, що складається з глобул цементиту, розташованих у фериті.

Первинну механічну обробку оправок проводять в центрах на токарних верстатах до розмірів, відповідних розрахунковим даним калібрування з припуском по діаметру на шліфування: при діаметрі до 70 мм 0,8-1,0 мм; понад 70 мм 2,0-2,5 мм. Вона полягає в центруванні, проточці хвостовика під нарізання різьби, проточці циліндричного і конічного ділянок та перехідної частини, а також фрезеруванні граней під ключ, часто ці ділянки об'єднують в одну конічну поверхню. На поверхні оправки не повинно бути глибоких рисок, уступів, а в середині оправки чорновин (руйнування по серцевині).

Після первинної механічної обробки оправки піддають у вертикальному положенні загартуванню та відпуску за певним режимом з нагріванням перед загартуванням до 860-870 °С, а більш великих розмірів – до 820-840 °С і відпуску при 240-260 °С. Твердість робочої частини оправки після відпуску має бути в межах *HRC* 52-64, а хвостовій частині *HRC* 25-35.

Після фінішної механічної обробки на робочій поверхні оправки не допускаються уступи (дроблення), риси, припали. Тобто вимоги щодо якості та точності робочої поверхні твердістю *HRC* 52-64 дуже високі. Насамперед це визначає тип обробки і майже виключає можливість використання лезової обробки на фінішних операціях. А найбільш доцільним для остаточної обробки опра-

вки станів ХПТ є застосування абразивної обробки шліфуванням. Отже, зважаючи на велику твердість ( $HRC\ 56-64$ ), точність профілю  $\pm 0,03\text{мм}$ , шорсткість  $Ra\ 0,16$ , немає альтернативи обробці робочої поверхні шліфуванням. Тому термічно оброблені оправки шліфують і полірують, а в окремих випадках ще і хромують.

Лінійно-конусні оправки шліфують в центрах на звичайних круглошліфувальних верстатах. Проте, робоча поверхня оправки, що має круглий поперечний переріз але з криволінійною утворюючою, не дозволяє використовувати лонети традиційної конструкції. Тому оправки з криволінійною твірною в поперечному перерізі (зміна діаметру за довжиною оправки) рекомендовано шліфувати на круглошліфувальних верстатах з ЧПК, а проблема підвищення жорсткості оправок станів ХПТ і всієї технологічної обробляючої системи (ТОС) в процесі шліфування потребує додаткового вирішення.

Схема шліфування оправки з криволінійною твірною на круглошліфувальному верстаті з ЧПК зображена на рис. 1.14. Форма вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга, при такій схемі шліфування, виконується за дугою кола радіуса  $R_s$ . Вона має ряд переваг: скорочення часу переналадки верстату, можливість обробки оправок як з криволінійною так і з лінійно конусною твірними, реалізація будь-якого управління верстатом системою ЧПК.

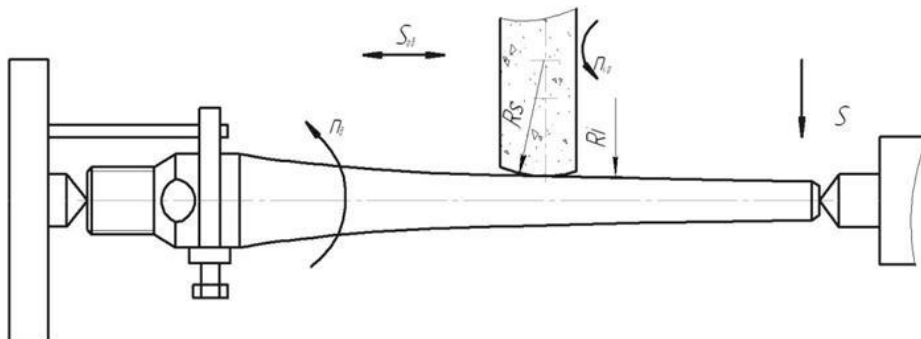


Рисунок 1.14 – Схема шліфування оправок з криволінійною твірною

Для шліфування оправок з криволінійною твірною придатні круглошліфувальні верстати з ЧПК, присутні на вітчизняному ринку. Це, в першу чергу,



Рисунок 1.15 – Верстат 3B130F4, виробництво Україна

круглошліфувальні верстати з ЧПК вітчизняного виробництва, наприклад, моделі 3K152BФ20 (рис. 1.15) виробництва ВАТ Харківський верстатобудівний завод «ХАРВЕРСТ» (м. Харків), або моделі 3B130Ф4 виробництва ВАТ Лубенський верстатобудівний завод «ШЛІФВЕРСТ» (м. Лубни). Основні характеристики верстатів наведено у табл. 1.2.

**Таблиця 1.2 – Основні характеристики круглошліфувальних верстатів з ЧПК**

Характеристики	Модель верстата	
	3В130Ф4	3К152ВФ20
Макс. розміри заготовки в центрах, мм	Ø300/1000	Ø200/1000
Макс. розміри шліфування в центрах, мм	Ø300/900	Ø200/1000
Макс. розміри шліфувального круга, мм	Ø500/80	Ø600/100
Макс. швидкість обертання шліфувального круга, м/с	50	50
Частота обертання приводу заготовки, 1/хв	25-500	5-800
Клас точності по ГОСТ8-82	В	В

Коротко про відомі конструкції люнетів.

Для отримання необхідних параметрів по якості поверхневого шару і точності діаметральних розмірів, під час обробки деталей малої жорсткості необхідне застосування спеціальних підтримуючих пристроїв – люнетів. Чим вищі вимоги до точності деталі, більша довжина і менший діаметр, інтенсивніші режими різання, тим актуальнішою стає необхідність застосування люнетів.

Двоопорний люнет (рис. 1.16) налагоджується на відповідний розмір і встановлюється безпосередньо в зону шліфування. У такому люнеті упори 1 і 2 розташовані за напрямом дії горизонтальної та вертикальної складових сили шліфування. Щоб у процесі регулювання не допускати перетиску заготовки опорами, застосовують обмежувальні кільця 5 і 6. При шліфуванні круглих деталей з криволінійною твірною, але необхідно вирішити питання зміщення люнета еквідістантно криволінійній твірній.

Широкого використання набули самоцентрівні гідравлічні або пневматичні люнети різноманітних конструкцій. Типовий представник самоцентрівних люнетів зображений на рис. 1.17. Тут при подачі робочого тіла в циліндр приводу 1, плоский копір 2, з'єднаний з штоком 3 приводу, переміщується на деталь, а робочі ролики 4 затискують або розтискують деталь через постійний контакт роликів 5 з робочою поверхнею 6 плоского копіру. Ролики закріплені на штоку плоского копіра 2 і на важелях 7. Поворот важелів, з розташованими на них роликами 4, відбувається відносно осі обертання 8, яка закріплена в корпусі 9. Силове замикання роликів відбувається із зусиллям, пропорційним силі приводу. З метою розвантаження роликів і важелів, а також підвищення динамічних характеристик технологічної системи, при установці поздовжню вісь корпусу люнета, разом з приводом повертають відносно горизонтальної площини на деякий кут. Для обробки конічних заготовок або для рухливої установки люнету циліндричні ролики замінюють бочкоподібними.

Складність науково-технічної задачі, що виникає при виготовленні оправок станів ХПТ полягає у наступному. Через складну форму робочої поверхні оправки є необхідним з одного боку застосувати шліфувальний верстат з ЧПК,

що передбачає проектування управляючої програми, яке не є можливим без застосування САМ системи.

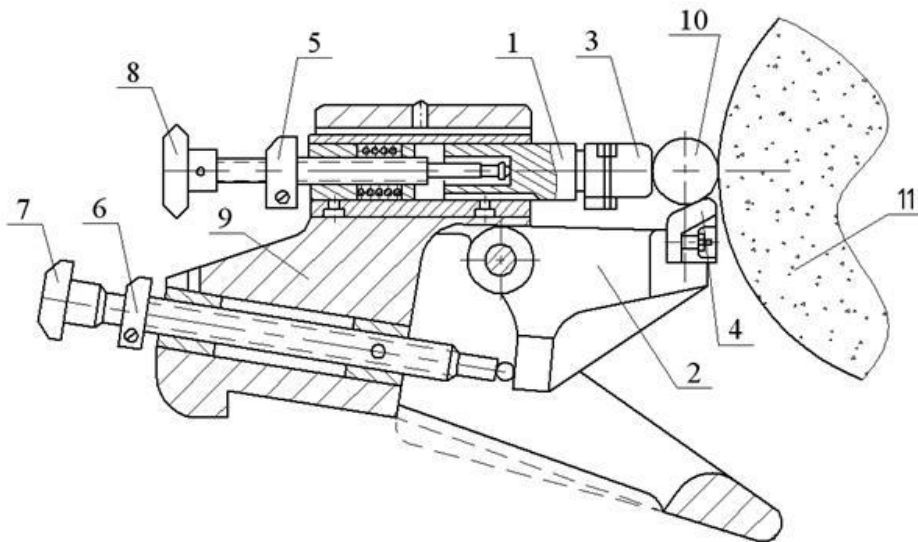


Рисунок 1.16 – Конструкція люнета з двома опорами: 1, 2 – опори, 3, 4 – змінні колодки, 5, 6 – обмежувальні кільця, 7, 8 – регулювальні гвинти; 9 – корпус люнета, 10 – деталь, що оброблюється, 11 – шліфувальний круг

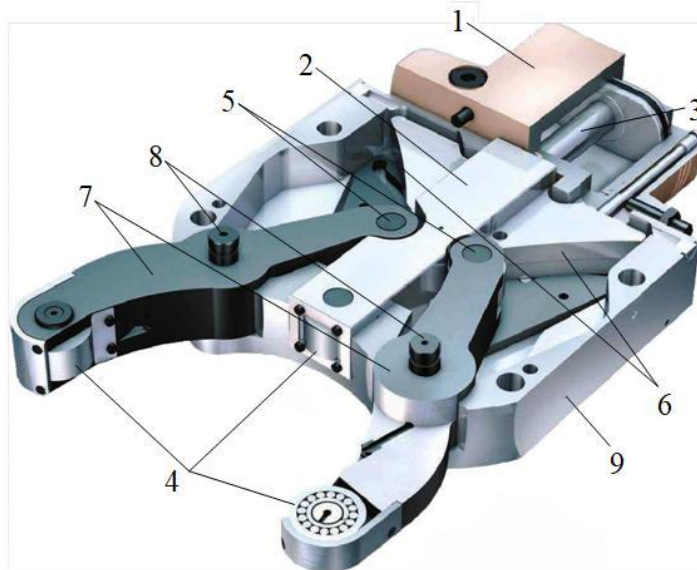


Рисунок 1.17 – Самоцентрівний гідравлічний люнет з трьома опорами

З іншого боку, така форма оправки не дозволяє використати традиційні конструкції люнетів, які рекомендуються під час обробки деталей малої жорсткості, оскільки діаметр деталі змінюється за довжиною робочої частини за певним законом. Аналіз відомих сучасних САМ- систем показав, що наразі відсутні універсальні САМ- системи для проектування управляючих програм шліфувальних верстатів з ЧПК, гостро стоїть питання забезпечення максимальної продуктивності процесу при забезпеченні необхідної якості і точності, шляхом призначення раціональних режимів різання. Отже, розробка технологічних за-

собів забезпечення шліфування оправок станів ХПТ і автоматизація підготовки програм для шліфувальних верстатів з ЧПК, що підтримують оптимальний режим різання є актуальною науково-технічною задачею.

Метою виконаної роботи було розроблення технологічних засобів для шліфування робочої поверхні оправок малої жорсткості станів ХПТ та створення САМ- системи автоматизованого програмування для шліфувального верстата з ЧПК.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Розробити пристрої для компенсації малої жорсткості технологічної обробляючої системи.

2. Розробити математичну модель формоутворення робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб для верстату з ЧПК шліфувальним кругом у формі тора.

3. Визначити залежність параметрів якості обробленої робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб від режиму різання при шліфуванні на верстаті з ЧПК.

4. Розробити математичну модель геометричної взаємодії шліфувального круга з поверхнею заготовки, що обробляється, і створити програмне забезпечення для визначення залежності зміни швидкості зрізування припуску за по-вздожньою координатою.

5. Розробити методику вирішення задачі оптимізації та визначити алгоритм управління режимом різання при шліфуванні робочої поверхні оправок станів холодної прокатки труб.

6. Створити модуль САМ- системи автоматизованого проектування управляючої програми для обробки робочої поверхні оправок станів холодної прокатки труб на шліфувальних верстатах з ЧПК.

Для вирішення поставленої науково-технічної задачі в роботі запропоновані нові конструкції люнетів.

#### Люнет з управлінням від системи ЧПК.

В основу розробленої конструкції поставлена задача підвищення жорсткості заготовки в процесі шліфування і в решті решт – підвищення точності і якості обробки нежорстких деталей, круглих у поперечному перерізі, але криволінійна утворююча яких змінюється за певним законом. Поставлена задача вирішується тим, що у корпусі розміщено один горизонтальний упор і один підтримуючий важіль, причому упор і важіль зв'язані кінематичним зв'язком через копір, а горизонтальний упор зв'язаний через кульково-гвинтову пару з електричним двигуном.



Корпус 1 люнета (рис. 1.18) закріплений на станині верстату і містить один горизонтальний упор 2 і один підтримуючий важіль 3, що взаємодіють з заготовкою 4, причому упор 2 взаємодіє з важелем 3 через копір 5, який закріплений на упорі 2, і важіль 6, при цьому важелі 3 і 6 закріплені на одній осі 7. Горизонтальний упор 2 зв'язаний через кульково-гвинтову пару 8 і муфту 9 з вихідним валом електродвигуна 10. Електродвигун 10 кріпиться до корпусу 1 люнета через фланець 11, в якому міститься муфта.

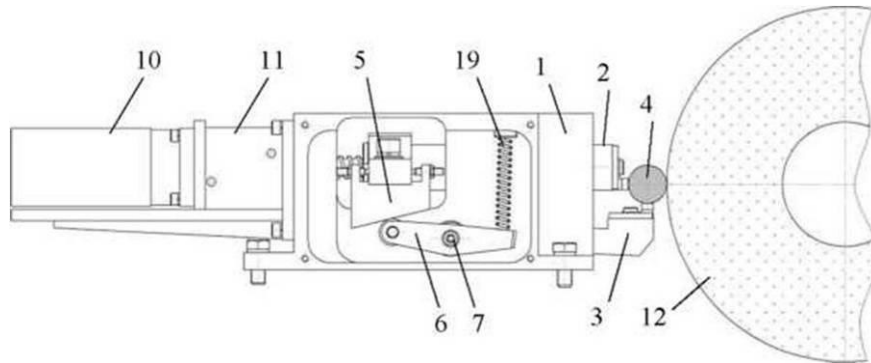


Рисунок 1.18 – Конструкція люнета з управлінням від системи ЧПК

Під час шліфування заготовка 4 рухається разом зі столом верстата (переміщення за віссю  $Z$  – перпендикулярно до площини рис. 1.18), при цьому відбуватиметься зміна діаметру заготовки від мінімуму до максимуму. При переміщення за віссю  $Z$  подається сигнал від системи ЧПК до електродвигуна 10, який через муфту і кульково-гвинтову пару задає положення горизонтального упора 2, а в свою чергу рух упора 2 через копір 5 і важіль 6 задає положення важеля 3. Положення упора 2 і важеля 3 відповідає діаметру, що задається положенням шліфувального круга 12. Постійність контакту важеля 6 і копіра 5 забезпечується пружиною 19.

Задача проектування люнета зводиться до розрахунку профілю копіра, який забезпечуватиме постійний контакт двох опор з заготовкою. Визначення профілю копіра 4 виконується з аналізу геометричних співвідношень кінематичної схеми рис. 1.19.

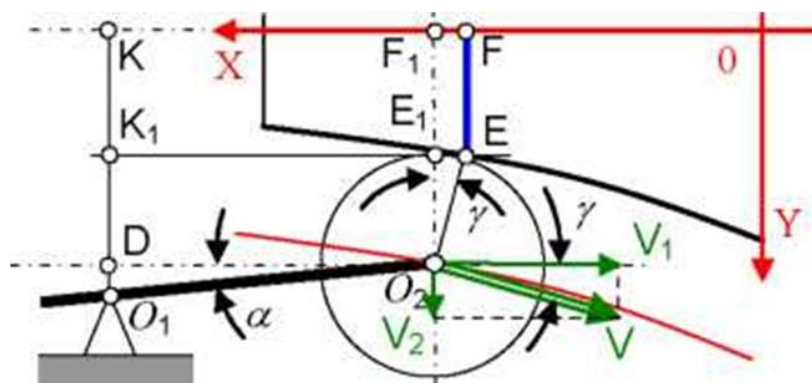


Рисунок 1.19 – Схема для розрахунку профілю копіра

Математична модель для визначення матеріального профілю у вигляді масиву даних має вигляд:

$$\begin{cases} (x)_i = (R_\delta)_i - R_p \cdot \sin(\gamma)_i - (R_\delta)_0 - R_p \cdot \sin(\gamma)_0 \\ (y)_i = F_1 O_2 - R_p \cdot \cos(\gamma)_0 \end{cases} \quad (1.17)$$

де:  $\gamma = \arctan\left(\frac{d(F_1 O_2)}{dR_\delta}\right)$ , а  $F_1 O_2 = KD = KO_1 - O_1 O_2 \cdot \sin \alpha$ .

Розроблена математична модель покладена в основу прикладної програми (рис. 1.20), яка дозволяє проектувати копір лунета. Для зручності користування на головному інтерфейсі при виборі форми опор лунета з'являється його кінематична схема, а вихідні дані мають однакове позначення у відповідних віконцях введення даних і на схемі. Після закінчення процедур проектування на інтерфейсі з'являються графіки профілю копіра (лінія 1) і відхилення профілю копіра від прямої – лінія 2. Програма дозволяє зберегти розрахований профіль копіра у файлі формату \*.cld, який може використовуватись при виготовленні на верстаті з ЧПК.

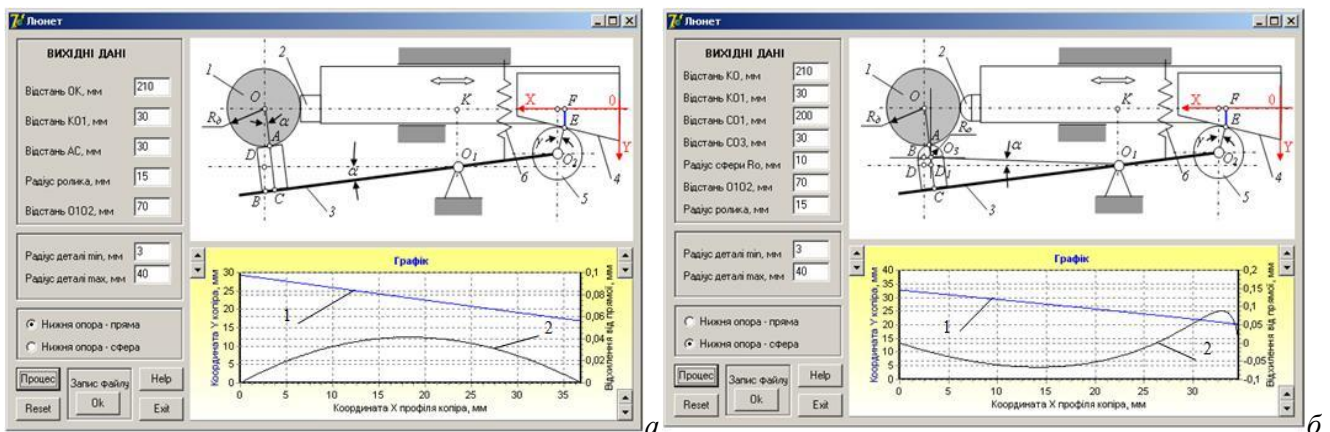


Рисунок 1.20 – Інтерфейс програми «Лунет»: опори, виконані за прямою – а, опори, виконані за сферою – б

### Самоцентрівний лунет.

В основу конструкції самоцентрівного лунета покладений принцип забезпечення повного суміщення осі лунета з віссю центрів верстата незалежно від зміни діаметру оправки за довжиною і в решті решт – підвищення жорсткості ТОС. Поставлена задача вирішується тим, що лунет містить основу, нерухомо встановлену на станині круглошліфувального верстата з ЧПК, і два корпуси, в яких містяться три рухомі опори. Корпуси лунета встановлені на осях та мають отвори для фіксації кутового положення, а зв'язок між штоком гідроциліндра і рухомою опорою представляє собою шарнірне з'єднання.

Основа 1 лунета (рис. 1.21) закріплена на станині верстата і містить два симетрично розташовані корпуси 2 і 3, встановлені на осях 4, які нерухомо за-

кріплені на основі 1, що має пази 5, виконані за дугою кола з центром на осях, а фіксація кутового положення корпусів 2 і 3 відносно основи забезпечується болтами 6. В корпусі 2 встановлено три опори: важільні 7 і 8, закріплені на валах 9 і 10, і горизонтальна 11, що через опорні ролики 12, 13 і 14 зі сферичною зовнішньою поверхнею контактують з заготовкою, причому горизонтальна опора 11 встановлена на лінійній напрямній 15 і має дві криволінійні поверхні 16.

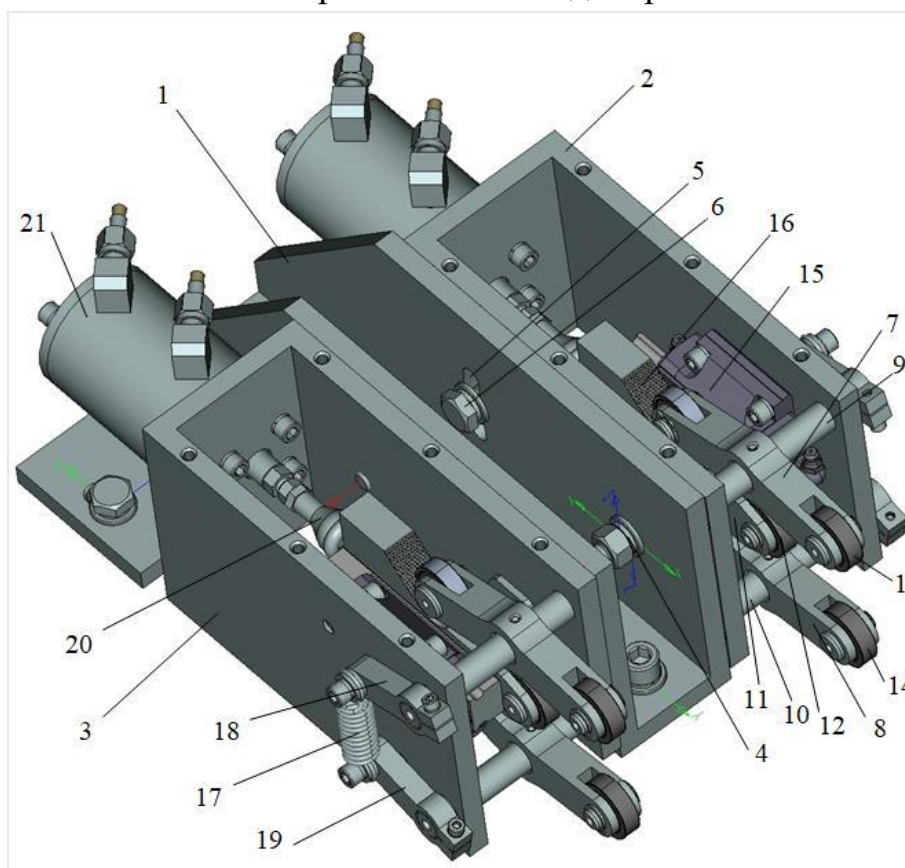


Рисунок 1.21 – Самоцентрівний люнет

Контакт роликів важільних опор 7 і 8 з криволінійними поверхнями 16 забезпечується пружиною 17 через важелі 18 і 19, які закріплені на валах 9 і 10. Криволінійні поверхні 16 виконані таким чином, що при зміні діаметру заготовки забезпечується постійний контакт опорних роликів 12, 13 і 14 з заготовкою. Горизонтальна опора 11 зв'язана через шарнірне з'єднання 20 з штоком гідроциліндра 21. Таким чином, усувається похибка неспіввісності руху штока гідроциліндра і горизонтальної опори. Як видно з рис. 1.21, люнет має дві аналогічні конструкції, розміщені в корпусах 2 і 3.

Люнет функціонує наступним чином. Під час шліфування заготовка переміщується вздовж осі центрів верстата і її діаметр в місці обробки змінюється. За рахунок спеціальної кінематики взаємодії трьох опор в кожному корпусі люнета через спеціально спрофільовані криволінійні поверхні 16 і сил, що

створюються гідроциліндрами, всі три опорних ролика 12, 13 і 14 кожного корпусу забезпечують постійний контакт з заготовкою незалежно від її діаметру.

Функціонування лунета за визначеним принципом забезпечують копії з криволінійними поверхнями 16. Розрахунок профілю копіїв також здійснюється чисельними методами в розробленій прикладній програмі, інтерфейс якої представлений на рис. 1.22. Зліва знаходяться вікна для завдання вихідних геометричних параметрів кінематичної схеми, а справа, в графічному вікні, відбувається анімація рухів ланок лунета за обраним діапазоном зміни радіусів деталі. Стабільність положення центру обертання заготовки 1 забезпечується трьома опорними роликами 2, 3 і 4, причому ролики 2 і 3 розміщені на важелях 5 і 6, а ролик 4 – на повзуні 7. В програмі за розробленою математичною моделлю відбувається розрахунок даних профілю 8, які можуть бути збережені для формування керуючої програми обробки на верстаті з ЧПК.

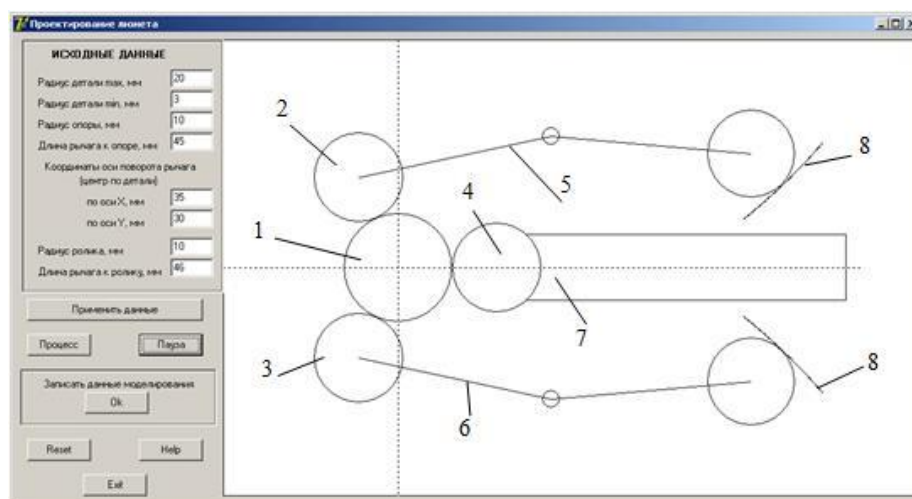


Рисунок 1.22 – Інтерфейс програми проектування профілю копіїв

Таким чином, виконано завдання розроблення пристроїв для компенсації малої жорсткості технологічної обробляючої системи.

Для забезпечення технологічної операції шліфування оправок на круглошліфувальних верстатах з ЧПК з використанням спеціального лунета, що керується від системи ЧПК верстата, необхідно розробити математичні моделі геометричної взаємодії шліфувального круга у формі тора і опор лунету з поверхнею заготовки, що обробляється. А для автоматизації проектування управляючої програми для верстата з ЧПК необхідно розробити САМ- систему, яка б використовувала розроблені моделі геометричної взаємодії круга і опор лунету з поверхнею заготовки, і дозволяла б автоматично проектувати керуючу програму, яка містить не тільки дані керування формоутворюючими рухами, але й дані для керування лунетом.



Розроблено низку математичних моделей, а саме: математичну модель формоутворення вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга за дугою кола, яка передбачає створення файлу керування рухами за координатами  $Z$  і  $X$  верстата за лінійною інтерполяцією; математичну модель розрахунку еквідистанти вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга разом з процедурами створення цифрових моделей профілю деталі і заготовки, яка забезпечує можливість моделювання процесу зрізування припуску з визначенням необхідних параметрів для керування за оптимальним законом; математичну модель і відповідний алгоритм, які вирішують задачу розрахунку координати положення люнета, що синхронізує його рух з рухом шліфувальної бабки за координатою переміщення столу верстата і таким чином забезпечує постійний контакт люнета із заготовкою протягом всього циклу шліфування оправки.

Математична модель правки шліфувального круга. Перша задача полягає у визначенні траєкторії правлячого алмазу для формування вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга за дугою кола. Оскільки правка виконується на верстаті з ЧПК, то в результаті розрахунків за математичною моделлю має утворитись масив даних, який потім перетворюється у G-коди для управління. З особливостей системи ЧПК, що застосовується, та початку координат, який обирається при налаштуванні виникла необхідність розрахунку масиву даних за схемою лінійної інтерполяції.

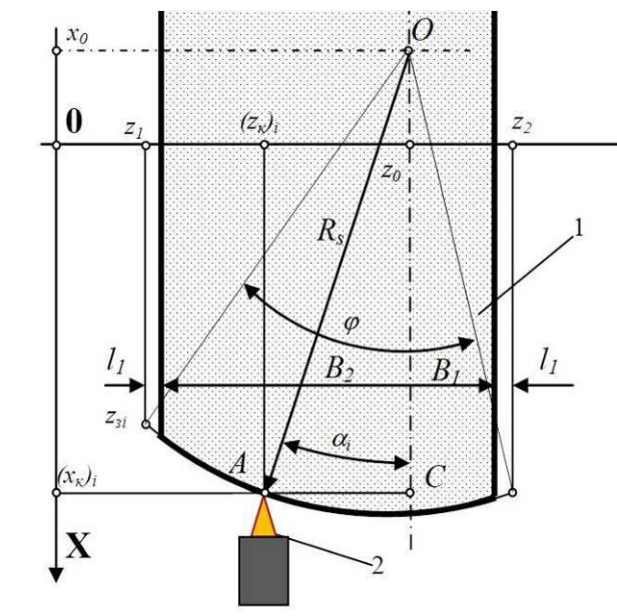


Рисунок 1.25 – Геометрична схема процесу правки

Правка шліфувального круга 1 виконується в системі координат верстата правлячим алмазом 2 (рис. 1.25). При цьому траєкторія руху має забезпечувати деякий перебіг, тобто рух за координатою  $Z$  здійснюється на ділянці  $z_1 - z_2$ . Масив даних для керування розраховується із заданим кроком  $h_1$ .

Масив траєкторії правки, що визначатиме форму шліфувального круга:

$$\begin{cases} (z_k)_i = z_0 - R_s \sin(i \cdot \delta\alpha) \\ (x_k)_i = x_0 + R_s \cos(i \cdot \delta\alpha) \end{cases} \quad (1.19)$$

де номер  $i$  змінюється від 0 до  $\text{round}(\varphi / \delta\alpha)$ , а крок зміни полярного кута  $\delta\alpha = \arcsin(h_1 / R_s)$ .

### Математична модель формоутворення при шліфуванні.

Друга задача полягає у визначенні геометричних параметрів еквідистанти і вирішується з аналізу геометричних співвідношень схеми формоутворення. Для утворення заданої поверхні 1 центр вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга 2 має рухатись за еквідистантою 3 (рис. 1.26), а постійний контакт опори люнети 4 з поточною поверхнею забезпечує жорсткість деталі

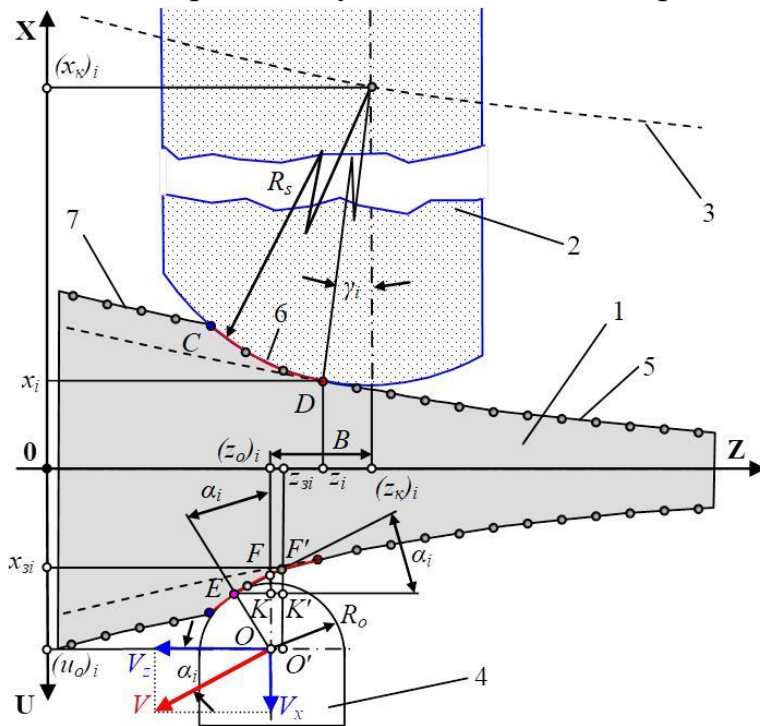


Рисунок 1.26 – Схема формоутворення поверхні оправки при шліфуванні

під час обробки. Вихідні дані геометричної моделі поверхні трансформуються у цифровий масив:  $x_i = F(z_i)$ , який відповідає обраній схемі формоутворення на верстаті. Завдяки такому підходу утворюється дискретна геометрична модель поверхні оправки (умовно позначена точками на рис. 1.26), яка використовується в подальших розрахунках для проектування програми керування формоутворюючим рухом і рухом опори люнети.

Для розрахунку еквідистанти 3, по якій повинен рухатися центр вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга 2, використовуються чисельні методи. В кожній точці цифрової моделі профілю оправки визначаються кут нахилу дотичної  $\gamma_i$ , який визначає еволюту кривої в точці, що задає положення шліфувального круга в залежності від радіуса заокруглення вихідної інструментальної поверхні. Для перевірки умов формоутворення за радіусом заокруглення вихідної інструментальної поверхні  $R_s$ , відбувається розрахунок радіусу кривизни поверхні в кожній точці математичної моделі поверхні оправки.

Математична модель формоутворення будується за принципом перетворення профілю оправки в цифрову модель, що дозволяє використовувати її і для моделювання процесу зрізування припуску. На початку розраховується цифровий масив кутів нахилу нормалі в кожній точці з певним, наперед вибраним кроком. Далі визначається цифровий масив радіусів кривизни, який використовується для вибору радіуса заокруглення периферії шліфувального круга  $R_s < \min[R_k]_i$ .

Розрахунок формоутворюючих траєкторій виконується за залежностями, що отримані з геометричних умов взаємодії вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга і поверхні деталі (рис. 1.26):

$$\begin{cases} (z_{\kappa})_i = z_i - ls + R_s \cdot \sin(\gamma_i) \\ (x_{\kappa})_i = H + R_s \cdot \cos(\gamma_i) + x_i - R_s \end{cases}, \quad (1.20)$$

де  $(z_{\kappa})_i, (x_{\kappa})_i$  – відповідні координати центру інструментальної поверхні шліфувального круга,  $z_i, x_i$  – відповідні координати кінцевої обробленої поверхні оправки,  $R_s$  – радіус округлення вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга,  $\gamma_i$  – кут нахилу дотичної,  $H$  – величина припуску, що залишився на заготовці і який необхідно зрізати на наступних проходах,  $ls$  – величина переміщення шліфувального круга.

Математична модель геометричної взаємодії опори люнета з поверхнею заготовки, що обробляється.

Особливістю геометричної взаємодії опори люнета і деталі є те, що люнет не змінює свого положення відносно шліфувального круга, а положення і довжина дуги контакту шліфувального круга з деталлю постійно змінюється, що призводить до постійної зміни поверхні, по якій контактує опора і деталь. На рис. 1.26 можна виділити три такі поверхні, що утворюються на заготовці в процесі шліфування: поверхня 5 – поверхня що була оброблена на поточному проході, поверхня 6 – поверхня різання, поверхня 7 – поверхня, що була оброблена на попередньому проході.

Оскільки переміщення стола верстата визначає тільки одна координата  $(z_{\kappa})_i$ , вона і задається в керуючій програмі:

$$(u_o)_i = x_{z_i} + R_o \cos \alpha_i + (R_o \sin \alpha_i + (z_{\varepsilon})_i - z_{z_i} + B) \tan \alpha_i, \quad (1.21)$$

де  $\alpha_i = \arctan\left(\frac{\delta x_i}{\delta z_i}\right)$ , величини приросту функції  $\delta x_i$  і приросту аргументу  $\delta z_i$

поточної поверхні деталі визначаються чисельним методом з наявного цифрового масиву.

Розроблена математична модель була використана в САМ- системі автоматизованого проектування керуючій програми ЧПК для модернізованого шліфувального верстата 3К152ВФ20.

Модуль САМ- системи автоматичного проектування формоутворюючих рухів. Проектування формоутворюючих рухів, а також розрахунок масиву даних для керування положенням опори люнета виконується за алгоритмом, укрупнена блок-схема якого показана на рис. 1.27.

Спочатку за залежністю зміни координати криволінійної твірної оправки стану ХПТ виконується розрахунок цифрової моделі профілю оправки у повздовжньому перерізі з наперед заданим кроком. Ураховуючи відносно незнач-



ну кривизну профілю для проектування, достатньо використовувати крок 1 мм. За такою ж процедурою виконується розрахунок цифрової моделі профілю заготовки, проте бокові сторони заготовки (торці) мають розраховуватись з кроком 1мм для подальшої можливості моделювання багатопрхідної обробки. Після розрахунку масиву радіусів кривизни профілю виконується порівняння з призначеним технологом-програмістом радіусом периферії шліфувального круга. В разі невиконання умови відповідне повідомлення виводиться на екран і надається можливість виправити дані. Далі розраховуються цифрові масиви даних для правки круга, еквідистанти і координат переміщення опори люнета.

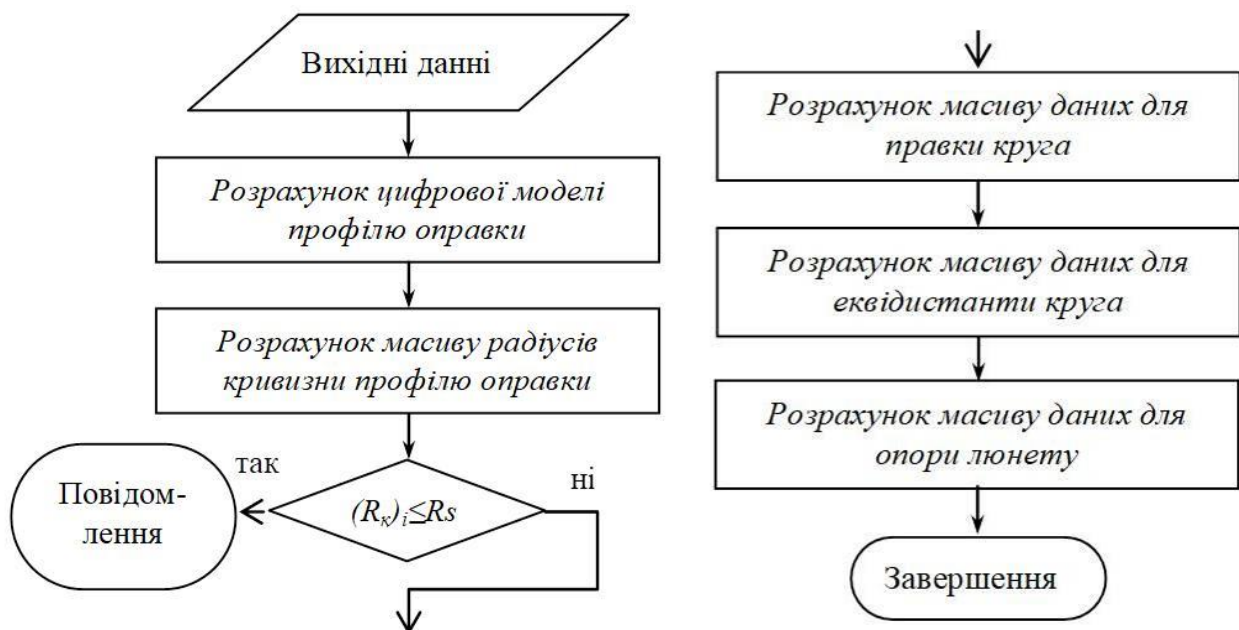


Рисунок 1.27 – Блок-схема алгоритму розрахунку масиву даних для управління положенням опори люнету

Технологічна підготовка виробництва здійснюється за допомогою розробленої САМ- системи (рис. 1.28), в алгоритмі функціонування якої використані всі отримані математичні залежності.

Першим етапом, у відповідності до алгоритму, є автоматичне створення файлу керування траєкторією правлячого алмазу 1 для утворення вихідної інструментальної поверхні за дугою кола – лінія 2. У графічному вікні виконується анімація рухів правлячого алмазу, під час якої створюється файл CLDATA, за яким буде спроектована керуюча програма у G- кодах.

Після завершення моделювання траєкторії, яка відповідає вихідній інструментальній поверхні шліфувального круга і зберігання файлу, що утворився, виконується наступний етап проектування. Процес розрахунку файлу керуючої програми супроводжується візуалізацією у графічному вікні «Положення шліфувального круга», де у певному масштабі зображена заготовка 1 з припус-

ком 2, інструментальна поверхня шліфувального круга 3 вісь лунета 4 і вісь 5 до радіуса округлення периферії шліфувального круга. Умовно лунет зображується з тієї ж сторони оправки, що і шліфувальний круг. Графічне вікно візуалізації дає можливість технологу-програмісту спостерігати процес в будь-який момент моделювання, крім того, дозволяє збільшувати зображення з метою виявлення помилок.

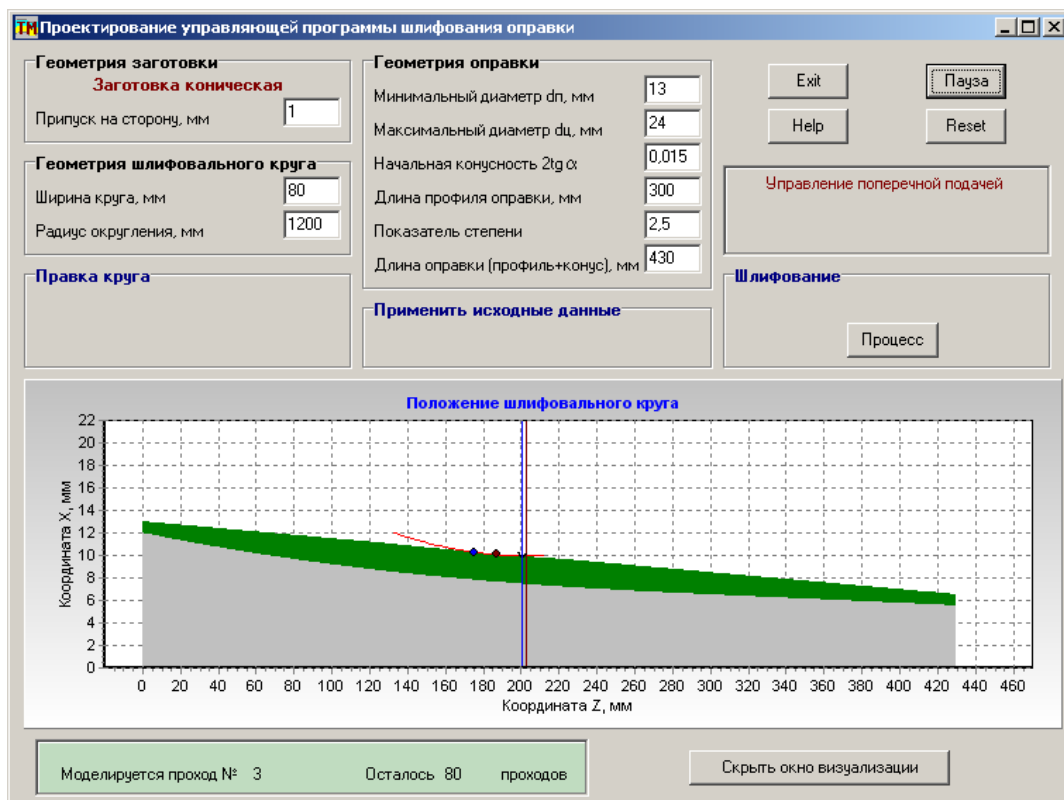


Рисунок 1.28 – Головной интерфейс САМ- системы

### Експериментальна перевірка функціонування модуля САМ- системи.

Експериментальна перевірка розроблених математичних моделей виконувалась за спроектованою програмою управління у G- кодах, вихідний файл CLDATA до якої був автоматично розрахований створеним модулем САМ- системи. Такий файл через спеціально розроблений постпроцесор перетворювався в управляючу програму у G кодах, яка завантажувалась безпосередньо у стійку верстата Sinumeric 840D фірми Siemens. Експерименти проводились на модернізованому круглошліфувальному верстаті мод. 3K152ВФ20. Модернізація останнього полягала в обладнанні верстата спеціальним лунетом з управлінням від ЧПК та заміні всіх приводів верстата на приводи і систему управління зі стійкою ЧПК фірми Siemens.

На рис. 1.29, а показано робочу зону верстату: на кронштейні 1, який закріплено на станині верстата встановлено спеціальний лунет 2, заготовка 3 встановлюється в центрах 4, 5 і оброблюється шліфувальним кругом 6, обер-

тання на заготовку передається через хомутик 7. Створений автоматично файл керуючої програми у форматі \*.cld, після обробки постпроцесором, завантажуються в стійку ЧПК верстата і при виконанні циклу шліфування афішується на екрані (рис. 1.29, б). В зоні 1 екрану представлені величини повздовжньої подачі стола верстату ( $F=2000$  мм/хв.), частота обертання шпинделя деталі ( $S1=399$  об/хв.), а в зоні 2 – частина керуючої програми, що виконується (номер кадру, координати Z, X і U).



Рисунок 1.29 – Робоча зона верстата 3K152BΦ20 – а, екран стійки ЧПК при виконанні КП – б

Таким чином, виконане завдання розробити математичну модель формоутворення робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб для верстата з ЧПК шліфувальним кругом у формі тора, розробити математичну модель геометричної взаємодії шліфувального круга з поверхнею заготовки, що обробляється, створити модуль САМ- системи автоматизованого проектування керуючої програми для обробки робочої поверхні оправок станів холодної прокатки труб на шліфувальних верстатах з ЧПК.

На наступному етапі розроблено методику керування режимом різання з використанням граничного алгоритму, яка дозволяє оптимізувати процес за критерієм максимуму продуктивності при виконанні умов за якістю обробки. На рис. 1.30 представлена схема зрізування припуску при шліфуванні робочої поверхні оправки, де при взаємодії інструменту і заготовки 1 показані два положення шліфувального круга 2 і 3, які відрізняються на величину повздовжньої подачі  $F_{np/об}$  на оберт заготовки. Товщина шару припуску, що зрізується, відповідає поперечній подачі на один прохід, а поперечний перетин шару припуску, що зрізується, виділений заштрихованою областю 4.

Зі схеми зрізування припуску на рис. 1.30 видно, що умовою отримання необхідної шорсткості робочої поверхні оправки після шліфування є наступне

співвідношення між повздовжньою подачею  $F_{np}$  (мм/хв.) і частотою  $n_3$  (об/хв.) обертання заготовки:

$$F_{np} = F_{np/об} \cdot n_3.$$

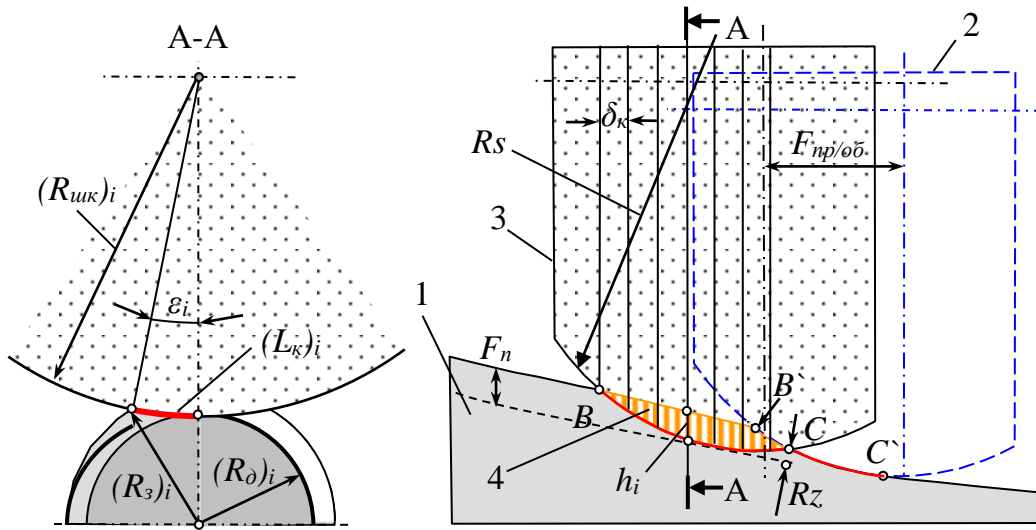


Рисунок 1.30 – Схема зрізування припуску

При цьому цифровий масив повздовжньої подачі на оберт заготовки можна отримати з розрахунку рівняння:

$$\left[ F_{np/об} \right]_i = \sqrt{Rz(Rz - 2[R_k]_i)(2Rz[R_k]_i - 4Rs[R_k]_i + 4Rs^2 - Rz^2)} \cdot \frac{\cos \alpha}{[R_k]_i - Rz}, \quad 1.22$$

оскільки радіус  $R_k$  кривизни профілю

$$(R_k)_i = \frac{\sqrt{[(z_{i-1} - z_{i+1})/2]^2 + [(x_{i-1} - x_{i+1})/2]^2}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}}$$

і кут  $\alpha$  нахилу нормалі

$$\alpha_i = \frac{\arctan[(x_i - x_{i-1})/(z_i - z_{i-1})] + \arctan[(x_{i+1} - x_i)/(z_{i+1} - z_i)]}{2}$$

залежать від ділянки шліфування за робочою поверхнею оправки і ці параметри представлені масивами.

Ці співвідношення використано для побудови графіків зміни повздовжньої подачі на оберт заготовки в залежності від координати  $Z$  обробки оправки за довжиною: лінія 1 – при  $Rz = 0,4$  мкм, лінія 2 – при  $Rz = 0,8$  мкм, лінія 3 – профіль оправки (координата  $X$ ) (рис. 1.31). Графіки побудовані для шліфування оправки КРВ25 шліфувальним кругом з радіусом округлення вихідної інструментальної поверхні  $Rs = 1600$  мм.

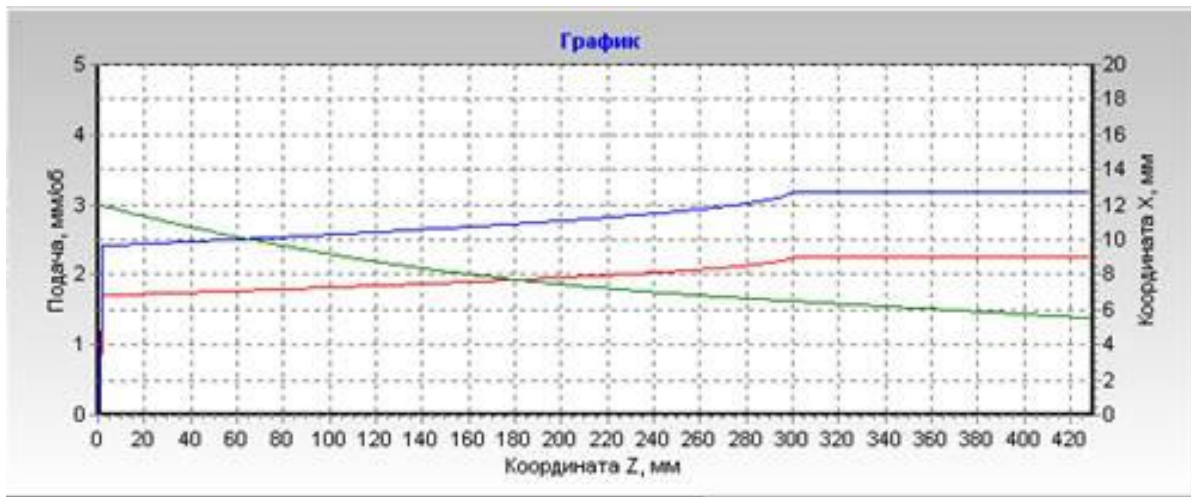


Рисунок 1.31 – Графіки зміни поздовжньої подачі на оберт

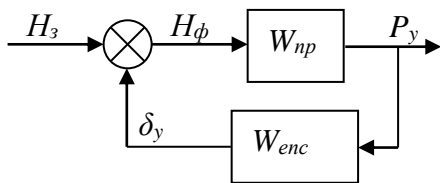


Рисунок 1.32 – Функціональна схема ТОС

Поперечна подача визначає товщину шару припуску, що заданий для зрізування на проході. Процес різання відбувається в пружній ТОС, яка за своєю природою є замкненою і може бути представлена функціональною схемою рис. 1.32. На схемі прийняті наступні позначення:  $H_z$ ,  $H_\phi$  – задана і фактична товщина шару припуску, що зрізується;  $P_y$  – складова сили різання;  $W_{пр}$  і  $W_{енс}$  – передатні функції відповідно процесу шліфування і еквівалентної пружної системи,  $d_y$  – пружна деформація, що викликана складовою  $P_y$  сили різання.

З функціональної схеми на рис. 1.32 отримана математична модель процесу різання у замкненій ТОС:

З функціональної схеми на рис. 1.32 отримана математична модель процесу різання у замкненій ТОС:

$$\begin{cases} H_\phi = H_z - \delta_y \\ P_y = H_\phi \cdot W_{пр} \\ \delta_y = P_y \cdot W_{енс} \end{cases} \quad (1.23)$$

Враховуючи наявність люнета, який встановлений навпроти шліфувального круга, жорсткість  $C$  ТОС можна вважати постійною величиною, а для визначення передатної функції процесу шліфування доцільно скористатися головною характеристикою процесу різання, якою є швидкість зрізування припуску. Тоді радіальна складова сили різання дорівнюватиме:

$$P_y = C_p(Q \cdot \omega_d)^\alpha, \quad (1.24)$$

де  $C_p$  і  $\alpha$  – емпіричний коефіцієнт і показник степеню,  $Q$  – аналог швидкості зрізування припуску,  $\text{мм}^3/\text{рад.}$ ,  $\omega_d$  – кутова швидкість обертання деталі,  $\text{рад./с.}$

Оскільки аналог  $Q$  швидкості зрізування припуску залежить від фактичної глибини різання  $H_\phi$ , при шліфуванні фасонної поверхні оправки інструмен-

тальною поверхнею круга у формі тора, його визначення необхідно проводити чисельним методом, застосовуючи моделювання геометричної взаємодії інструментальної поверхні із заготовкою за допомогою створеного програмного забезпечення (рис. 1.33).

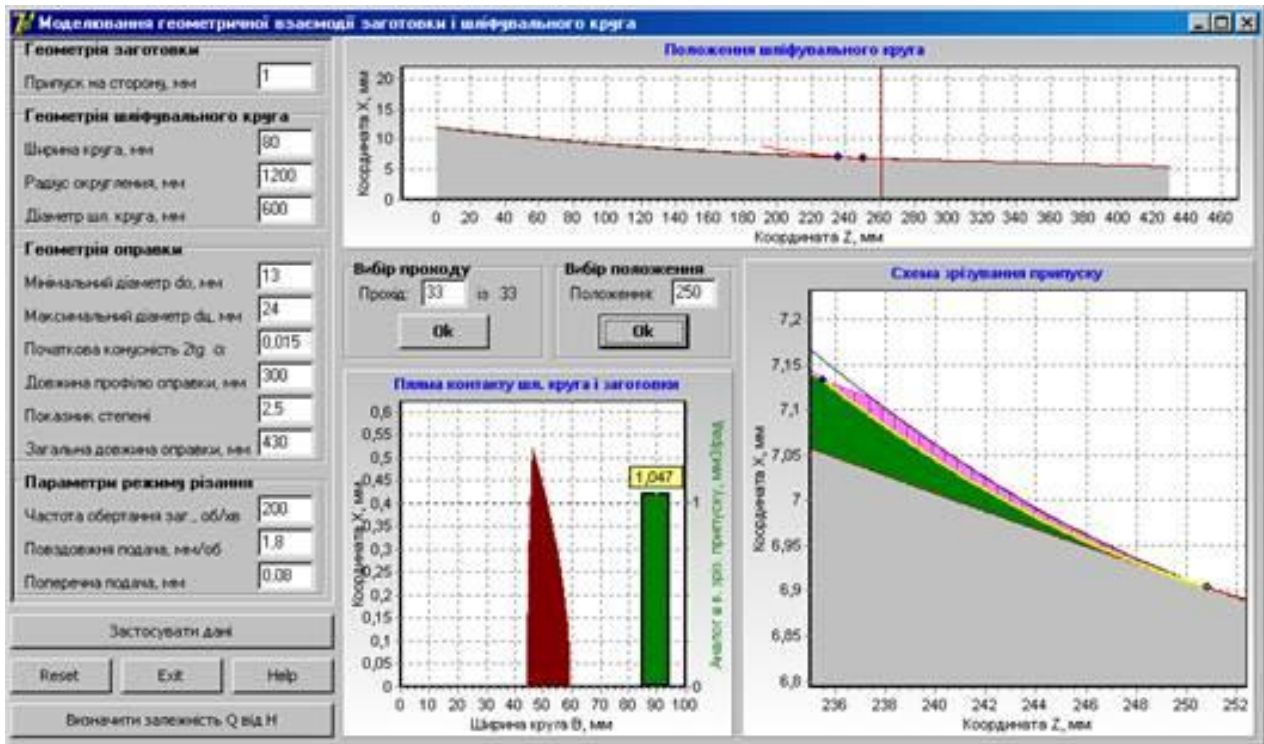


Рисунок 1.33 – Інтерфейс прикладної програми моделювання процесу різання у замкненій ТОС

Зліва на інтерфейсі знаходяться вікна для введення відповідних вихідних даних. Після введення вихідних даних і їх перевірки, для початку процесу моделювання потрібно натиснути кнопку «Застосувати дані». У верхньому вікні з'являється зображення поверхні оправки 1 з припуском 2. Після підтвердження вибору проходу (парне число – прохід вліво, непарне – вправо) і вибору положення шліфувального круга, у вікні відображається поточна поверхня оправки, інструментальна поверхня 3 і точки входу/виходу шліфувального круга 4, 5 із зони різання.

У нижньому правому вікні відображається схема зрізування припуску, де при шліфуванні заготовки показано два положення шліфувального круга 6, 7, які відрізняються на величину повздожньої подачі на оберт заготовки. Товщина шару, що зрізується – заштрихована область 8 – відповідає поперечній подачі на один прохід. Точка вершини гребінця 5, висота якої визначає детерміновану складову шорсткості. У нижньому лівому вікні відображається пляма контакту 9 шліфувального круга і поточної поверхні оправки і величина аналогу швидкості зрізування припуску 10, для заданого проходу і положення шліфувального круга. Зліва знизу знаходяться функціональні кнопки.

За допомогою прикладної програми була визначена залежність аналогу  $Q$  швидкості зрізування припуску від фактичної товщини  $H_f$  шару припуску, що зрізується (рис. 1.34), яка надалі апроксимується лінійною функцією з автоматично обчисленим коефіцієнтом  $k_l$ .

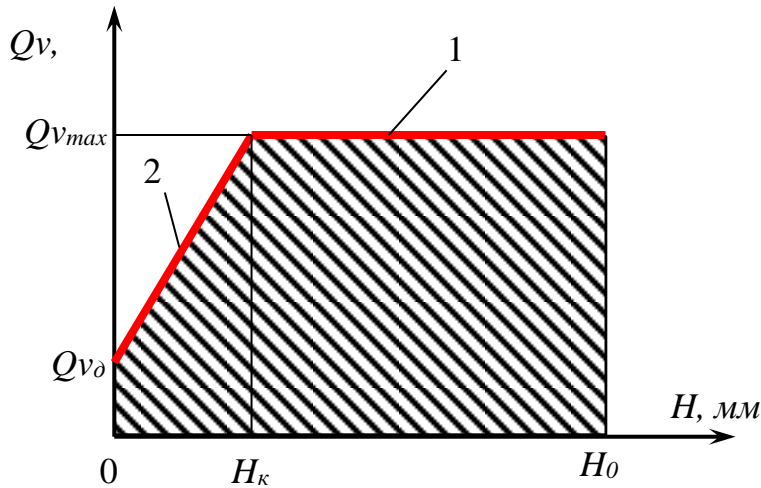


Рисунок 1.34 – Граничний алгоритм зміни швидкості  $Q_v$  зрізування припуску за циклом шліфування

Враховуючи зв'язок кутової швидкості деталі і товщини шару припуску, що зрізується, через нелінійну залежність складової сили різання, яка була використана при визначенні заданої поперечної подачі на прохід, визначення третьої складової режиму різання, а саме, кутової швидкості проводили ітераційним методом за чисельними

процедурами моделювання. Графік зміни швидкості  $Q_v$  зрізування припуску за циклом шліфування має розташовуватись як можна ближче до границь області допустимих значень, яка обмежується граничним алгоритмом. Тим самим гарантується максимальна продуктивність операції при безумовному виконанні всіх вимог за якістю обробленої поверхні. Область допустимих значень формується максимально допустимою швидкістю  $Q_{vmax}$  зрізування припуску на етапі шліфування припуску від  $H_0$  до величини  $H_k$  (лінія 1) та максимально допустимою швидкістю зрізування припуску на етапі шліфування від  $H_k$  до тіла деталі (лінія 2). Процес шліфування має закінчуватись при швидкості зрізування припуску  $Q_{v0}$ , яка забезпечить потрібну, задану кресленням, шорсткість поверхні деталі. Зниження швидкості зрізування припуску вздовж лінії 2 (лінії припалів) на заключному етапі циклу шліфування забезпечує необхідну якість поверхневого шару деталі. Границю по лінії 2 визначають два параметри: швидкість зрізування припуску  $Q_{v0}$  в кінці циклу і критична величина  $H_k$  припуску, при якій необхідно переключати управління поперечною подачею. Такі величини можуть бути визначені тільки на основі обробки експериментальних даних з дослідження залежності припалів і шорсткості поверхні (рис. 1.35).

Отже, була розроблена математична модель процесу шліфування, яка містить у собі чисельні методи розв'язання задачі визначення швидкості зрізування припуску та враховує квазістаціонарні умови шліфування, що дозволило отримати всі необхідні характеристики процесу шліфування. Також визначений

алгоритм керування процесом шліфування оправки стану холодної прокатки труб з криволінійною утворюючою та його граничні умови, що дозволило сформулювати область керування у фазовій площині «припуск – швидкість видалення припуску» для вирішення задачі оптимізації.

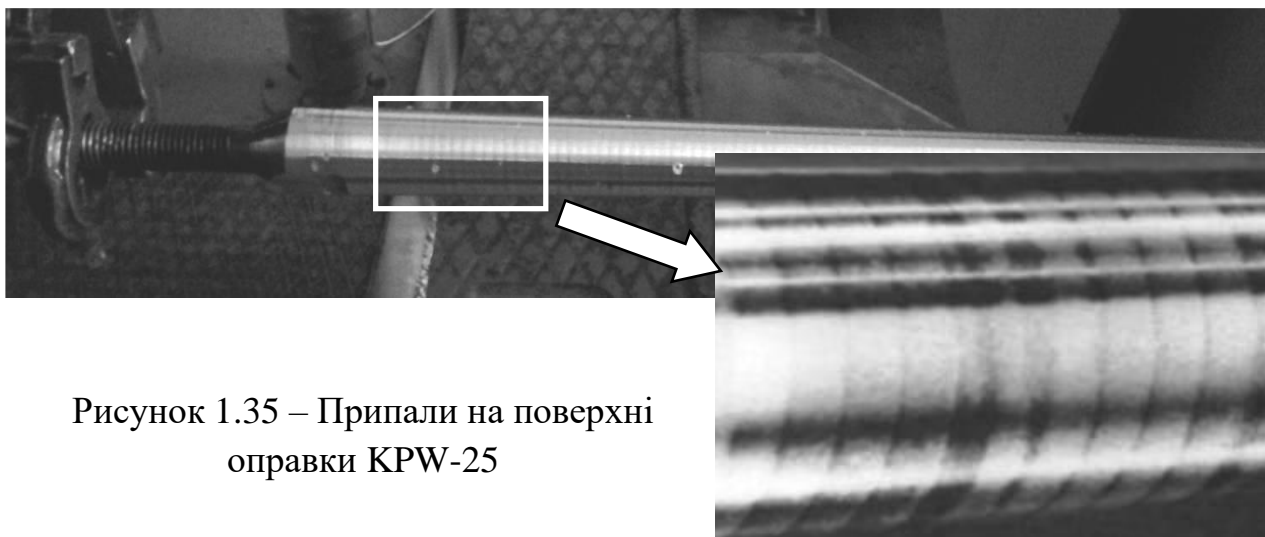


Рисунок 1.35 – Припали на поверхні оправки КРВ-25

Розроблений алгоритм був покладений в основу модулів автоматичного проектування керування режимом різання у створеній САМ- системі проектування керуючих програм для шліфування оправок станів ХПТ (рис. 1.36). На інтерфейсі, який показує розраховане керування для шліфування оправки КРВ-25, лінією 1 представлений граничний алгоритм, лінією 2 – спроектований закон керування поперечною подачею, а лінією 3 – передбачувана зміна швидкості зрізування припуску з урахуванням жорсткості ТОС.

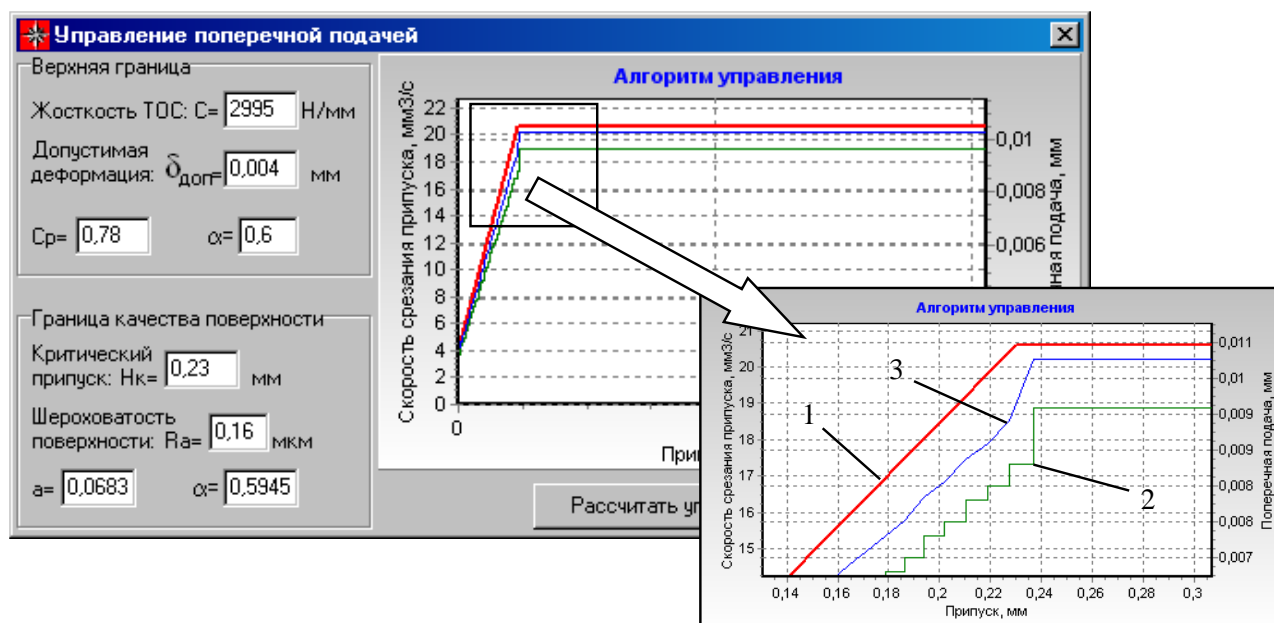


Рисунок 1.36 – Інтерфейс модуля моделювання процесу шліфування робочої поверхні оправки стану ХПТ



### Практичне значення одержаних результатів

1. Для реалізації технологічної операції шліфування робочої поверхні оправки була розроблена конструкція спеціального люнета, положення опор якого змінюється за командами керуючої програми шліфувального верстата з ЧПК, постійно відслідковуючи змінну форму робочої частини оправки в процесі обробки, на який отримано патент України на корисну модель № 74812 і використано для модернізації круглошліфувального верстата 3K152ВФ20.

2. Розроблено конструкцію спеціального люнета, в основу функціонування якого покладений принцип забезпечення повного суміщення осі люнета з віссю центрів верстата незалежно від зміни діаметру оправки за довжиною і, в решті решт, – підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи, на який отримано патент України на корисну модель № 85441.

3. Розроблена САМ- система автоматизації підготовки керуючих програм для шліфування оправок станів холодної прокатки труб, як криволінійних так і конічних, на верстаті з ЧПК, яка дозволяє в процесі моделювання формоутворення автоматично створювати файл управління, що забезпечує необхідний синхронізований рух за чотирма координатами: обертання деталі, переміщення стола верстата, переміщення шліфувальної бабки, переміщення опорних губок люнета.

4. Модернізований верстат з ЧПК 3K152ВФ20, обладнаний спеціальним люнетом, разом з розробленою САМ- системою дозволили автоматизувати технологічну операцію шліфування робочої поверхні оправок для широкого діапазону розмірів з прямолінійною і криволінійною утворюючими у відповідності до закладеної моделі поверхні.

### 1.3. Математичне і технологічне забезпечення шліфування канавок гайок гвинтових передач кочення

Як і передача гвинт-гайка ковзання, передача гвинт-гайка кочення являє собою механізм для перетворення обертового руху в поступальний і навпаки. Але на відміну від передачі гвинт-гайка ковзання, передача гвинт-гайка кочення використовує принцип тертя кочення, а не тертя ковзання, і таким чином не має її головних недоліків, таких як низький ККД, підвищені втрати на тертя, швидке зношування. Конструктивно передача гвинт-гайка кочення складається із прецизійного накатаного або шліфованого гвинта та гайки з механізмом циркуляції елементів кочення – кульок або роликів.

Кулькова гвинтова передача – найпоширеніший різновид передачі гвинт-гайка кочення. Кулькові гвинтові передачі (рис. 1.37) застосовують у механізмах точних переміщень, у спостережних системах і у відповідальних силових передачах (це верстатобудування – у приводах верстатів з ЧПК, робототехніка,

авіаційна й космічна техніка, атомна енергетика, ковальсько-пресове устаткування й ін.). Завдяки компактним розмірам і простоті конструкції КГП можуть бути легко інтегровані в різні машини й механізми, у тому числі з гідравлічним і пневмоприводом.



Рисунок 1.37 – Кулькова гвинтова передача

Одним із самих перспективних сьогодні напрямків використання КГП у машинобудуванні – це створення й використання на їхній основі готових мехатронних вузлів переміщення (лінійних модулів). Такі вузли, або модулі, можуть включати у свій склад, крім КГП, алюмінієвий або сталевий профіль (у якості внутрішньої несучої рами або несучого корпусу), приводний електродвигун, контрольно-вимірювальні прилади й елементи керування.

Кулькові гвинтові передачі відрізняються високою якістю виготовлення поверхонь кочення, підвищеною плавністю роботи, високою осьовою жорсткістю й високою точністю.

Основні переваги кулькової гвинтової передачі:

- ✓ здатність до утворення великих осьових сил;
- ✓ малі втрати на тертя (ККД передачі 0,9 й вище у порівнянні з 0,2-0,4 передачі гвинт-гайка ковзання) й, як наслідок, можливість використання менш потужного приводу й меншої кількості змащення;
- ✓ майже повна незалежність сили тертя від швидкості й досить мале тертя спокою, що є сприятливим для забезпечення стійкості (рівномірності) руху;
- ✓ висока навантажувальна здатність за малих габаритів;
- ✓ розмірне поступальне переміщення з високою точністю;
- ✓ висока швидкодія, і одночасно плавний і безшумний хід;
- ✓ невелике нагрівання в процесі роботи і значний експлуатаційний ресурс.

До недоліків кулькової гвинтової передачі можна віднести:

- ✓ складність конструкції гайки;

- ✓ обмеження по довжині гвинта (через накопичувальну похибку);
- ✓ обмеження по швидкості обертання гвинта (через вібрації);
- ✓ висока вартість (виконання зі шліфованим гвинтом);
- ✓ необхідність високої точності виготовлення й гарного захисту передачі від забруднення.

Конструктивно КГП складається із гвинта й гайки із гвинтовими канавками криволінійного профілю. Канавки служать доріжками кочення для розміщених між витками гвинта й гайки кульок (рис. 1.38). Переміщення кульок відбувається по замкнутій траєкторії – при обертанні гвинта кульки втягуються у рух по гвинтових канавках, поступально переміщують гайку й через пропускний канал (канал повернення) повертаються у вихідне положення. Канали повернення виконуються в спеціальних вкладишах, які вставляються у відповідне вікно гайки, по числу робочих витків.

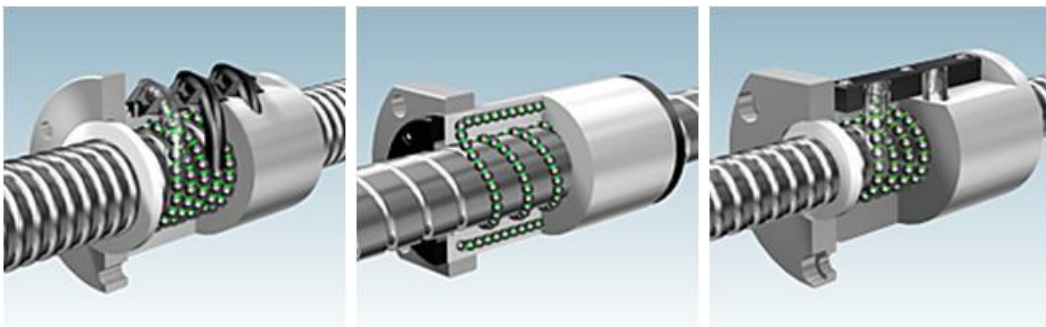


Рисунок 1.38 – Схеми конструктивного виконання КГП

Складність у проектуванні кулькової гайки полягає в тому, що кульки повинні переміщатися усередині гайки. Замкнуті системи компактні, не мають виступів, що утруднюють монтаж, менш піддані ушкодженням і спроектовані з метою оптимізації переміщення кульок і швидкості їхнього руху. Є два типи замкнутих систем повернення кульок: система повернення після одного витка й система повернення через усю гайку (рис. 1.39).

Схема циркуляції після одного витка дозволяє кулькам робити один оберт навколо гвинта, після чого вони попадають у канавку, що їх повертає, яка є поперечною кроку гвинта. Для забезпечення необхідної кількості навантажених витків у тому чи іншому ступені завантаження використовується чотири й більше таких каналів. Вставки звичайно розташовуються послідовно одна за іншою сферично в тілі гайки для забезпечення збалансованого загального контакту між кульками й гвинтом. Простота пристрою й економічність руху обумовлюють до компактності й надійності такої системи повернення кульок. Схема використовується, в основному, для гвинтів з маленьким кроком.

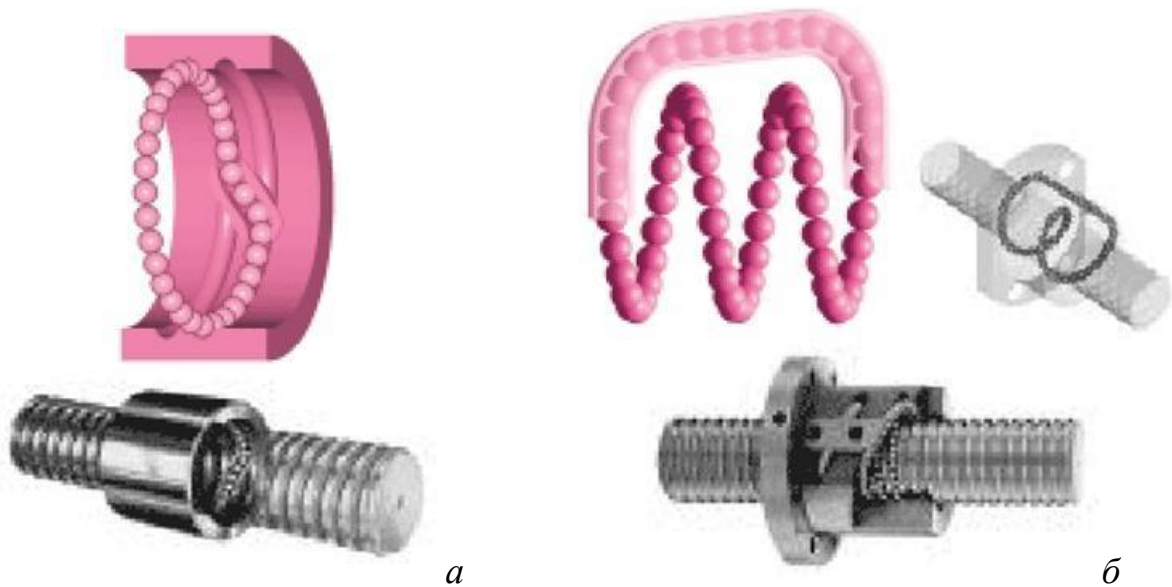


Рисунок 1.39 – Схеми циркуляції кульок: *а* – після одного витка, *б* – через всю гайку

Для гвинтів з більшим кроком переважно використовують системи з поверненням по канавці через усю гайку. Кульки рухаються навколо гвинта по всій довжині гайки, потім повертаються назад по канавці. Ця внутрішня канавка зв'язує обидва кінці гайки, і кульки по ній повертаються після того, як пробігли по гвинту, до початку циклу. На кінці каналу вони знову стикаються із гвинтом і починають обертання довкола нього. Форма заглушки на кінці поворотного каналу виключає наявність мертвих зон у гайці й оптимізує навантажувальну здатність. Збільшення швидкості обертання вимагає спеціальної форми девертера й наявності декількох канавок.

Під час роботи передачі кульки, пройшовши по гвинтовій канавці на гвинті свій виток, викочуються з різьби в пропускний канал вкладиша, перевалюють через виступ різьби й повертаються у вихідне положення на той же або на сусідній (залежно від конструкції) виток. Для передач із багатозаходною різьбою застосовується особливий тип виконання гайки. Число робочих витків у КГП звичайно становить від 1 до 6. Більше число витків застосовується тільки в сильно навантажених передачах, наприклад, важких верстатів.

Гвинтові пари кочення характеризуються такими параметрами як діаметр гвинта, крок різьби, клас точності КГП і попередній натяг. Точність визначає максимально припустиме відхилення ходу КГП на одиницю кроку. Визначається, як правило, кількістю мікронів на 300 мм ходи. Залежно від призначення й умов роботи КГП розділяються на передачі із проміжком (клас точності Т – транспорт) і передачі з натягом (клас точності ІТ – позиціонування).

КГП транспортної групи застосовуються в пристроях, що вимагають простого переміщення. Тут осьовий проміжок завжди вибирається в одну сторону під дією осьової сили (сили ваги, сили опору переміщуваного вузла й ін.).

Прецизійна група КГП використовується в тих випадках, коли необхідне забезпечення точного положення з точністю до мікрометра без застосування пристроїв зворотного зв'язку. Тут осьовий проміжок усувається підчас складання шляхом попереднього натягу, тобто попереднього навантаження елементів передачі силою, що забезпечує необхідну осьову жорсткість. Попередній натяг усереднює періодичні помилки кроку гвинта й стабілізує положення осі гайки відносно осі гвинта. Залежно від конструкції попередній натяг забезпечується або підбором кульок більшого діаметру (для профілю типу "стрілчаста арка"), або встановленням двох гайок в одному корпусі з наступним відносним осьовим зсувом. Конструкція із двома гайками забезпечує можливість регулювання натягу.

За способом виготовлення КГП діляться на 2 групи (рис. 1.40-1.41): нарізані різьбовими головками, катані (одержують методом прокатування) і шліфовані (одержують методом багатоступінчастого шліфування). Шліфовані кулькові гвинтові передачі мають на порядок більш високу точність, при цьому й ціна їх істотно вище.

Шліфування гвинтових канавок гайок КГП може здійснюватися поздовжнім шліфуванням однопрофільним кругом, поздовжнім шліфуванням багатопрофільним шліфувальним кругом і багатопрофільним врізним шліфуванням.

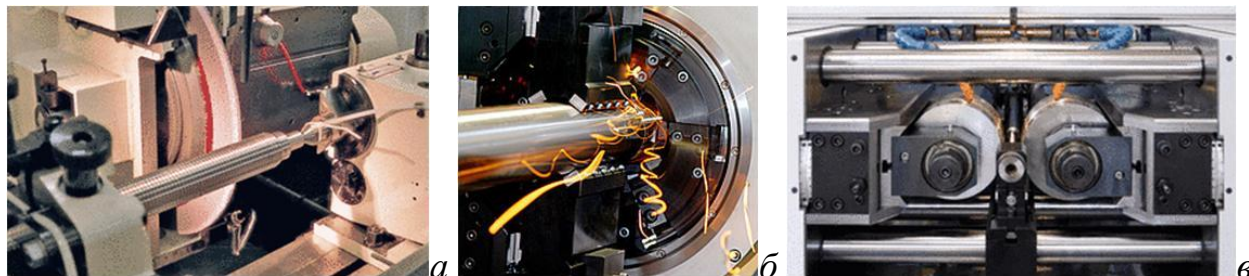


Рисунок 1.40 – Шліфування (а), нарізання різьбовими головками (б), і прокатування (в) гвинта КГП



Рисунок 1.41 – Профілі канавок гвинта КГП: шліфований (а), нарізаний (б), катаний (в)

Поздовжнє шліфування однопрофільним кругом (рис. 1.42, а) передбачає шліфування кругом, радіус профілю якого дорівнює радіусу профілю гвинтової

поверхні. Круг орієнтується відповідно до кута нахилу гвинтової поверхні. Для цього способу характерні висока ефективність і простота формотворних рухів. Такий спосіб шліфування гвинтових канавок гайок КГП методом копіювання використовують у випадках, коли потрібно забезпечити найвищі вимоги до точності обробки гайок. Обробку здійснюють з попередньо обробленим на токарній операції гвинтовим профілем канавки простої (як правило, колової) форми. Гайка і шліфувальний круг обертаються з визначеними швидкостями  $\omega_d$  і  $\omega_k$ . При цьому інструменту крім подачі на крок  $S_{поз}$  надається подача на прохід  $S_n$ . По відношенню до кроку різьби нема жодних обмежень, тому область використання простягається і на ті величини кроку, які не можуть бути отримані за допомогою інших методів.

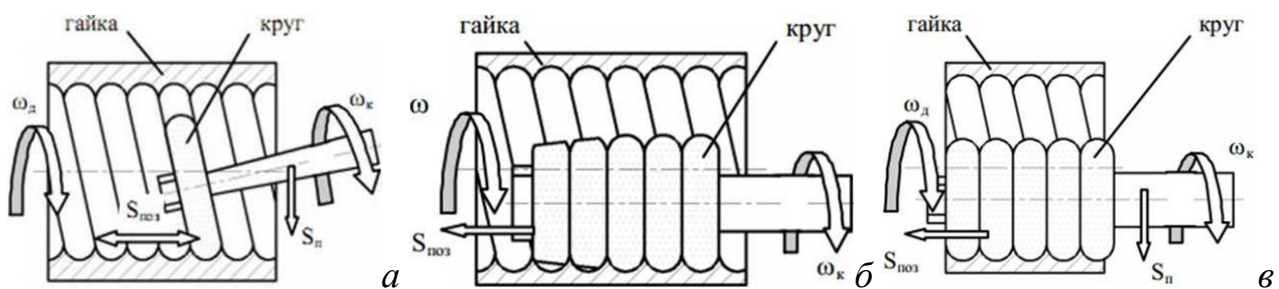


Рисунок 1.42 – Схеми шліфування: поздовжнє однопрофільним кругом (а), поздовжнє багатопрофільним кругом (б), врізне багатопрофільним кругом (в)

Для зменшення машинного часу процес шліфування здійснюють ступінчасто, змінюючи напрям руху подачі шліфувального круга для кожного наступного проходу. Крім того, після кожного подвійного проходу інструмент профілюють для відновлення профілю формоутворюючої частини. Це викликає появу похибки установки внаслідок складності процесу виставлення у вихідну позицію шліфувального круга і заготовки. Під час обробки можлива поява похибки кроку внаслідок вибірки проміжків при зміні напрямку поздовжньої подачі круга, яка накопичується і, як правило, не усувається. Внаслідок відносно малих значень складових сил різання однопрофільне шліфування особливо вигідне для виготовлення довгих деталей з малим діаметром.

Поздовжнє шліфування за допомогою багатопрофільного шліфувального круга дає значне підвищення продуктивності в порівнянні з однопрофільним методом шліфування (рис. 1.42, б), оскільки робота різання розподіляється на кілька ділянок шліфувального круга, і, в результаті, підвищується його стійкість, що виражена довжиною різання. Окремі профілі шліфувального круга утворюють ступінчастий набір з різною глибиною шліфування. Ця ступінчастість забезпечує технологію шліфування, як у однопрофільного круга, який шліфує заготовки за кілька проходів і з різними подачами на врізання. Отже,

досягається економічно вигідний (з точки зору витрат машинного часу) спосіб шліфування, при якому профіль канавок може виготовлятися лише за один прохід. Але при шліфуванні виникають більш високі номінальні зусилля, які можуть привести до значного прогину і радіального биття деталі. Цього можна запобігти, якщо вести шліфування за допомогою ступінчастого шліфувального круга за два проходи. Якщо подачу на врізання для другого проходу вибирати меншою, ніж висота ступені профілю на шліфувальному крузі відносно попереднього профілю, то практично отримуємо однопрофільне чистове шліфування з вищезгаданими перевагами.

Однак, паралельність осей шліфувального круга і деталі спричиняє значне зниження точності обробки через те, що неможливість повороту різального інструменту на величину кута підйому гвинтової канавки спричиняє деформування периферією шліфувального круга, що виходить з контакту з заготовкою, крайніх ділянок профілю канавки. Для запобігання цього перш за все зменшують діаметр шліфувального круга та використовують шліфувальний круг лише для попереднього шліфування профілю канавки.

За точністю обробки й економічністю поздовжнє шліфування багатопрофільним шліфувальним кругом займає проміжне положення між однопрофільним поздовжнім і багатопрофільним врізним шліфуванням. Можливий діапазон значень кроку, отже і подачі  $S_{\text{поз}}$ , обмежується границями значень кроку канавки  $P = 1 \dots 4$  мм. Цей спосіб використовують при знижених вимогах до точності гайки для вишліфовування контуру заготовки без попередньої формуючої обробки (наприклад токарної). На практиці успішно використовується багатопрофільне попереднє шліфування і однопрофільне чистове шліфування однопрофільним шліфувальним кругом. Для зменшення вартості шліфувального круга його багатопрофільність отримують поєднанням кількох однопрофільних шліфувальних кругів.

Врізне шліфування багатопрофільним шліфувальним кругом використовують для виготовлення відносно коротких гайок ( $< 40$  мм) при невисоких вимогах до точності обробки. При цьому шліфування відбувається як на суцільному металі, так і на заготовці з попередньо обробленою канавкою (рис. 1.42, в). Шліфувальний круг повільно врізається на глибину канавки з подачею  $S_{\text{п}}$ , одночасно відбувається обертання деталі зі швидкістю  $\omega_{\text{д}}$  і подача на крок  $S_{\text{поз}}$ . Після досягнення глибини шліфування деталь повинна зробити як мінімум один повний оберт з подачею на один крок. Після цього шліфувальний круг спочатку повільно, а потім з прискореним рухом виводиться з контакту з деталлю, в результаті чого гвинтова канавка шліфується майже без уступів. Така технологія призводить до значного зменшення часу шліфування в порівнянні з поздовжнім шліфуванням конусним багатопрофільним кругом при однаковій

довжині гайки (її оброблюваної частини). Однак складові сили різання значно більші, що пояснює значно нижчу точність обробки, тому найбільша довжина врізання і значення кроку канавки обмежено приблизними значеннями відповідно у 40 і 4 мм. Спеціальні різьбошліфувальні верстати, які працюють за методом врізання, задовольняють жорсткішим вимогам до потужності привода, статичної і динамічної жорсткості, і в той же час значно дешевші, оскільки вартісний ходовий гвинт замінюється різьбовим копіром і може бути значно скорочена станина і напрямні верстата. Однак, паралельність осей шліфувального круга і заготовки обумовлюють ті ж самі проблеми з точністю обробки, які характерні і для попереднього способу обробки.

До серйозних недоліків останніх двох способів слід віднести також значну вартість шліфувальних кругів і, що більш суттєве, складність визначення їх контуру, що профілюється, а також складність практичної реалізації правки. Крім того, їх використання унеможливорює утворення повного профілю гвинтової канавки гайки КГП без суттєвих невиправних похибок.

Отже, розглянуті вище способи займають різні позиції з точки зору собівартості і точності обробки. Тому в залежності від потрібних параметрів точності, серійності виробництва і собівартості деталі чи механізму (машини) в цілому, вони можуть бути використані одноосібно чи спільно один з одним. Ці ж способи можуть бути використані і для шліфування багатозаходних гвинтових канавок гайок КГП.

Однак, як видно з табл. 1.3, тільки поздовжнє шліфування однопрофільним кругом дозволяє проводити фінішну обробку гвинтового профілю гайки КГП будь-якого типорозміру без обмежень як по кроку передачі, так і по діаметру. Простота профілю інструмента (в порівнянні з абразивними кругами, що використовуються для інших методів) дозволяють легко профілювати його в заводських умовах навіть за допомогою універсальних пристроїв.

#### Шліфувальний інструмент.

Оскільки в якості матеріалу гайки звичайно обираються конструкційні леговані сталі, наприклад 20Х чи 40Х, які після термічного обробки мають твердість поверхневого шару НРС 58...62, для даного процесу шліфування використовують ельборові або круги з електрокорунду. При використанні ельбору ЛО забезпечується значна стійкість шліфувального інструмента, але правка займає більше часу, а сам шліфувальний круг є коштовним. Тому частіше застосовують шліфувальні круги з білого електрокорунду зернистістю 23А...25А, але внаслідок значно меншої стійкості такого інструмента правка застосовується після кожного проходу.

Для шліфувальних кругів використовують керамічну зв'язку (КЗ, К5 і ін.), яка забезпечує потрібну жорсткість і механічну міцність. Негативними ха-



характеристиками кругів на цій зв'язці є підвищена крихкість і чутливість до ударів. Цього недоліку не має металічна зв'язка, але процес засалювання і необхідність частой правки обмежили її широке використання при шліфуванні внутрішньої різьби гайки. Характеристика твердості абразивного круга приймається МЗ...СТ1 (м'який...середньої твердості). Номер структури абразивного інструменту з електрокорунду, що характеризує співвідношення об'ємів шліфувального матеріалу, зв'язки і пор, обирають на рівні 5...7%. Для кругів з ельбору ця величина визначається концентрацією абразивного матеріалу і обирається на рівні 100... 150%.

**Таблиця 1.3 – Похибки профілю канавки гайки КГП після шліфування**

Значення похибки	Спосіб шліфування		
	Повздовжнє однопрофільним кругом	Повздовжнє багатопрофільним кругом	Врізне багатопрофільним кругом
По середньому діаметру, мкм	±2	Чистове: ±(4...5) Чорнове: ±(10...15)	±(10...20)
По половині кута профілю, мкм	±5	±(5...10)	±10
По кроку на довжині 25 мм, мкм	±(2...3)	±5	±5
По кроку на довжині до 300 мм, мкм	±5	±10	– (ширина круга ≤25 мм)

Правка шліфувальних кругів здійснюється способом обточування алмазними олівцями, алмазом в оправці, алмазними різцями або алмазними роликми.

#### Різьбошліфувальні верстати.

Через широкий асортимент КГП, що випускаються, виробники використовують в основному універсальні різьбошліфувальні верстати (табл. 1.4).

Крім того, верстати подібних конструкцій випускають також відомі світові фірми, такі як Reishauer (моделі RG500, RG 1000) Jones&Lamson (моделі TG-636, TG 615), Sheffield (модель 103), Excello (моделі 33L, 39A) та інші. Фірми-виробники застосовують універсальні верстати для виготовлення і гвинта, і гайки. Цей технологічний прийом дозволяє зменшити різницю кроків гвинта і гайки, що значно підвищує точність при складанні. Крім того, поздовжнє шліфування однопрофільним кругом можна проводити і на горизонтальних внутрішньо шліфувальних верстатах, які дозволяють поворот шпіндельної головки

чи передньої бабки з закріпленою гайкою для забезпечення необхідного значення кута підйому канавки, ходовий гвинт для надання кругу подачі  $S_{\text{поз}}$ , що дорівнює кроку різьби та можливість реверсування цієї подачі. Також обрані верстати мають бути достатньо точними, наприклад, радіальне биття шпинделя верстатів має бути не більше за 0,0025...0,004 мм.

Таблиця 1.4 – Основні характеристики різьбошліфувальних верстатів

Модель верстату	Найбільший розмір деталі (діаметр×довжина), мм	Крок різьби, мм	Колова швидкість круга, м/с	Частота обертання деталі, об/хв
5K821B	80×45	0,5...6	35...60	0,3...100
5K822B	125×75	1...6	35...60	0,3...100
MB-59C1	160×75	1...10	30...35	визначається налагодженням
MB-28	225×115	1...10	30...35	0,8...60

#### Особливості процесу шліфування внутрішніх канавок в гайках КГП.

За наявності багатьох схожих рис фінішної обробки деталей шліфуванням (великі швидкості обробки, мале значення припуску, висока точність обробки) процес шліфування внутрішніх канавок в гайках КГП має специфічні особливості, що роблять його унікальним і складним в реалізації.

Насамперед, характерною особливістю процесу шліфування гвинтових напівкруглих канавок є нерівномірність розподілу припуску на проходах. Це відбувається внаслідок причин, зумовлених геометрією інструмента і заготовки. Так, процес формоутворення кінцевого профілю канавки відбувається внаслідок копіювання поверхні шліфувального круга. Крім очевидних переваг (простота реалізації, відсутність спеціальних пристроїв і ін.) даний метод має і недоліки. Перш за все, це необхідність підтримувати постійність профілю круга протягом усього циклу обробки в умовах нерівномірності розподілу припуску по проходах, причому форма припуску залежить від значення радіуса заготовки  $Rz$  (рис. 1.43).

Найменше значення радіуса  $Rz_{\text{min}}$  заготовки визначається за формулою:

$$Rz_{\text{min}} = Rd - h_{\text{min}},$$

де  $Rd$  – радіус деталі;  $h_{\text{min}}$  – мінімальна величина припуску, який за розрахунковим методом проф. В.М. Кована обумовлюється похибками попередніх і даної операції технологічного процесу.

Але відсутність вихідної довідкової інформації про технологію шліфування деталей складного профілю, до яких відносять гайки з внутрішніми гвин-

товими канавками, вимагає від технолога суб'єктивного призначення величини  $h_{min}$  згідно з проведеними експериментами чи обробкою пробних деталей. Максимальне значення радіусу заготовки обмежене кількістю проходів на обробку. А за умов зменшення часу обробки  $Rz$  намагаються прийняти щонайменшим, тобто  $Rz \rightarrow Rz_{min}$ . Центр кривизни заготовки  $O_3$  знаходять за радіусом та величиною припуску. Крім того, внаслідок відсутності потреби асиметричного задання припуску для врахування похибки на крок, на відмін у від гвинтів,  $O_3$  завжди лежить на осі симетрії канавки. Це значно спрощує процес налагодження верстата.

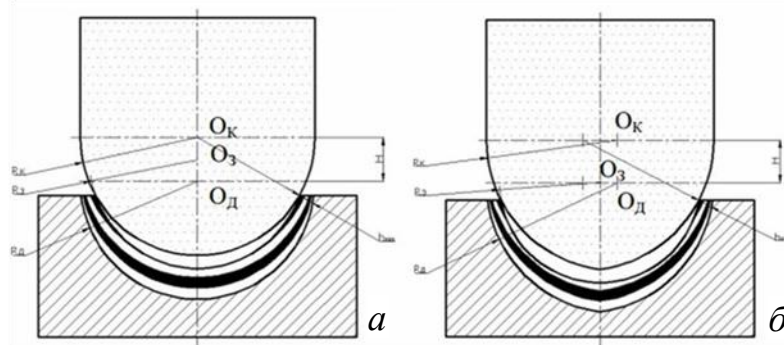


Рисунок 1.43 – Схема зрізування припуску: для круглого профілю (а), для арочного профілю (б)

При шліфуванні відбувається ступінчастий багатопрохідний нерівномірний процес зняття стружки. Під час обробки центр круга врізається на величину  $Z$ , значення якої визначається безпосередньо в процесі налагодження верстату (рис. 1.43).

На перших проходах обробка відбувається на торцях круга, причому форма припуску близька до трикутника в поздовжньому перетині (рис. 1.43 і 1.44, а). Навантаження, тобто товщина елементарного припуску, на кожному ділянці робочої поверхні шліфувального круга у контакті є різним, а отже і зношування профілю інструмента є різним (рис. 1.44, б, в).

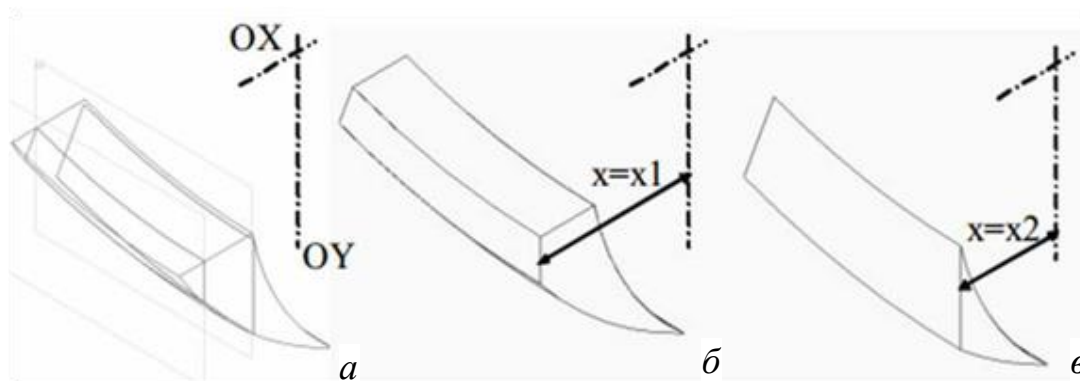


Рисунок 1.44 – Елементарний припуск, що зрізується: загальний вигляд (а), з розрізом по  $x=x1$  (б), з розрізом по  $x=x2$  (в)

На наступних проходах припуск знімається вже всією поверхнею круга, але нерівномірність навантаження залишається. А за умови накопичення помилки профілю це виливається у похибку профілю. Такі умови різання стосуються як круглого, так і арочного профілів. Крім того, нерівномірність шліфування по профілю гвинтової канавки впливає і на нерівномірність теплових напружень.

Отже, виникає необхідність постійного контролю і правки абразивного інструмента. Внаслідок недостатньої вивченості процесів, що протікають при цьому, на виробництві цей процес повністю виконується висококваліфікованим робітником без жодних засобів автоматизації даного процесу, який на базі власного досвіду визначає, після якої кількості проходів треба проводити правку (рис. 1.45 і 1.46). Хоча, частіше за все, за умови великого обсягу типорозмірів правку здійснюють після кожного проходу.



Рисунок 1.45 – Заготовки і гайки КГП після шліфування однопрофільним кругом

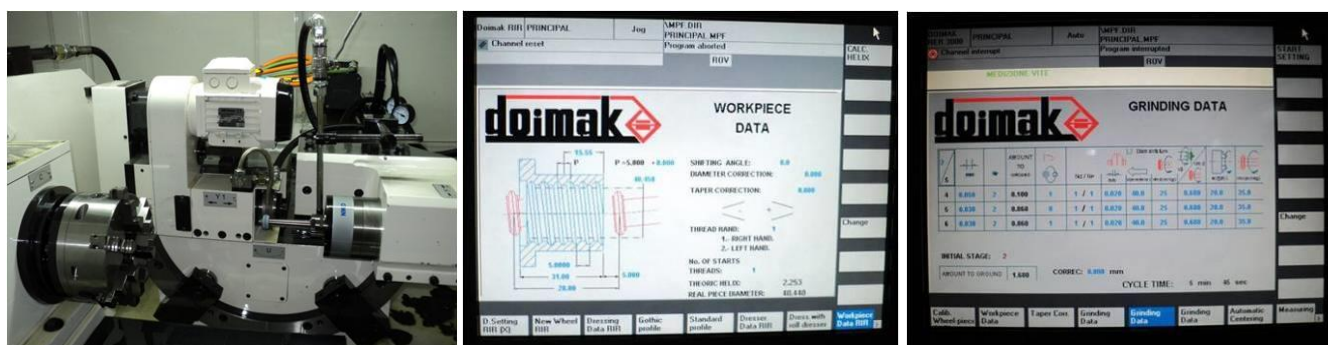


Рисунок 1.46 – Верстат для поздовжнього шліфування однопрофільним кругом

З конструктивних причин довжина гайки часто більша за її діаметр. Це змушує виробника закріплювати абразивний інструмент на консольно закріпленому шпинделі шліфувальної головки (рис. 1.47). Якщо типорозмір гайки  $D_T < 100$  мм, то відповідно  $d < 30$  мм. При цьому довжина шпинделя досягає  $L = 200$  мм. Крім того, малі значення  $D_T$  і  $d$  спричиняють використання кінцівки

шпindelної бабки з малим значенням максимального діаметру для збереження величини проміжку  $\Delta$  при будь-якій довжині обробки (рис. 1.47). Під час шліфування гвинтової канавки гайки величина пружної деформації шпинделя стає порівняною з величиною припуску на прохід, і це може звести нанівець необхідність застосування самого етапу шліфування в ТП виготовлення внутрішньої гвинтової канавки. Після обробки канавки мають відповідати наступним параметрам: допуск на діаметр доріжки –  $\pm 0,01\text{мм}$ , радіальне биття –  $0,006\text{мм}$ , огранка –  $0,01\text{мм}$ . Тому для фінішної обробки використовують верстати з приведеною жорсткістю не менше  $8000\text{ Н/мм}$ .

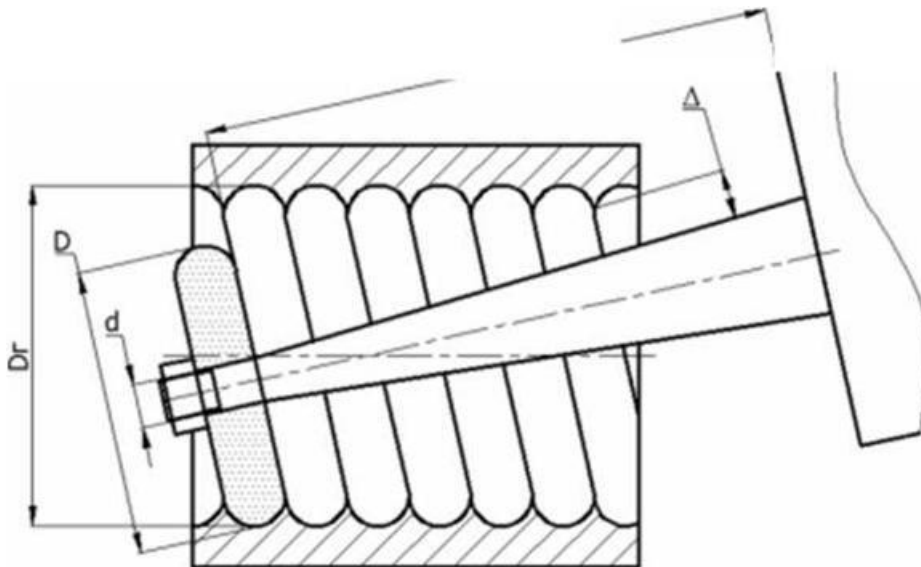


Рисунок 1.47 – Схема поздовжнього шліфування гвинтової канавки гайки однопрофільним кругом

Крім того, можливе виникнення коливань, які призводять до виникнення хвилястості та інших похибок форми обробленої поверхні. Тому в реальних виробничих умовах зменшують величину припуску на прохід і відповідно збільшують кількість проходів.

Отже, цей спосіб шліфування має ряд недоліків:

- ✓ нерівномірне питоме навантаження й товщина шару, що зрізується, уздовж профілю абразивного інструмента, у результаті чого відбувається нерівномірне зношування;
- ✓ змінна продуктивність обробки в процесі врізання, максимальне значення подачі на оберт при цьому визначається в момент формоутворення центральної точки профілю;
- ✓ температура в зоні обробки крайніх ділянок профілю деталі є обмежуючим чинником, оскільки відношення товщини шару, що зрізується, до радіуса ріжучої кромки не перевищує  $0,1$ , що приводить до збільшення сил тертя;
- ✓ довжина врізання більше припуску на обробку й залежить від максимального кута підйому профілю утворюючої.

Таким чином, підвищені вимоги до експлуатаційних властивостей гвинтових пар кочення вимагають від виробника застосування коштовних фінішних операцій обробки для отримання необхідних показників точності та якості. Для гайок цей етап обробки складається з операції шліфування попередньо виготовленої внутрішньої гвинтової канавки спеціально спрофільованим шліфувальним кругом за схемою, показаною на рис. 1.47. Процес є багатопрохідним і виконується при взаємозв'язаному русі обертання деталі  $1$  зі швидкістю  $\omega_0$  і по вздовжньої подачі  $S_k$  шліфувального круга  $2$ , а також переміщенні його на величину  $S_n$  поперечної подачі на один прохід.

Метою роботи є підвищення продуктивності процесу шліфування внутрішніх гвинтових поверхонь гайок кулькової гвинтової пари шляхом керування поперечною подачею на прохід і вибором раціонального профілю заготовки.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні основні задачі:

1. Розробити узагальнену математичну модель процесу внутрішнього шліфування гвинтової канавки гайки кулькової гвинтової пари з урахуванням замкненості технологічної оброблюваної системи, багатопрохідності процесу шліфування та зношування профільної поверхні шліфувального круга.
2. Розробити алгоритм визначення оптимального профілю заготовки для рівномірного розподілу величини припуску по ширині канавки і реалізувати його у вигляді прикладної програми для впровадження у виробництво.
3. Визначити принципи побудови оптимального закону керування процесом внутрішнього шліфування гвинтової канавки.
4. Розробити прикладну програму автоматизованого проектування оптимального закону керування поперечною подачею та впровадити у виробництво.

Як показав проведений аналіз процесу, інтегральний параметр шліфування, за яким визначається необхідний закон управління – швидкість зняття припуску – змінюється як по координаті формоутворюючої поверхні круга, так і в залежності від номера проходу. В загальному випадку, з урахуванням зміни формоутворюючої інструментальної поверхні внаслідок зносу шліфувального круга, зміни його ріжучих властивостей та пружних деформацій технологічної оброблюваної системи (ТОС), цей параметр не може бути розрахований за аналітичними залежностями. Це обумовлює необхідність застосування чисельних методів.

Отже, для проектування законів керування циклом шліфування та відслідковування фактичної форми ріжучої поверхні інструмента і оброблюваної поверхні заготовки під час усього циклу обробки потрібно розробити математичну модель процесу, яка була б джерелом надійної апріорної інформації і слугувала основою вирішення цієї технологічної проблеми. Реалізація поставленого

завдання на сучасному етапі розвитку засобів виробництва може бути здійснена шляхом побудови комп'ютерної імітаційної моделі даного процесу обробки.

Ядром такої моделі має бути модуль обчислення геометричних параметрів шару, що зрізується, при будь-якому взаємному положенні різальної поверхні шліфувального круга і оброблюваної поверхні гвинтової канавки в поздовжньому і поперечному перетинах за схемою рис. 1.47. Оскільки моделювання здійснюється числовими методами, доцільно представити ці геометричні поверхні у вигляді дискретних математичних моделей – масивів даних в узагальненій формі.

Алгоритм розв'язання геометричної задачі перетину двох моделей поверхонь, який враховує особливості багатопрохідної обробки, представлений на схемі (рис. 1.48).

В якості початкової точки відліку  $O$  в системі координат прив'язки контурів заготовки і інструмента  $XOY$  було обране положення центру радіусного профілю інструмента на початку обробки (рис. 1.49). Для обчислення координат застосовується метод поперечних перетинів по осі  $OX$ . Це дозволяє полегшити визначення координат та завдання масивів.

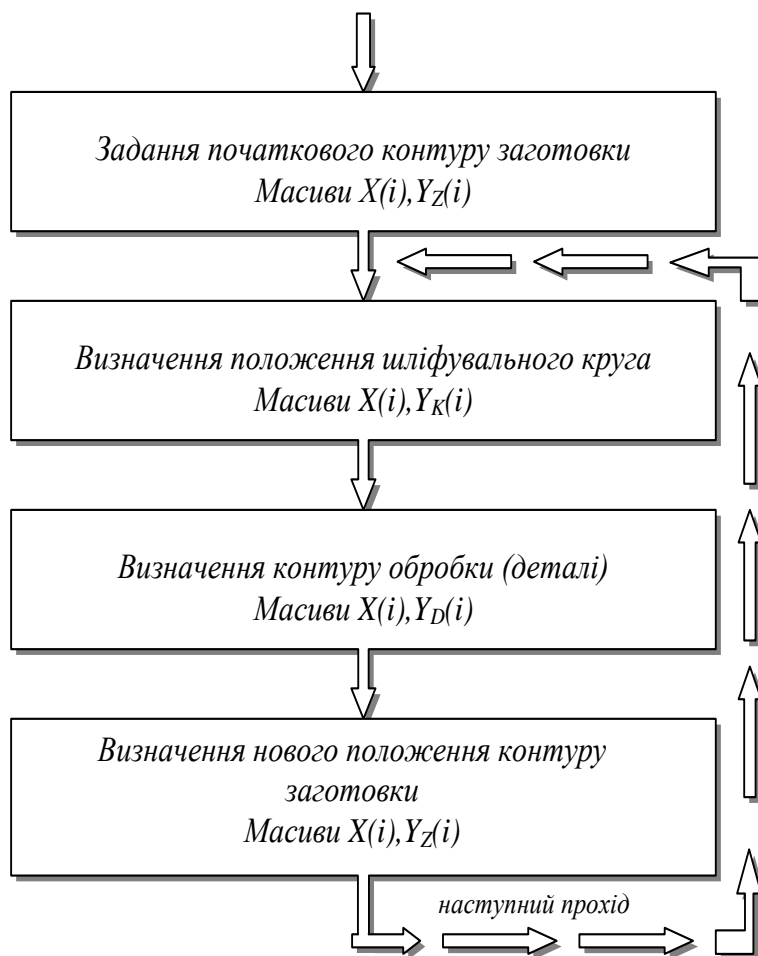


Рисунок 1.48 – Загальна блок-схема алгоритму геометричних розрахунків

Масив  $X(i)$  задається послідовним присвоєнням координаті  $X_i$  значень в полі  $X_i \in [X_{max}; 0]$  з кроком  $K$ , який визначає похибку розрахунків. За значеннями  $X_i$  за допомогою формул, отриманих з геометричних співвідношень рис. 1.49, розраховуються координати  $Y_{Zi}$  та  $Y_{Ki}$  положення поверхонь, відповідно, заготовки і інструмента:

$$X_i = X_{max} - K \cdot i ;$$

$$\begin{cases} Y_{Zi} = Y_{min} = A + B_o & ; X_i < X_l \\ Y_{Zi} = B_o + \sqrt{R_3^2 - X_i^2} & ; X_i \geq X_l \end{cases} ;$$

$$R_3 = R_D - H ;$$

$$Y_{Ki} = B + \sqrt{R_K^2 - X_i^2} ;$$

$$A = R_D - R_{RDMA} + R_{RDMI} ,$$

де  $B_o$  – величина прив'язки початкової точки відліку до поверхні гайки;  $B$  – сумарна величина врізання шліфувального круга по осі  $OY$ ;  $R_3$  – радіус профілю заготовки;  $R_K$  – радіус профілю круга;  $R_D$  – радіус профілю деталі;  $H$  – величина припуску на операцію;  $R_{RDMA}$  – радіус виступу гвинтової канавки гайки;  $R_{RDMI}$  – радіус впадини гвинтової канавки гайки.

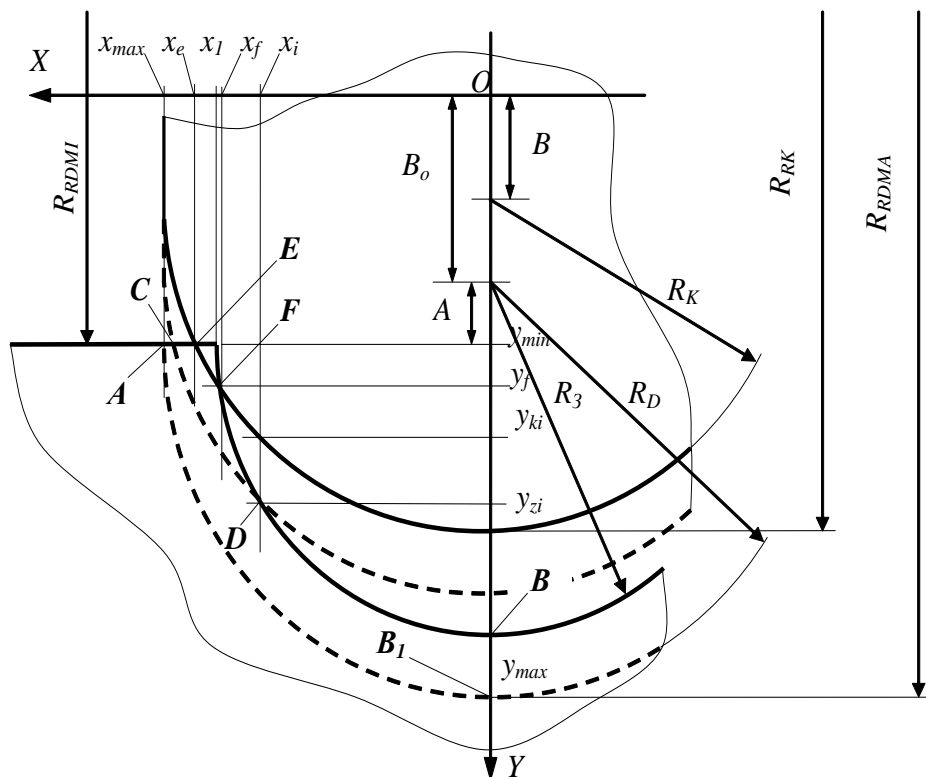


Рисунок 1.49 – Схема зрізування припуску в поздовжньому перетині зони обробки



Значення величини прив'язки початкової точки відліку до поверхні гайки може бути визначене за формулою:

$$B_o = \sqrt{R_K^2 - \sqrt{R_3^2 - A^2}} .$$

Через конструктивні особливості для параметра  $A$  завжди виконується умова  $A > 0$ . Тому в якості граничного значення координати  $X_i$  для зручності проведення обчислень приймається значення радіуса профілю шліфувального круга:

$$X_{max} = R_K .$$

При різанні починає поступово утворюватися контур деталі. В створеній моделі цей процес відтворюється визначенням координат точок цього контуру шляхом присвоєння їм значень координат точок вже визначених масивів заготовки та шліфувального круга. Для першого проходу це, відповідно, ділянки АЕ,FB та EF (рис. 1.49). В математичному вигляді цей процес описується системою рівнянь

$$\begin{cases} Y_{Di} = Y_{Ki}; Y_{Ki} \geq Y_{Zi} \\ Y_{Di} = Y_{Zi}; Y_{Ki} < Y_{Zi} \end{cases} .$$

Операція шліфування вважається закінченою при присвоєнні координаті контуру деталі  $Y_{Di}$  значення координати точки  $B_l$  (рис. 1.49)

$$Y_{Di} = Y_{max} .$$

За відомими координатами точок контурів шліфувального круга і заготовки визначається швидкість зняття припуску  $Q$ . Ця величина є характерним показником напруженості процесу внутрішнього шліфування і розраховується за формулою

$$Q = \frac{L_K^2}{2} ,$$

де  $L_K$  – довжина дуги контакту.

Величина довжини  $L_K$  дуги контакту розраховується відповідно до геометричних залежностей, що отримуються при розгляді поперечного перетину гайки і шліфувального круга по незалежній координаті  $X$  (рис. 1.50):

$$L_{Ki} = R_{Ki} \cdot \alpha_{Ki} ,$$

де  $R_{Ki}$  – радіус шліфувального круга в тому ж перетині,  $\alpha_{Ki}$  – кут контакту інструмента і деталі.



$$\frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J}$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – відповідно радіуси шліфувального круга в крайніх точках контакту інструменту і заготовки;  $E$  – модуль пружності матеріалу шпинделя;  $J$  – момент інерції перетину шпинделя;  $l$  – довжина шпинделя.

Замкненість пружної технологічної системи, в якій відбувається процес різання, ураховується за допомогою ітераційного процесу, що дозволяє шляхом поступового наближення визначити вихідні параметри процесу, який встановився. Збільшення кількості ітерацій приводить до підвищення точності моделювання, але значно затримує обчислювальний процес на комп'ютері. Тому після практичної реалізації розробленого математичного апарату було експериментально визначено, що 7 ітерацій цілком достатньо для отримання фактичних координат деталі для процесу, що встановився.

Урахування зношування форми круга при шліфуванні дозволяє отримати фактичні координати профілю інструменту з урахуванням нерівномірності зношування за профілем канавки внаслідок нерівномірності розподілу припуску:

$$\frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J} \frac{R_1 R_2}{E J}$$

де  $\Delta t$  – елементарний відрізок часу роботи інструмента.

Розроблений математичний апарат дозволяє представити процес внутрішнього шліфування в вигляді математичної моделі, опис явищ в якій ґрунтується на основі фізичних процесів які відбуваються під час зняття припуску.

При реалізації розробленого алгоритму у вигляді прикладної програми для ПК в якості початкових умов були взяті величини, що характеризують реальний процес шліфування внутрішньої гвинтової поверхні гайки на Київському авіаційному заводі “АВІАНТ”.

Під час оптимізації процесу внутрішнього шліфування основними критеріями виступали підвищення продуктивності процесу обробки і зменшення собівартості в умовах існуючих обмежень за якістю і геометричною точністю внутрішньої канавки.

На першому етапі оптимізації процесу виконано зниження нерівномірності зносу шліфувального круга протягом циклу шліфування. Серед існуючих варіантів найкращим саме для даного процесу багатопрохідного профільного шліфування визначено метод попередньої корекції профілю канавки заготовки на токарній операції.

На другому етапі оптимізації було визначено керування за каналом поперечної подачі на прохід. Проте, особливістю застосування даного методу для шліфування гвинтової канавки є необхідність обмеження можливих значень подач за допомогою граничного алгоритму. Даний підхід може бути застосова-

ний для шліфування внутрішніх гвинтових поверхонь лише з урахуванням його специфічних рис, а саме: суттєвої нерівномірності припуску, що знімається, не тільки за профілем канавки, а й від проходу до проходу. Тому при профільному шліфуванні немає пропорційної залежності між глибиною припуску та швидкістю зняття припуску.

Метою побудови математичної моделі було моделювання процесу шліфування для вивчення поведінки системи за різних вхідних даних. Найкращим інструментом побудови моделі є програмне забезпечення, за допомогою якого і необхідно реалізувати розроблені алгоритми у вигляді програмних продуктів. При чому окремі методи керування слід винести у різні програмні продукти для можливого окремого поширення і застосування.

Розроблена прикладна програма для визначення оптимального профілю заготовки дозволяє визначати в автоматичному режимі величину радіусу заготовки на основі вхідних даних, що вводяться користувачем шляхом діалогу з комп'ютером через початкову форму (рис. 1.51, а). У результаті розрахунку величина інтегральної інтенсивності зняття припуску максимально наближена до прямої лінії (рис. 1.51, б), що дозволяє зменшити кількість правок шліфувального круга.

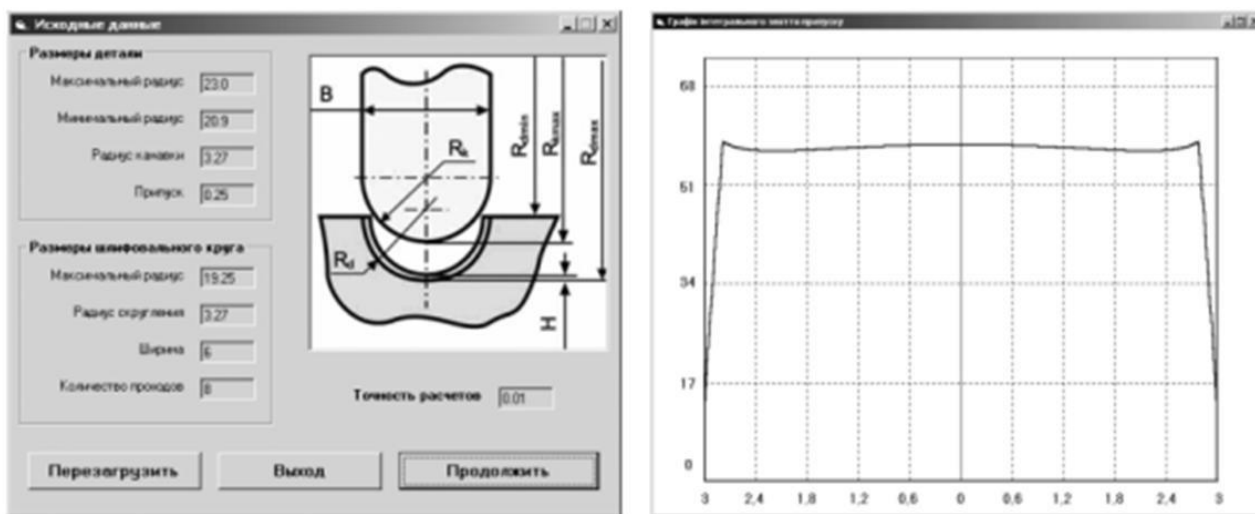


Рисунок 1.51 – Інтерфейс програми визначення профілю заготовки (а) і графік залежності інтегральної інтенсивності шліфування для оптимального  $R_z$  (б)

Проведене експериментальне дослідження розробленої моделі за початковими даними КАЗ „Авіант” і ВАТ „Мікрон” дозволило повністю підтвердити висновки як про характер процесів, що відбуваються при профільному внутрішньому шліфуванні, так і їх кількісну оцінку. Проведене експериментальне визначення закону управління гайки №42.1605.03.315.00 дозволило визначити закон, який зменшує час обробки на  $\Delta t = 14,09$  хв, що відповідає підвищенню продуктивності в 1,55 рази без урахування зменшення допоміжного часу за рахунок зменшенні кількості правок шліфувального круга (рис. 1.52).

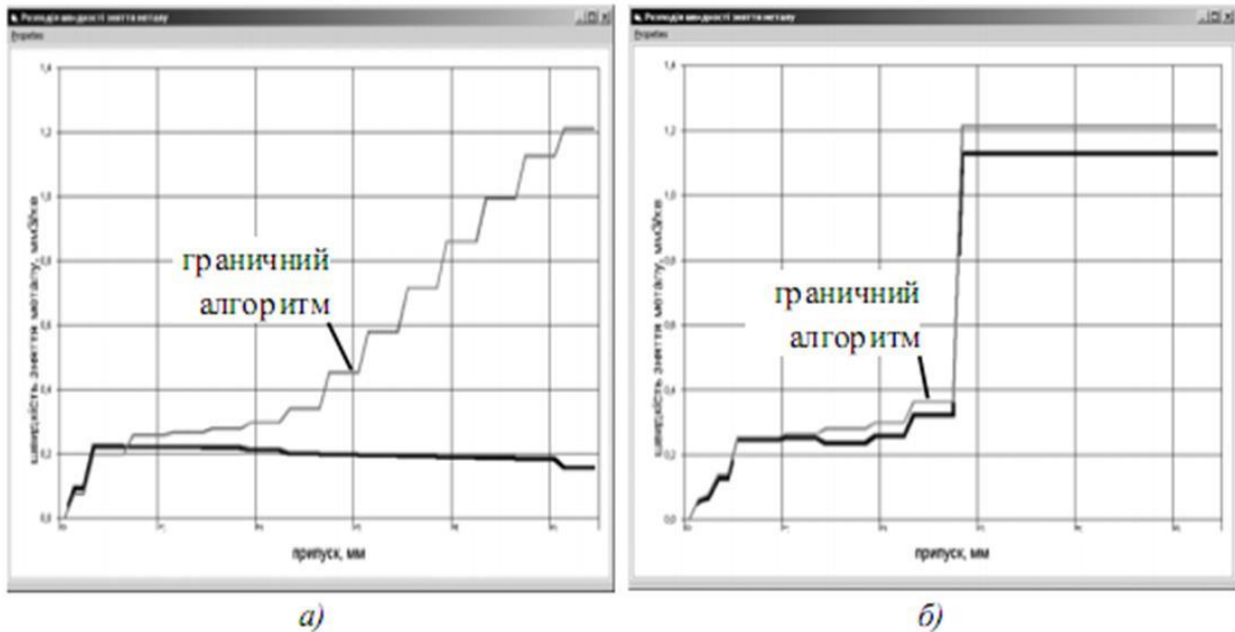


Рисунок 1.52 – Розподіл швидкості зняття припуску: типовий алгоритм побудови ТП (а) і розроблений алгоритм побудови ТП (б)

Перевірка результатів наукової роботи на ВАТ „Мікрон” шляхом обробки пробної партії гайок підтвердила результати проведених експериментальних досліджень за допомогою ПК. Впровадження розробленої схеми управління дозволить підвищити продуктивність процесу шліфування канавок гайок КГП в 1,8...2 рази. Це, в свою чергу, дозволяє знизити собівартість операції шліфування на 35...55 % в залежності від типорозміру гайки. А в структурі ТП виготовлення гайок КГП собівартість технологічної операції шліфування внутрішньої профільної канавки складає 20 % від загальної.

Таким чином, розв’язана актуальна науково-технічна проблема підвищення продуктивності шліфування внутрішньої гвинтової канавки гайок кулькової гвинтової пари за рахунок раціонального вибору розташування припуску і форми заготовки та оптимального керування поперечною подачею за прохід.

Передумовою визначення закону оптимального керування поперечною подачею на прохід є розрахунок граничного алгоритму зняття припуску у фазових координатах: задане переміщення бабки шліфувального верстата – фактична швидкість зняття припуску. В якості обмежувальних факторів необхідно прийняти максимально допустимі пружні деформації ТОС і забезпечення процесу шліфування без припалів. Таким чином, для процесів внутрішнього профільного шліфування визначається унікальний граничний закон.

Запропонований алгоритм визначення оптимального закону керування поперечною подачею дозволяє на основі граничних значень визначити оптимальні величини подач для кожного проходу безпосередньо в процесі моделювання процесу шліфування. Реалізація у вигляді прикладної програми дозволяє

поєднати в одному програмному продукті визначення як граничного закону, так і оптимального закону керування поперечною подачею на прохід та значно спростити практичну реалізацію.

Результатом моделювання є алгоритм побудови технологічного процесу шліфування внутрішньої профільної канавки гайки КГП, який полягає у визначенні оптимального (в залежності від вихідних даних процесу обробки) закону керування, що дозволяє підвищити продуктивність процесу шліфування за рахунок збільшення швидкості зняття припуску в межах граничного закону в 1,8...2 рази в залежності від типорозміру КГП.

#### 1.4. Математичне і технологічне забезпечення механічної обробки робочої поверхні колінних протезів

Складні криволінійні поверхні зустрічаються досить часто, наприклад, на стегнових компонентах ендопротезу колінного суглобу. Розвиток технічного прогресу спричинив появу матеріалів, за допомогою яких можна замінити зношений суглоб людини штучним. До них відносять нетоксичні й високо інертні до організму людини титанові сплави, поліетилен надвисокої молекулярної маси, оксидна кераміка.

##### Біомеханіка колінного суглоба.

Штучний колінний суглоб в точності повторює елементи природного суглоба і дозволяє здійснити необхідний об'єм рухів (рис. 1.53). Біомеханіка колінного суглоба передбачає наступні види рухів:



Рисунок 1.53 – Поздовжні рухи в колінному суглобі

- рух навколо фронтальної (горизонтальної) осі – згинання, зменшення кута між поєднуваними кістками, й розгинання – збільшення цього кута;
- рух навколо сагітальної (горизонтальної) осі – наближення до середньої площини й віддалення від неї;
- рух навколо вертикальної осі (обертання);
- круговий рух, при якому відбувається перехід з однієї осі на іншу, при цьому один кінець кістки описує коло, а вся кістка – фігуру конуса.

Колінний суглоб характеризується виключно високою рухливістю навколо поперечної осі: активне згинання  $130^\circ$ , максимальне розгинання із середнього положення складає  $10\text{--}12^\circ$ . Отже, загальна рухливість у суглобі досягає  $140\text{--}142^\circ$  (рис. 1.54).

В колінному суглобі, крім обертального й продовжного рухів, є й ротації поверхонь одна відносно одної й ковзання, а також змінювання миттєвого центру обертання. Характер руху в суглобах спричинив відповідний розвиток форми їх поверхонь. Геометрична вісь колінного суглоба й фактична вісь обертання під час ходіння не співпадають; динамічна вісь обертання переміщується, рисує криву “J”. Тому робоча поверхня кульшового компонента колінного суглоба має форму кривої (рис. 1.55).



Рисунок 1.54 – Кути згинання здорового колінного суглоба людини і кутові рухи компонентів ендопротеза

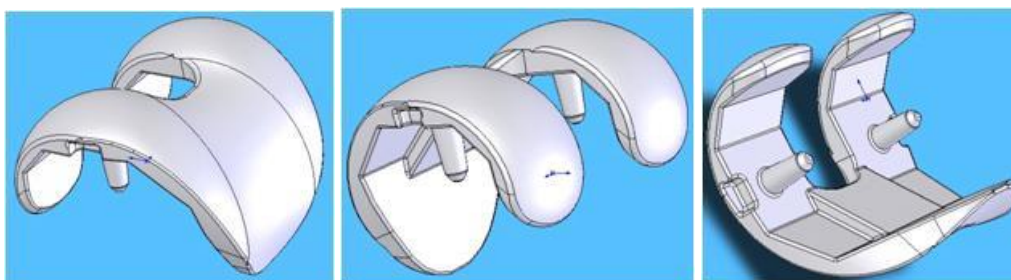


Рисунок 1.55 – 3D- модель кульшового компонента ендопротезу колінного суглоба

Колінний суглоб кожної людини має суцільно індивідуальну геометричну форму, що обумовлює необхідність застосування гнучких технологій, верстатів з ЧПК, а високі вимоги до точності та шорсткості робочої поверхні вимагають застосування фінішних операцій шліфування. У випадку виготовлення протеза з металу, зі значним припуском для попередньої обробки, слід використовувати лезову обробку фрезеруванням сферичною (рис. 1.56, *a*) або циліндричною (рис. 1.56, *б*) фрезами, а для завершальної операції – обробку шліфуванням кру-

гом у формі тора (рис. 1.56, в). У випадку виготовлення протеза з кераміки – також обробку шліфуванням кругом у формі тору. Як бачимо з наведених схем механічної обробки, в деяких випадках ми маємо справу з високошвидкісною механічною обробкою деталей.

Сутність високошвидкісної механічної обробки. *Високошвидкісна механічна обробка* – це одна із сучасних технологій, що, у порівнянні зі звичайним різанням, дозволяє збільшити ефективність, точність й якість механообробки. Її відмінна риса – висока швидкість різання, за якої значно збільшується температура в зоні утворення стружки, матеріал оброблюваної деталі стає м'якше, і сили різання зменшуються, що дозволяє інструменту рухатися з великою робочою подачею (табл. 1.5).

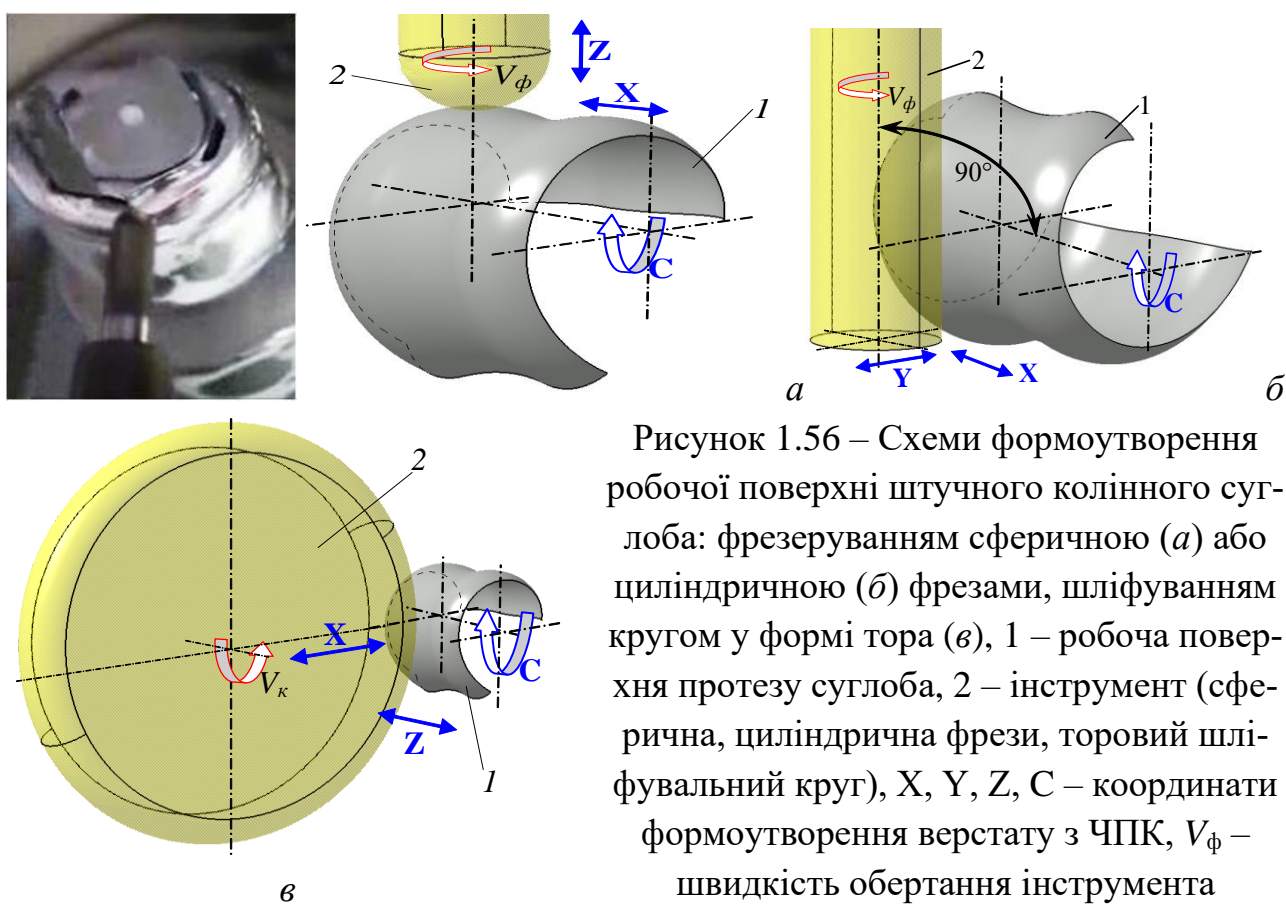


Рисунок 1.56 – Схеми формоутворення робочої поверхні штучного колінного суглоба: фрезеруванням сферичною (а) або циліндричною (б) фрезами, шліфуванням кругом у формі тора (в), 1 – робоча поверхня протезу суглоба, 2 – інструмент (сферична, циліндрична фрези, торувий шліфувальний круг), X, Y, Z, C – координати формоутворення верстату з ЧПК,  $V_\phi$  – швидкість обертання інструмента

Високошвидкісна механічна обробка відноситься до числа найбільш прогресивних технологій і швидко розвивається. Високошвидкісна механічна обробка (*HSM – High Speed Machining*) й, зокрема, високошвидкісне фрезерування (*HSM – High Speed Milling*), в останні роки істотно змінили підхід до способів механообробки. У світі сьогодні спостерігається стійка тенденція створення верстатів, призначених для HSM. Вирішальний фактор в оцінці процесу HSM – продуктивність верстатів, які визначають вартість виробництва й, таким чином, амортизацію інвестицій.



**Таблиця 1.5 – Режими високошвидкісного різання**

Оброблювані матеріали	Інструментальні матеріали	Спосіб обробки	Швидкість різання	Величина подачі, мм/хв.
Сплави алюмінію, магнію, волокнисті матеріали	Тверді сплави, алмази	Фрезерування	1000...7000 м/хв.	5 000...15 000
Жароміцні сталі, графіт, мідь	Тверді сплави, кераміка, КНБ	Фрезерування	350...2000 м/хв.	1 000...6 000
Волокнисті матеріали, легкі сплави	Безвольфрамові тверді сплави	Свердління	100...300 м/хв.	10 000
Загартовані сталі	Абразив з КНБ	Шліфування	80...2000 м/с.	10 000

Перше офіційне пояснення явища HSM було запропоновано Карлом Саломоном в 1931 році. Він припустив, що при деякій швидкості різання, що є в кілька разів вище, ніж під час звичайної механообробки, теплопередача від стружки до інструмента починає зменшуватися. Неможливо (навіть сьогодні) у повному обсязі перевірити теорію, запроповану Карлом Саломоном, і ми можемо спиратися тільки на результати недавно здійснених експериментів і матеріали конференцій по HSM, що регулярно збираються у світі (рис. 1.57).

Ефект HSM пов'язаний зі структурними змінами матеріалу (через пластичні деформації, здійснювані з великою швидкістю) у місці відриву стружки. При підвищенні швидкості деформацій сили різання спочатку зростають, а потім, з досягненням певної температури в зоні утворення стружки, раптом починають істотно знижуватися. Найбільш цікавим є те, що час контакту різальної кромки із заготовкою й стружкою настільки малий, а швидкість відриву стружки настільки висока, що більша частина тепла, що утворюється в зоні різання, видаляється разом зі стружкою, а заготовка й інструмент просто не встигають нагріватися.

Формування стружки – найбільш важливий аспект HSM. Як же відбувається процес теплообміну в зоні різання? Дослідження, проведені під час HSM із правильно підібраними параметрами, показали, що 75% виділеного тепла відводиться зі стружкою, 20% – через інструмент, і 5% – через оброблювану деталь (рис. 1.58).

Звідси маємо один з найбільш важливих принципів теорії HSM: найбільша кількість виділеного тепла відводиться разом зі стружкою.

Планомірне дослідження високошвидкісного фрезерування було розпочато у Німеччині в 1984 році 18-ма промисловими фірмами й інститутом ITW. У процесі досліджень технології високошвидкісного різання розглядалися режи-

ми обробки різних матеріалів, вплив по суті нової технології на характеристики верстата і його вузлів. У результаті досліджень вироблені рекомендації з високошвидкісної обробки різних матеріалів (табл. 1.6).

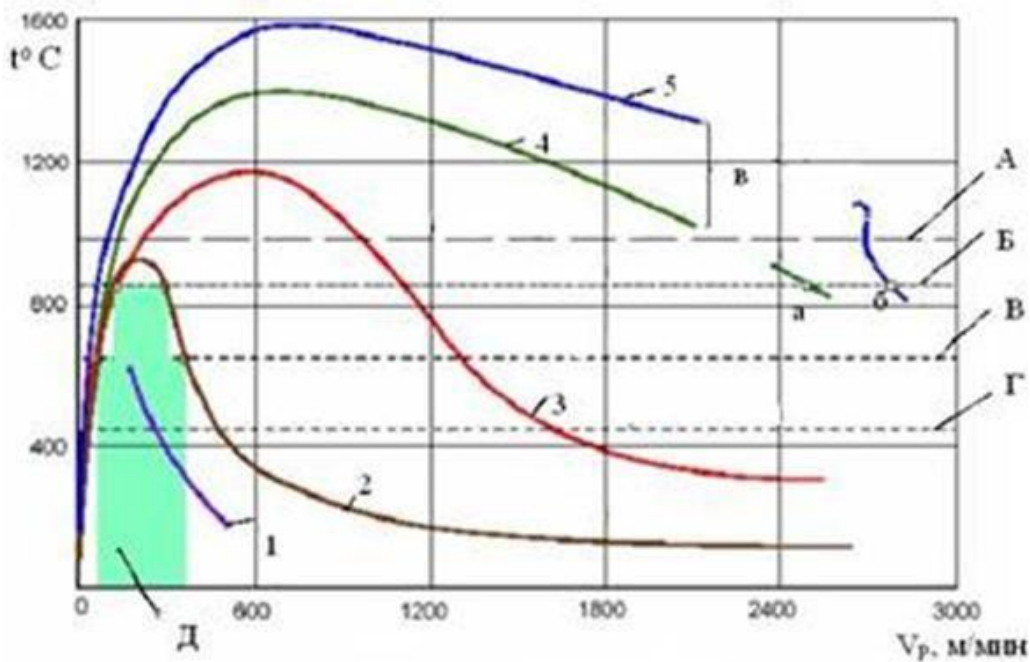


Рисунок 1.57 – Залежність температури від швидкості різання: 1 – алюміній, 2 – кольорові метали, 3 – бронза, 4 – ливарні чавуни, 5 – сталі; інструмент: А – карбід вольфраму (980 °С), Б – вольфрамо-кобальтові сплави (850 °С), В – вольфрамові сталі (650 °С), Г – вуглецева сталь (450 °С); – обробка не рекомендується; а – 39000 м/хв., б – вище 45000 м/хв., в – сплави залізо-вуглець

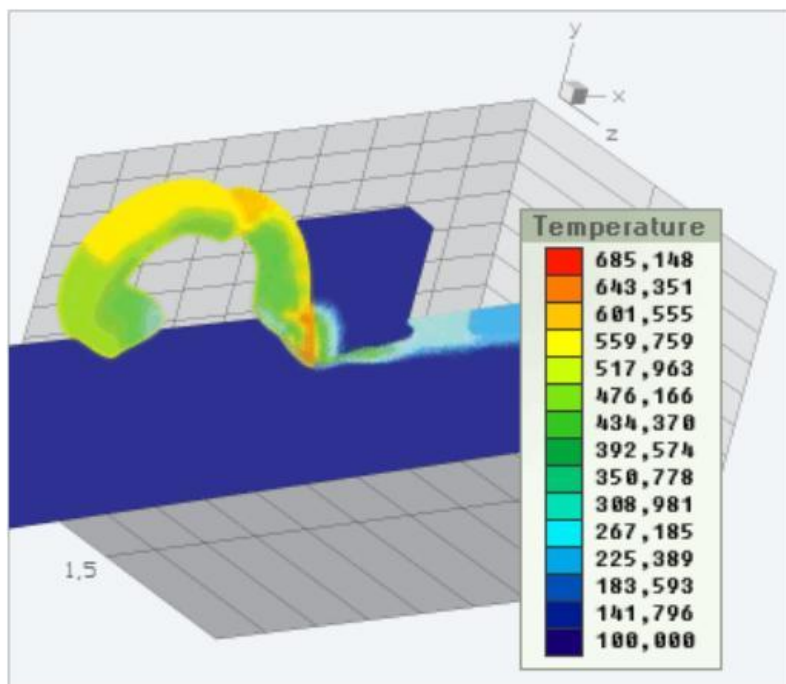


Рисунок 1.58 – Розподіл температури в зоні різання під час HSM

**Таблиця 1.6 – Порівняння традиційного й високошвидкісного фрезерування пальцевою фрезою зі сферичною формою різальних кромок**

	Традиційна обробка	Високошвидкісне фрезерування
Частота обертання, n хв <sup>-1</sup>	6000	15–40000
Подача, f м/хв	0.2–0.8	1.5–5
Глибина різання, t мм	1–5	0.02–0.5
Твердість HRC	< 36	< 62
Сила різання	висока	низька
Тепловиділення	високе	мале

Порівняння параметрів традиційного й високошвидкісного фрезерування пальцевою фрезою зі сферичною формою різальних кромок показує незаперечну перевагу останнього.

#### Галузі застосування HSM

HSM використовується, головним чином, у трьох секторах промисловості. Перша галузь – промисловість, що має справу з механообробкою алюмінієвих сплавів для виробництва компонентів автомобілів, корпусів для приладів або медичних пристроїв. Ця промисловість має потребу у високопродуктивному процесі видалення металу, тому що технологічний процес складається з багатьох операцій механообробки.

Друга галузь – авіаційно-космічна промисловість, у якій здійснюється механічна обробка великогабаритних деталей з алюмінієвих сплавів, часто з тонкими стінками. Економічно вигідно виконувати всі операції обробки за одну установку.

Третя галузь – інструментальна промисловість, в якій потрібно здійснювати чистову обробку твердих матеріалів. У цій галузі важливо обробити деталі з високою швидкістю й зберегти при цьому високу точність. Використовуючи HSM, можна перепланувати процес виробництва за рахунок скорочення стадій електрохімічної обробки (фрезерування електродом) (ECM – *electrochemical machining*) й електроерозійної обробки (EDM – *electrical discharge machining*).

В області зазначених галузей машинобудування спостерігаються тенденції використання нових матеріалів: композитних, високоміцних, пластичних мас, переходу від збірних деталей до монолітних. Це, у свою чергу, ставить нові завдання перед верстатобудуванням, зокрема, істотно підвищити швидкість знімання металу під час обробки деталей з алюмінієвих сплавів особливо великих габаритів й складної конфігурації. Пріоритетним завданням металообробної галузі у зв'язку із цим є досягнення високої продуктивності обробки матеріалів з суворим дотриманням рівня якості продукції. А одним з головних напрямів

мків тут вважається вибір раціональних параметрів процесу різання.

Уже сьогодні промисловість провідних країн миру досить широко використовує HSM при швидкостях різання 500...1500 м/хв. і більше (табл. 1.5) під час обробки:

- ✓ прес-форм і штампів кінцевими фрезами для одержання виробів, що широко застосовуються в автомобільній й аерокосмічній промисловості. Матеріал виробів – жароміцні сталі, алюмінієві сплави, конструкційні органікпластики, армовані скловолокном й ін.;
- ✓ фольгованих друкованих плат (швидкісне свердління), для електронної промисловості;
- ✓ виробів з високоміцних алюмінієвих сплавів в аерокосмічній й автомобільній промисловості й ін.

#### Переваги високошвидкісної механічної обробки

Найбільш повно принципи й можливості HSM реалізуються при 5-осьовому фрезеруванні (рис. 1.59). У недалекому майбутньому HSM буде розглядатися як 5-осьова механічна обробка, тому що вона дозволяє обробляти важкодоступні поверхні більш ефективно, використовуючи інструмент із меншим вильотом.

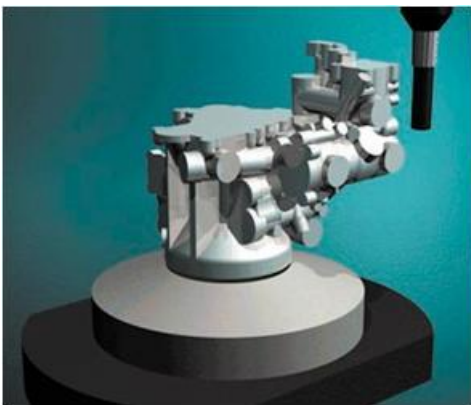


Рисунок 1.59 – П'ятиосьова обробка дозволяє обробити всю деталь за один або два установи

Якщо проаналізувати форму алюмінієвих корпусних деталей паливної й гідравлічної апаратури, то вибір верстата практично однозначний – п'ятиосьовий фрезерний або багатоцільовий механообробний верстат. Такий верстат забезпечить доступ до різних сторін деталі з однієї установки й дозволить орієнтувати плоскі елементи деталі по нормалі до шпинделя, що дасть можливість використати торцеві або кінцеві фрези для обробки площин й отворів (рис. 1.59). Якщо для обробки використати триосьове обладнання, то деталь необхідно буде обробляти на верстаті за декілька технологічних установів, що пов'язано із проблемами базування й пере-

встановлення заготовки й призведе до втрати продуктивності.

На п'ятиосьових фрезерних верстатах можна фіксувати поворотний стіл (дві осі) і виконувати позиційну (так звану 3+2) обробку. Це дозволяє істотно підвищити швидкість і точність фрезерування: якщо при безперервному п'ятиосьовому фрезеруванні точність становить порядку 10-11 мкм, то при позиційному можна досягти точність в 4-5 мкм. Крім того, довжина керуючих програм для безперервної п'ятиосьової обробки виявляється в середньому на 15% біль-

шою в порівнянні з позиційною обробкою. Наслідком цього є збільшення в часі безперервної п'ятиосьової обробки на 15-20%, у порівнянні з позиційною.

Єдина причина, чому 5-осьове фрезерування широко не застосовувалося дотепер – це те, що електродвигуни роторного типу часто не можуть забезпечити крутний момент, необхідний для важкого фрезерування. Але це не є обмеженням для процесу HSM, здійснюваного з невеликими силами різання.

Отже, у порівнянні із традиційною обробкою високошвидкісне фрезерування забезпечує:

- зниження сил різання на 30 % і більше, що зменшує деформацію оброблюваної деталі й дозволяє обробляти тонкостінні деталі, до точності форми яких пред'являються високі вимоги;
- зменшення температури оброблюваної деталі;
- забезпечення шорсткості поверхні, аналогічній по якості тій, що формується абразивною обробкою;
- збереження точності обробки протягом тривалого часу в результаті зниження напружень у верстаті й інструменті за рахунок зменшення сил різання;
- збільшення подачі в 5–10 разів;
- ріст продуктивності знімання металу в 3–5 разів;
- зменшення вібрацій інструмента й деталі;
- зниження вартості інструмента;
- зниження часу обробки на 40-70 % і вартості на 20–50 %.

Перевага HSM підвищується також за рахунок обробки в надкритичному діапазоні коливань: при високих частотах обертання, які використовуються при HSM, значно перевищуються частоти власних коливань деталі, інструмента й компонентів верстата. Одночасно із цим, завдяки невеликим поперечним перетинам зрізу, сили різання невеликі, що сприятливо позначається на точності обробки. Крім того, забезпечується висока якість одержуваної поверхні, відсутність дроблення при різанні, можливість обробки тонкостінних виробів.

#### Математичне і технологічне забезпечення механічної обробки робочої поверхні протезів колінних суглобів людини

Для керування формоутворенням складних криволінійних поверхонь на сучасних верстатах з ЧПК широко застосовують САМ- системи (Computer Aided Manufacturing), за допомогою яких автоматизується процес створення керуючої програми. Проте залишається низка невирішених проблем, пов'язаних із застосуванням сучасних САМ- систем провідних фірм (Pro/Engineer, Cimatron, Delcam тощо).

По-перше, вони мають універсальний характер і забезпечують лише геометричне формоутворення складної криволінійної поверхні, але не вирішують завдання з автоматичного вибору оптимальної стратегії формоутворення й автоматичного призначення режимів різання, тобто режим різання призначається технологом-програмістом і зазвичай не є оптимальним. Крім того, сучасні системи не враховують динамічні навантаження на приводи верстатів з ЧПК на ділянках холостого руху.

По-друге, створення алгоритмів оптимального керування ускладнюється тим, що лезовий та абразивний процеси обробки різанням складних криволінійних поверхонь є недостатньо вивченими.

По-третє, немає усталених технологічних рішень з кінематики формоутворення на верстатах з ЧПК – пропонуються технології, спрямовані на невідправдане застосування 5-ти координатної обробки, що значно підвищує собівартість виготовлення.

Крім того, до останнього часу в Україні поки що не створені технології виготовлення робочої поверхні протезів колінних суглобів людини, орієнтовані на використання верстатів з ЧПК. Через це розробка технологічного забезпечення механічної обробки робочої поверхні протезів колінних суглобів людини є актуальною науково-технічною задачею, яка потребує вирішення.

Метою роботи, яка була виконана на кафедрі технології машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» була розробка алгоритмів та створення модулів САМ системи автоматизованого програмування механічної обробки робочої поверхні штучного колінного суглоба людини на фрезерному та шліфувальному верстатах з ЧПК.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні задачі:

1. Розробити технологічні схеми формоутворення робочої поверхні протезів колінних суглобів людини на верстатах з ЧПК, які мінімізують кількість керованих координат;
2. Розробити методику завдання вихідних даних, що описують робочу поверхню у вигляді тривимірного числового масиву, та представити їх у вигляді сплайн-функцій;
3. Розробити математичні моделі формоутворення робочої поверхні протезів колінних суглобів людини фрезеруванням та шліфуванням;
4. Розробити алгоритм автоматичного вибору стратегії формоутворення, що забезпечує необхідну шорсткість робочої поверхні протезів та спроектувати оптимальні (за мінімумом динамічних навантажень приводів верстата з ЧПК) траєкторії переміщення на холостих рухах;

5. Створити прикладні програми моделювання процесів обробки, що автоматично визначатимуть всі параметри процесу різання, необхідні для керування з метою стабілізації умов різання за всією формоутворюючою траєкторією;

6. Створити модуль САМ- системи автоматичного програмування верстатів з ЧПК для обробки робочої поверхні протезів колінних суглобів людини;

7. Розробити практичні рекомендації по використанню створеної САМ- системи автоматизованого проектування керуючих програм для виготовлення протезів колінного суглоба людини.

В результаті виконання поставлених задач запропоновано нові технологічні схеми обробки робочої поверхні протезу колінного суглоба фрезеруванням і шліфуванням.

Оскільки вихідна 3D- модель робочої поверхні протезів колінних суглобів людини була представлена у вигляді тривимірного числового масиву у прямокутній системі координат, першим кроком було розроблення методики перетворення вихідного числового масиву, який поданий у прямокутній системі координат, на 3D- моделі робочої поверхні у полярній системі координат, які відповідають обраній схемі формоутворення на верстаті, що передбачає формоутворення в полярній системі координат. Необхідність такого перетворення пов'язана з обертальним рухом заготовки в процесі її обробки.

Наступним кроком було застосування сплайн-функцій, що дозволяють використовувати нерівномірний крок сітки без викривлення форми робочої поверхні протеза. Тут створені на попередньому етапі цифрові масиви перетворюються у сплайн-функції, а саме Ермітовий кубічний сплайн, оскільки саме такий сплайн зберігає ізогеометрію функції і є інваріантним по відношенню до нерівномірності кроку сітки.

Далі для технологічної схеми шліфування робочої поверхні протезу кругом у формі тору визначено оптимальне положення технологічної осі шліфувального круга. Знайдено таке положення технологічної осі, коли максимальний діапазон змінювання кута притиснення у кінематичній парі інструмент – деталь буде найменшим. Кут притиснення в такому разі визначається за формулою

$$\gamma_i = \arctan\left(\frac{dr_i / d\alpha_i}{r_i}\right).$$

Завдяки зменшенню діапазону зміни кута притиснення

зменшилась похибка формоутворення при відхиленні діаметра шліфувального круга від розрахункового внаслідок його правки.

Далі розроблена методика проектування керуючої програми обробки на верстатах з ЧПК. Проектування керуючої програми процесу обробки протеза на верстатів з ЧПК необхідно проводити за узагальненою блок-схемою, що представлена на рис. 1.60. Після того, як проведено перетворення вихідного число-

вого масиву на 3D- модель робочої поверхні у полярній системі координат, інтерполяцію сплайн-функціями, визначено положення технологічної осі шліфувального круга, вибрано геометричні характеристики відповідного інструмента (фрези чи шліфувального круга) наступним етапом є моделювання геометричної взаємодії. На цьому етапі розробляються траєкторії обробки й формоутворення, визначається еквідистанта й крок переміщення інструмента по рядках. На останньому етапі моделюється процес зрізування припуску, а саме: визначаються параметри процесу різання, для процесу шліфування також граничний закон змінювання кута притиснення у кінематичній парі інструмент – деталь, розробляється керуюча програма процесу обробки протеза зі стабілізацією умов різання.

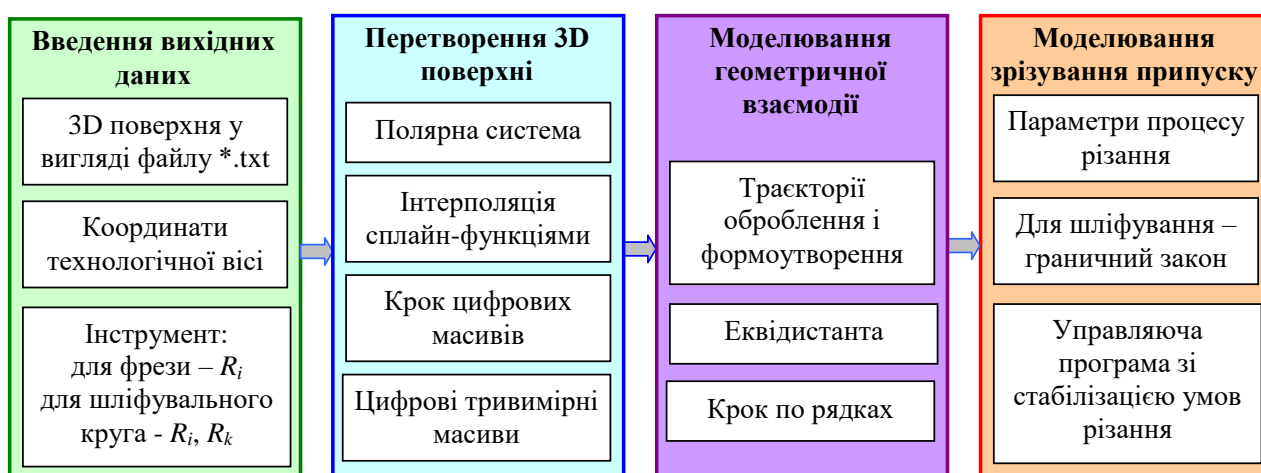


Рисунок 1.60 – Блок-схема укрупненого алгоритму проектування керуючої програми

*Моделювання формоутворення робочої поверхні.* Відповідно до запропонованої методики формоутворення складної робочої поверхні протезу колінного суглоба людини повинно здійснюватися синхронними рухами за еквідистантами за схемою обробки «за рядками» від обертальної координати. До кожної зі схем формоутворення: фрезерування сферичною або циліндричною фрезами, шліфування кругом у формі тору – розроблені математичні моделі геометричної взаємодії інструмента й деталі для двох перетинів.

*Проектування формоутворюючих траєкторій за віссю Z робочої поверхні,* тобто уздовж осі її обертання. Детермінована складова шорсткості поверхні утворюється при перетині двох сусідніх положень сферичної поверхні інструмента при зміні кривизни оброблюваної поверхні. Розв’язання такої задачі дозволило розрахувати крок зміни подачі «на рядок». Оскільки центр фрези рухається за формоутворюючою траєкторією з певною подачею, то подача  $S_p$  на рядок визначається також за цією траєкторією. Отже, під час обробки випуклої, плоскої чи увігнутої поверхні детермінована складова параметру шорсткості  $R_z$



може бути розрахована, виходячи з геометричних співвідношень схеми обробки, показаної на рис. 1.61.

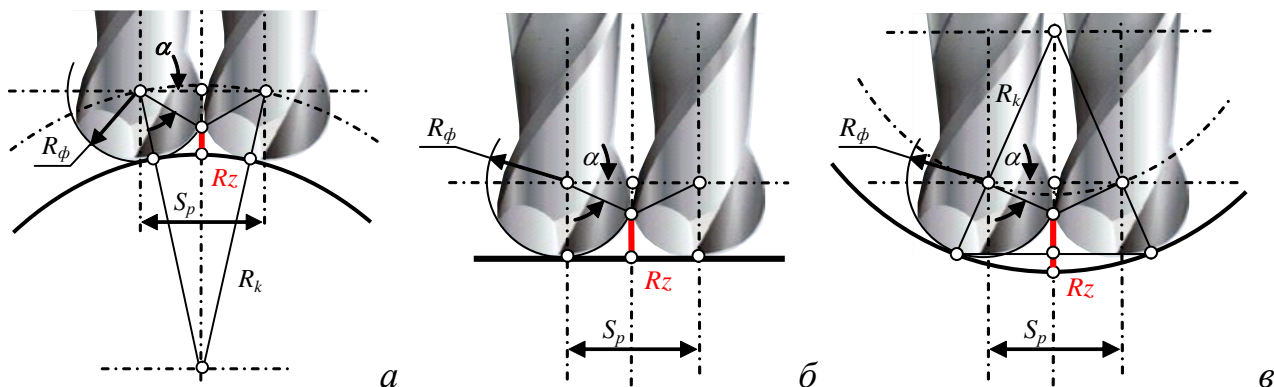


Рисунок 1.61 – Схеми моделювання формоутворення шорсткості в частині III детермінованої складової для наступних поверхнь: опукла (а), плоска (б), увігнута (в)

*Проектування траєкторій холостих рухів.* Оскільки процес обробки шліфуванням відбувається з високими швидкостями формоутворення і може бути віднесений до процесів HSM, то при визначенні траєкторій було враховано принцип мінімізації динамічних навантажень на приводи верстату. За критерієм мінімуму другої похідної та максимальної плавності руху на траєкторії холостого ходу застосовано гармонічний закон зміни прискорення в полярній системі координат. Однак отримана математична модель прискорення інструмента в полярній системі координат у вигляді відповідного рівняння є трансцендентною і аналітично не може бути розв'язаною. Тому для її розв'язання було запропоновано чисельний метод за спеціальною процедурою, яка оснований на використанні ітераційного алгоритму і створена прикладна програма, інтерфейс якої представлений на рис. 1.62.

Таким чином, на цьому етапі був розроблений алгоритм автоматичного проектування траєкторій холостих рухів, для виконання високошвидкісної обробки за умов максимально плавного спряження траєкторій робочих рухів на двох суміжних проходах при довільних значеннях похідних на кінцях таких траєкторій, що гарантує мінімум динамічних навантажень на приводи верстата з ЧПК.

В рамках роботи розроблено також *новий підхід до моделювання 3D обробки*, який полягає у представленні задачі вирішення перетину двох тіл у просторі як двох 2D- задач, для яких створені відповідні циклові алгоритми і прикладна програма моделювання, що автоматично визначає головні параметри процесу різання під час формоутворення складної робочої поверхні протеза.

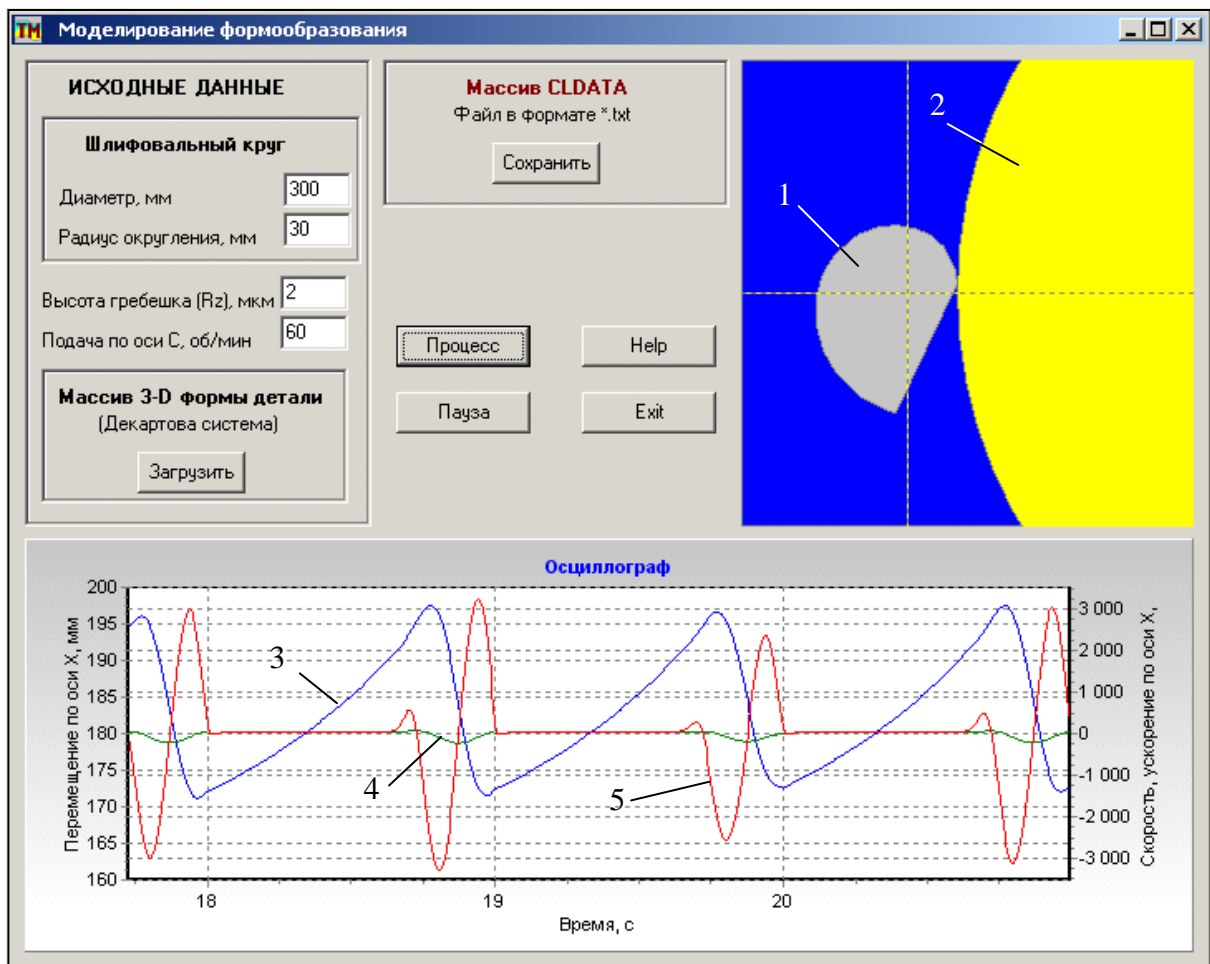


Рисунок 1.62 – Інтерфейс моделювання формоутворення: 1 – деталь, 2 – інструмент, 3 – переміщення, 4 – швидкість, 5 – прискорення

*Новий підхід до моделювання 3D- обробки.* Характерною особливістю обробки криволінійних поверхонь є наявність нерівномірного розподілу припуску вздовж оброблюваної поверхні (рис. 1.63). Значні коливання сил різання, внаслідок нерівномірного розподілу припуску, досить часто є причиною передчасного виходу з ладу різального інструмента та втрати точності обробленої поверхні.

Під час моделювання 3D- обробки використано новий підхід, заснований на одночасному моделюванні формоутворення і процесу зняття припуску числовим методом – результати використовуються при автоматичному проектуванні керуючої програми.

Моделювання процесу зрізування припуску виконується за цикловим алгоритмом, укрупнена блок-схема якого показана на рис. 1.64. Алгоритм передбачає представлення геометричних образів формоутворювальної траєкторії, початкової інструментальної поверхні і заготовки у вигляді дискретних цифрових масивів, за рахунок чого забезпечується універсальність алгоритму при будь-яких геометричних формах.

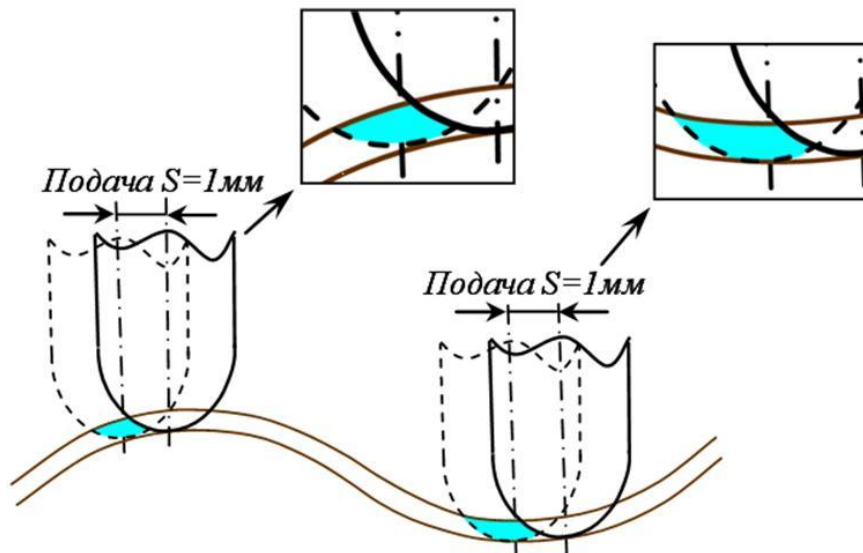


Рисунок 1.63 – Ділянки поверхні з нерівномірним об'ємом припуску, що зрізується

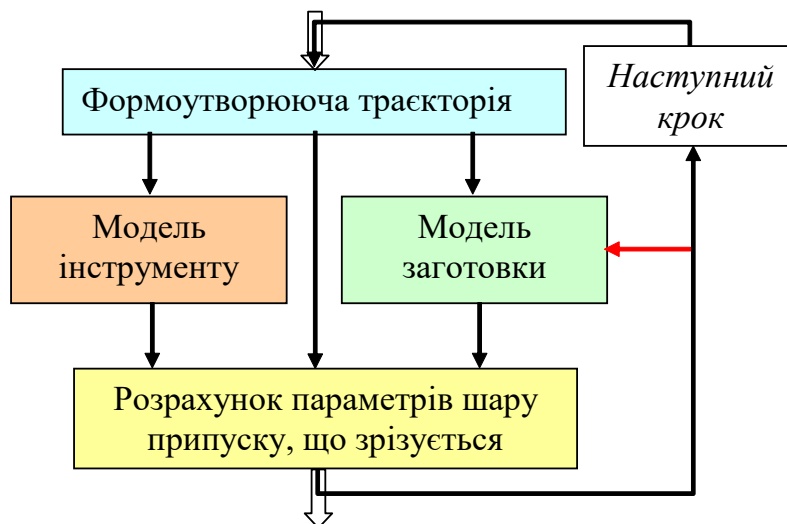


Рисунок 1.64 – Блок-схема циклового алгоритму моделювання зрізування припуску під час 3D- обробки

Після введення вихідних даних геометричних параметрів заготовки та інструмента виконується процедура перетворення геометричних образів в цифрові двомірні масиви. За визначеною траєкторією руху інструмента на кожному кроці моделювання автоматично виконуються процедури розрахунку координат точок входу та виходу інструмента з тіла заготовки, та визначається товщина шару припуску, що зрізується, для кожного шару сферичної фрези, що попередньо розбита на циліндричні фрези, які описують вихідну інструментальну поверхню. Далі виконується перерахунок поточного контуру заготовки і на наступному кроці, процедури повторюються вже зі зміненим контуром.

*Моделювання зрізування припуску при шліфуванні протеза.* В якості комплексного показника, за яким необхідно оцінювати як інтенсивність самого

процесу, так і якість обробленої поверхні, є швидкість зрізування припуску ( $MRR$  – *material removal rate*).

Для моделювання зрізування припуску використано аналог швидкості зрізування припуску, який не залежить від режиму шліфування і визначається виключно за геометричною взаємодією вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга і заготовки. Цей параметр розраховується за залежністю  $Q(\varphi, n) = \sum_i^k 0.5b[L(n)_i]^2$ , де  $n$  – номер проходу,  $b$  – ширина елементарної ділянки,  $L$  – довжина дуги контакту на ділянці.

*Стабілізація процесу фрезерування.* Основною задачею керування процесом фрезерування складних криволінійних поверхонь є зняття рівномірного об'єму матеріалу за рівні проміжки часу, тобто швидкість зрізування припуску  $MRR = const$ . Ця умова надає можливість стабілізувати процес різання з одного боку і підвищити продуктивність та зменшити основний час обробки з іншого. Швидкість зрізування припуску  $MRR$  розраховується в  $\text{мм}^3/\text{с}$ . за залежністю  $MRR = \omega_c \cdot Q$ , де  $\omega_c$  – кутова подача ( $\text{рад./с.}$ ),  $Q$  – аналог швидкості знімання припуску ( $\text{мм}^3/\text{рад.}$ ).

В якості функції впливу, якою необхідно керувати для досягнення поставленої мети стабілізації процесу різання, обрано подачу, яка є функцією аналогу швидкості зрізування припуску і визначається із залежності  $f_c = f_{зад} \cdot \frac{[F]}{F}$ , де  $f_{зад}$  – задана подача,  $\text{мм/хв.}$ ;  $F$  – сила різання, яка розраховується в кожний момент часу при моделюванні;  $[F]$  – допустима сила різання, яка обирається мінімальною з наступних сил різання: по-перше, сили, що допускається за потужністю верстату, по-друге, допустимої сили подачі, та по-третє, сили, яка допускається міцністю інструмента.

Для оптимізації процесу шліфування розроблено методику проектування законів керування при шліфуванні. Встановлено, що керування необхідно здійснювати за  $MRR$  якомога ближче до граничного алгоритму. Граничний алгоритм будується у фазовій площині «припуск – швидкість зрізування припуску» і складається з двох ліній (рис. 1.65). Лінія 2 визначається з умов максимально допустимої сили різання, наприклад, за максимально допустимою деформацією пружної технологічної системи обробки, а лінія 1 – з умов бездефектного шліфування.

Встановлено, що процес шліфування має відбуватися спочатку (до критичної величини припуску  $H_k$ , що залишився) зі швидкості зрізування  $Q_{max}$ , а потім за лінією 1 і закінчуватись при деякій швидкості зрізування  $Q_0$ , тобто оптимальний закон управління повинен бути розташований в затемненій області рис. 1.65 якомога ближче до границі.

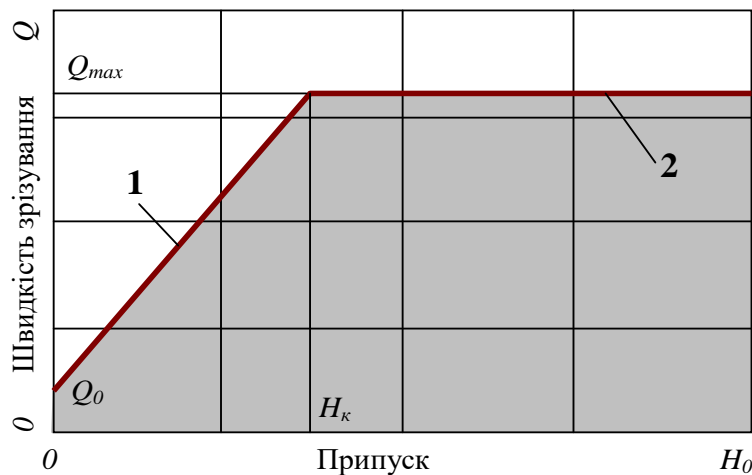


Рисунок 1.65 – Граничний алгоритм у фазовій площині  
«припуск – швидкість зрізування припуску»

Для шліфування титанового сплаву, що використовується для протезування, експериментально встановлено, що до швидкості знімання припуску  $935 \text{ мм}^3/\text{с}$ . майже не спостерігається яких-небудь змін в поверхневому шарі, а при швидкості зрізування припуску більше ніж  $935 \text{ мм}^3/\text{с}$ . спостерігається поява дефектного шару на поверхні заготовки у вигляді мікротріщин та припалів. З поступовим збільшенням швидкості видалення матеріалу збільшуються дефектний шар, відбувається так зване шаржування поверхневого шару частинками абразиву, та руйнується інструмент.

Отже, в результаті проведених досліджень були визначені оптимальні стратегії обробки при шліфуванні та фрезеруванні робочої поверхні протезів колінних суглобів людини, що полягають у забезпеченні формоутворення за траєкторіями, які гарантують виконання всіх умов за шорсткістю і якістю обробленої поверхні та стабілізацію умов різання вздовж формоутворюючої траєкторії.

За представленими математичними залежностями та алгоритмами була розроблена прикладна програма САМ- модуля автоматизованого проектування керуючих програм для верстатів з ЧПК під час обробки протезів колінних суглобів людини. В САМ- модулі передбачено виконання наступних операцій (рис. 1.66):

- ✓ фрезерування кінцевою сферичною фрезою;
- ✓ фрезерування кінцевою циліндричною фрезою;
- ✓ шліфування кругом у формі тора.

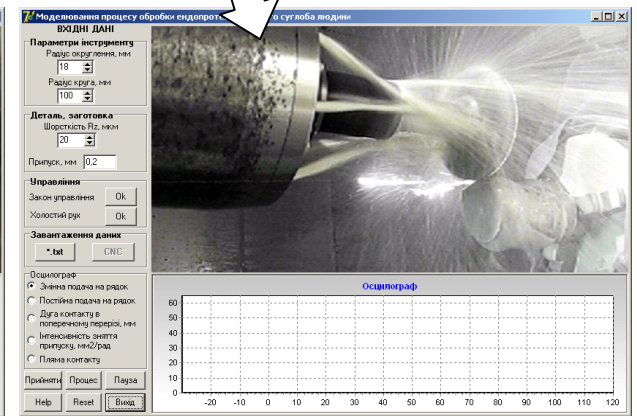
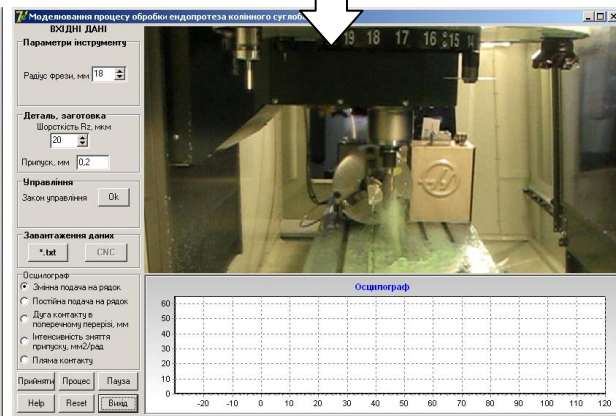
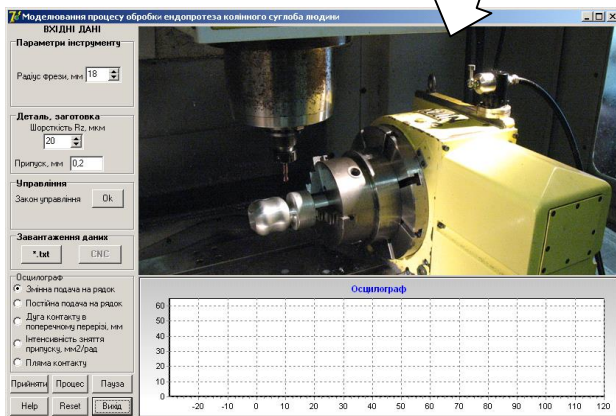


Рисунок 1.66 – Загальний вигляд інтерфейсів модуля CAD/CAM- системи

Таким чином, була створена нова САМ- система автоматизованого проектування керуючих програм верстатів з ЧПК для обробки робочої поверхні протезів колінних суглобів людини, основу якої складають принципово нові математичні моделі процесу зрізування припуску і алгоритми оптимізації, що дозволяє автоматично проектувати оптимальні за максимумом продуктивності режими обробки як фрезеруванням, так і шліфуванням.

За допомогою розробленої САМ- системи були спроектовані керуючі програми для 3-х видів обробки робочої поверхні протезів колінних суглобів людини:

- ✓ фрезеруванням сферичною фрезою (рис. 1.67, а);
- ✓ фрезеруванням циліндричною фрезою (рис. 1.67, б, в);
- ✓ шліфуванням абразивним кругом у формі тора (рис. 1.68).

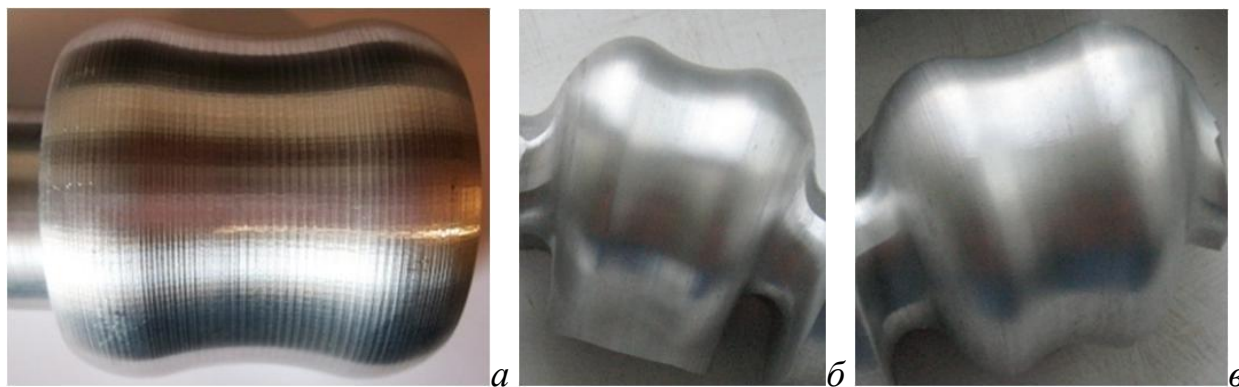


Рисунок 1.67 – Оброблені фрезеруванням робочі поверхні протезів: сферичною (а) і циліндричною (б, в) фрезою



Рисунок 1.68 – Оброблений шліфуванням макет колінного протеза

Під час проектування керуючої програми в створеній САМ- системі для фрезерування циліндричною фрезою за рахунок застосування процедури стабілізації було визначено основний час обробки, який склав 54,66 хв. Розрахований час обробки в модулі САМ- системи співпав з часом обробки на верстаті. Діапазон зміни подачі склав:  $\min=141$  мм/хв.,  $\max=1495$  мм/хв. Для порівняння

було проведено моделювання обробки протеза без застосування процедури стабілізації, тобто фрезеруванням з постійною подачею 141 мм/хв., при цьому основний час обробки склав 139,52 хв. Таким чином, продуктивність обробки було підвищено в 2,55 рази при незмінних показниках якості та точності обробленої поверхні.

Додатковий вигаш у продуктивності в 1,53 рази досягається при використанні змінної подачі на рядок (як показано на рис. 1.67, *a* – при шорсткості поверхні, яка оцінюється в 40 мкм, при постійній подачі на рядок – 53 проходи, при змінній – 35).

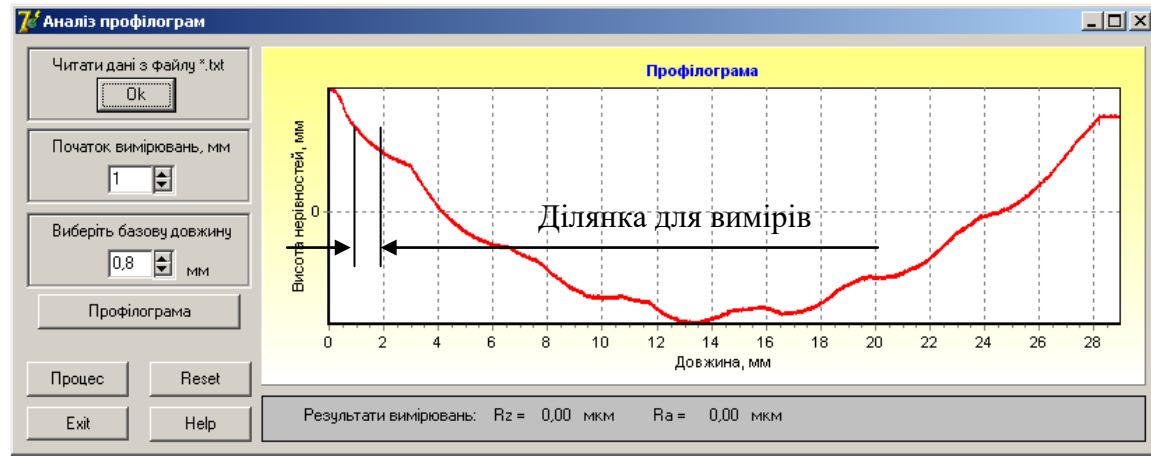
За розробленими алгоритмами та модулем САМ- системи, ґрунтуючись на експериментальних даних визначення режиму бездефектного шліфування, виготовлено експериментальний зразок шліфуванням (рис. 1.68). Матеріал заготовки – титановий сплав, що використовується для протезування, а попередня обробка виконувалась на фрезерному верстаті з ЧПК моделі Schaublin 60.

*Вимірювання шорсткості складної робочої поверхні протезів.* Розроблено нову методику вимірювання шорсткості складної поверхні, у тому числі робочої поверхні протеза колінного суглоба людини. Розроблений відповідний алгоритм і створена прикладна програма для розрахунку досліджуваних параметрів шорсткості поверхні  $R_a$  та  $R_z$ . Прикладна програма дозволяє в інтерактивному режимі зчитувати файл даних з цифрового профілографу та виводити на віртуальний осцилограф. На рис. 1.69, *a* зображено інтерфейс програми при завантаженні вхідних даних. На рис. 1.69, *б* зображено обрану ділянку для апроксимації її номінальним профілем відповідного перетину складної поверхні протеза колінного суглоба людини. На рис. 1.69, *в* зображено реальну шорсткість поверхні протеза відносно його номінального профілю, на якій й визначаються всі необхідні параметри шорсткості.

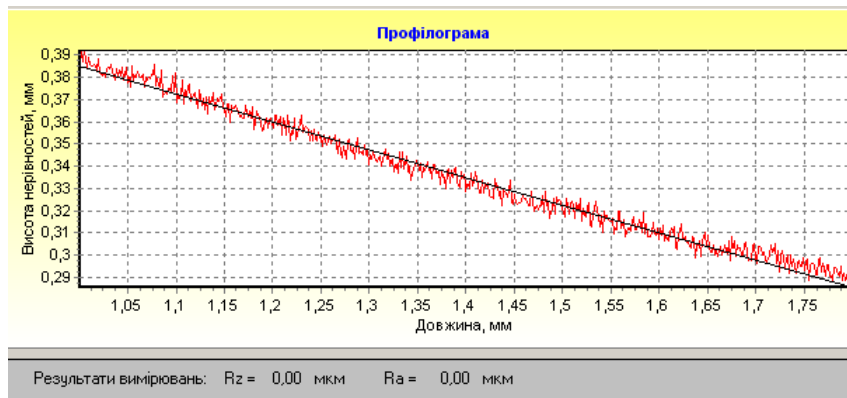
Для оцінки точності були апробовані два методи: перший, що базується на безпосередньому застосуванні САД- системи і другий, за допомогою спеціально розробленої прикладної програми (рис. 1.70). Другий метод використовує спеціальний алгоритм, що базується на геометричних співвідношеннях теоретично заданої поверхні у вигляді математичної моделі і результатів вимірювань на верстаті з ЧПК.

Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розробленої прикладної програми, її ефективність і можливість вимірювати похибку обробки у напрямку радіус-вектора поверхні. Крім того, дані вимірів можуть використовуватися для корекції управляючої програми з метою підвищення точності виготовлення.

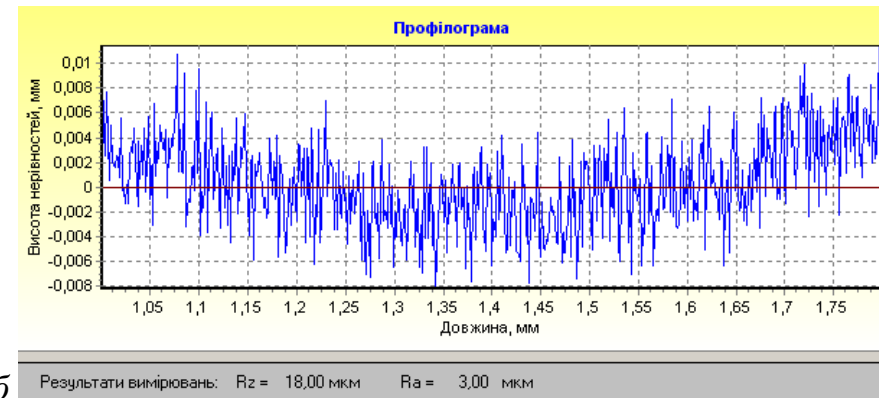




a



б



в

Рисунок 1.69 – Інтерфейси прикладної програми для аналізу шорсткості робочої поверхні протеза

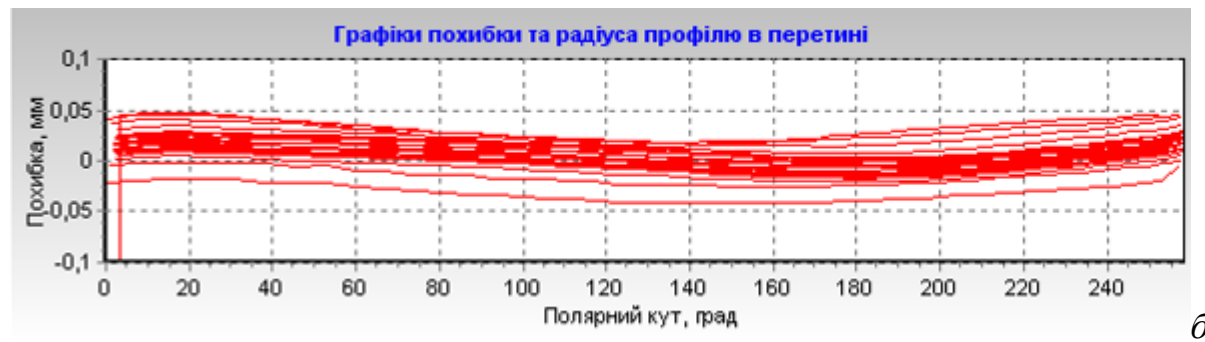
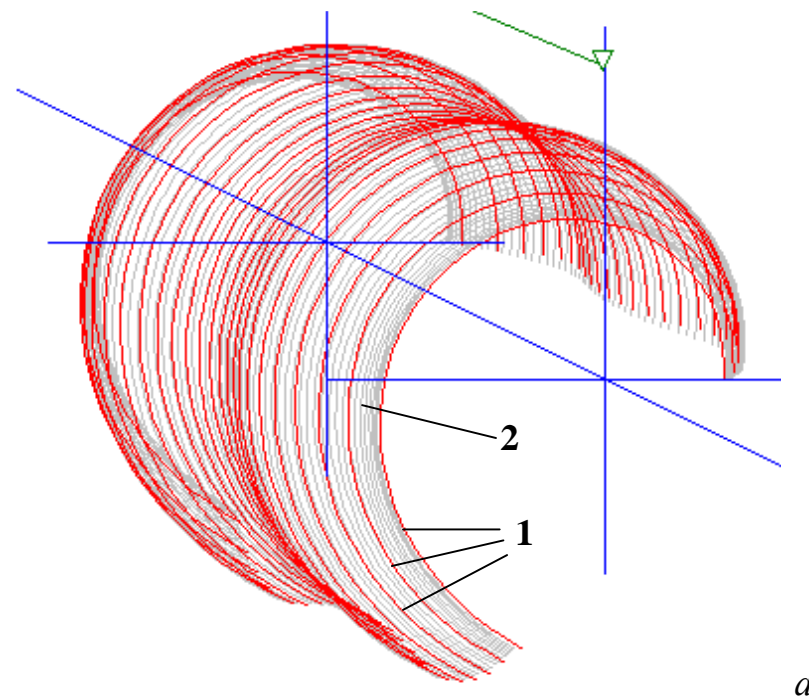


Рисунок 1.70 – Результати контролю: *a*) – сітки вимірної (1) і заданої (2) форм, *б*) – розподіл похибки за формою

Отже, запропонований новий метод оцінки точності виготовлення робочої поверхні протезів колінних суглобів людини за її радіус-вектором, що дозволяє розрахувати корекцію формоутворюючої траєкторії відповідно до схеми обробки.

Основний висновок – вирішена важлива науково-технічна задача технологічної підготовки обробки різанням на верстатах з ЧПК робочої поверхні протезів колінних суглобів людини і створена САМ- система автоматизованого проектування керуючих програм.

Запропоновано наступні технологічні рекомендації.

1. Проектування керуючої програми для обробки робочої поверхні протезів на верстатах з ЧПК необхідно вести за наступним алгоритмом:

- розрахунок цифрової моделі робочої поверхні протезів в системі координат формоутворення;
- проектування траєкторій формоутворення;
- моделювання процесу зрізування припуску та формування керування для стабілізації умов різання за всією поверхнею, що обробляється;
- проектування керуючої програми у G- кодах.

Всі такі процедури виконуються автоматично в створеній САМ- системі.

2. Визначення головної характеристики процесу різання – швидкості зрізування припуску – необхідно виконувати в процесі моделювання за розробленим алгоритмом, який перетворює задачу вирішення перетину двох тіл у просторі у дві 2D- задачі перетину плоских поверхонь.

3. Проектування траєкторій холостих рухів при шліфуванні робочої поверхні протезу доцільно виконувати за розробленим алгоритмом, який автоматично забезпечує максимальну плавність та мінімальну амплітуду зміни прискорень, що дозволяє мінімізувати динамічні навантаження на приводи верстата з ЧПК та підвищити швидкість формоутворення.

4. Суттєво зменшити похибку формоутворення при зміні діаметру шліфувального круга внаслідок його правок можна за рахунок визначення оптимального (за мінімумом максимуму діапазону зміни кута тиску в парі інструмент-деталь) положення технологічної осі, що дозволило більш ніж у 4 рази зменшити похибку формоутворення при шліфуванні робочої поверхні протеза.

5. Визначення режиму бездефектного шліфування необхідно виконувати за результатами експериментів у вигляді залежності, що зв'язує глибину дефектного шару з комплексним показником інтенсивності процесу шліфування – швидкістю зрізування припуску, – який об'єктивно відображає реальний процес різання при шліфуванні складних криволінійних поверхонь, якими є поверхні протезів колінних суглобів людини.

***Питання для самоконтролю:***

1. В чому полягає технологічна підготовка шліфування поверхні калібру стану ХПТ?
2. В чому полягає технологічна підготовка шліфування поверхні оправки стану ХПТ?
3. В чому полягає технологічна підготовка шліфування поверхні штучного колінного суглобу людини?
4. В чому полягає технологічна підготовка шліфування поверхні внутрішніх гвинтових поверхонь гайок кулькової гвинтової пари?

## Розділ 2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ АЛМАЗНОЇ ОБРОБКИ СПЕЦІАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

Розвиток технологій механообробки матеріалів – ключове завдання базових галузей промисловості, при цьому застосування інструментів із твердих сплавів і надтвердих матеріалів розглядається як пріоритетний напрямок збільшення продуктивності й надійності обробки й багато в чому визначає економічність виробничих процесів. Інтенсивно ведуться пошуки нових резервів, що підвищують ефективність обробки, глибше пізнається процес різання, повніше виявляються фактори, що впливають на зношування інструментів, вивчається структура матеріалів з позицій полегшення їх механообробки.

Композиційні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бора (КНБ): "кіборит", "борсиніт" (BSN) мають безперервний каркас кубічного нітриду бора, який відрізняється високою твердістю, термостійкістю, механічною міцністю й високими електроізоляційними властивостями (табл. 2.1), що дозволяє використати ці матеріали в різних областях техніки.

**Таблиця. 2.1 – Порівняння фізико-механічних й теплофізичних властивостей деяких інструментальних матеріалів**

Показники фізичних і механічних властивостей	Інструментальний матеріал		
	CBN100 SECO (Швеція)	KBN900 KYOCERA (Японія)	BSN (борсиніт) ІНМ (Україна)
Розмір вихідних часток cBN, мкм	–	10–14	10–12
Вміст cBN (мас. %)	50 (?)	97,5	94–97
Щільність, г/см <sup>3</sup>	4,094	3,36–3,39	3,43–3,46
Твердість по Вікерсу (F = 150 Н), ГПа	–	29,9 ± 1,0	41,3 ± 2,8
K <sub>1с</sub> (індентор Вікерса, F= 150 Н), МН·м <sup>-3/2</sup>	–	11,1 ± 1,4	10,2 ± 0,2
Модуль зсуву, ГПа	239	283	381
Модуль Юнга, ГПа	559	635	859
Модуль усебічного стискання, ГПа	282	279	384
Коефіцієнт Пуассона, відн. од.	0,170	0,121	0,127
Теплопровідність, Вт/(м·К)	Низька (?)	–	~150

### 2.1. Технологія і лезовий інструмент, оснащений кіборитом для точіння фасонних поверхонь на верстатах з ЧПК

На сьогодні металургійні підприємства України, Росії, Білорусі виявляють зацікавленість у фасонній обробці поверхонь прокатних валків на токарних верстатах з ЧПК як в основному, так і в ремонтному виробництвах (рис. 2.1).

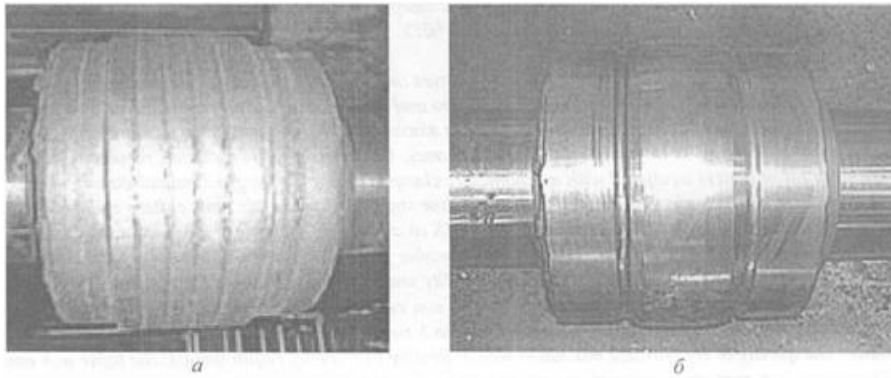


Рисунок 2.1 – Валок з фасонним профілем:  
*а* – після наплавлення, *б* – після лезового оброблення

Обробка фасонних поверхонь із одночасною зміною поздовжньої й поперечної подачі відбувається в умовах змінної твердості елементів технологічної системи, зокрема, різального інструмента, що пов'язано з постійною зміною напрямку рівнодіючої сили різання й величини ефективної площі перетину державки різця, і характеризується змінним значенням перетину зрізу, а також більш напруженим станом оброблюваного матеріалу в зоні різання у зв'язку зі значною величиною дотичній складової навантаження інструмента на контактних ділянках у порівнянні із традиційним різанням.

Сьогодні валки із сірих чавунів досить ефективно обробляються лезовим інструментом з різних матеріалів – твердих сплавів, кераміки, ПНТМ. Разом з тим, точіння валків з вибілених і білих чавунів, валків з наплавленими покриттями традиційними різцями, оснащеними твердими сплавами, стикається із серйозними проблемами, пов'язаними із недостатньою продуктивністю процесу обробки й низькою стійкістю різального інструмента. Крім того, у виробничих умовах доводиться виготовляти валки із поверхнями, що мають поперечні канавки, під час обробки яких на різець діють додаткові динамічні навантаження.

Під час обробки прокатного валка, який має профіль бочки чи фасонні поверхні, на токарних верстатах з ЧПК різальний інструмент торкається оброблюваної поверхні рівчака в точках на дузі різальної пластини, яка є близькою до  $180^\circ$  (рис. 2.2). Тому його різальна кромка на зазначеній довжині дуги повинна бути відкритою. У зв'язку з тим, що точка торкання різальної кромки і рівчака зміщується в процесі обробки чи в результаті переустановлення пластини, по всій дузі робочої частини різальної кромки різця необхідно забезпечити наявність заднього кута. Тому в інструменті з механічним кріпленням різального елемента не можна встановлювати різальну пластину з негативним або без заднього кута нахилом, тому що в положеннях при вході й виході з рівчака буде відбуватися затирання інструмента по задній поверхні. Поліпшити техніко-економічні показники операції точіння валків з таких матеріалів дозволяє

застосування лезового інструмента нових конструкцій і оснащеного сучасними інструментальними матеріалами.

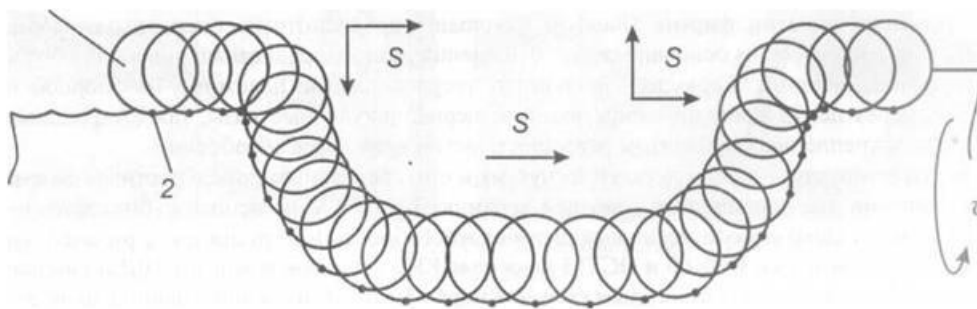


Рисунок 2.2 – Схема оброблення рівчака прокатного валка різцем із круглою різальною пластиною: 1 – різальна пластина, 2 – робоча вершина різця

Так, для обробки калібрів валків прокатних станів на токарних верстатах з ЧПК провідні фірми, наприклад, "Геркулес" (Німеччина), використовують різці з напаяними твердосплавними пластинами або з механічним кріпленням керамічних різальних пластин.

Для забезпечення надійного механічного закріплення у державці опорна поверхня пластини звичайно виготовляється призматичною, а на твердосплавних пластинах у діаметральному перетині роблять взаємно перпендикулярні (хрестоподібні) пазу для запобігання зсуву пластин убік і їхнього провертання від бічних зусиль при різанні. Недоліком такого рішення для керамічних пластин є мале число періодів стійкості пластини (два), а для твердосплавної – наявність концентраторів напружень (пазів на опорній поверхні) й ризик руйнування пластини від прикладеного зусилля затиску й сили різання.

Для уникнення подібних проблем були розроблені спеціальна конічна різальна пластина з полікристалічного надтвердого матеріалу (ПНТМ) "кіборит"  $\varnothing 9,52$  мм із заднім кутом відповідно 5, 7 або  $11^\circ$ , яку не потрібно переточувати (рис. 2.3), а також нова конструкція державки різця (рис. 2.4).

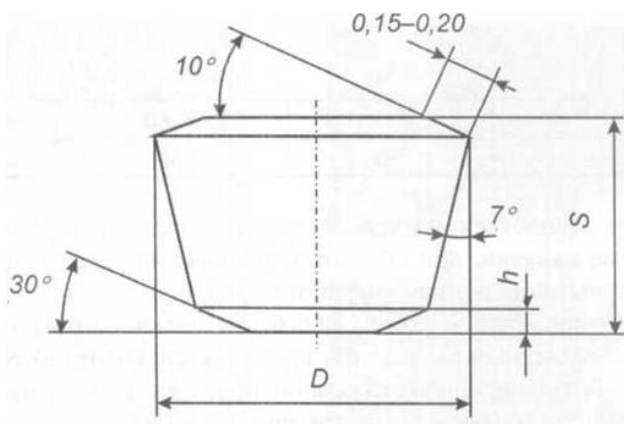


Рисунок 2.3 – Різальна пластина з кібориту

Опорна поверхня різальної пластини являє собою конічну поверхню, що встановлюється у відповідне конічне гніздо на державці різця. За рахунок повороту в гнізді період стійкості різальної пластини збільшується до чотирьох-п'яти, а внаслідок відсутності пазів на опорній поверхні вона не має концентраторів напружень. З огляду на те, що обробляються вироби з важкооброблюваних матеріалів, на

різальній пластині потрібно забезпечити від'ємний передній кут. Тому на пластині передбачена зміцнююча фаска під кутом –  $10^\circ$  шириною 0,15–0,20 мм.

Різальна пластина встановлюється в конічне гніздо сепаратора, закріпленого на штифті, що запресований у отвір, виконаний у державці. Аналогічно існуючим, державка має паз на опорній поверхні для запобігання повороту різця.

Умови обробки калібрів прокатних станів з вибіленого чавуну на токарному верстаті фірми "Геркулес" у вальцетокарному цеху КГМК "Криво-ріжсталь": швидкість різання – 1,2 м/с. (оберти шпинделя верстата – 90 об./хв.) при чорновому проході й 1,43 м/с. – при чистовому, подача – 0,2 мм/об., глибина різання – 1,5 мм при чорновому проході і 0,2 мм – при чистовому, діаметр обробки – 255 мм, довжина обробки – 500 мм.

Під час випробувань лезовим інструментом, оснащеним різальною пластинною з кібориту, був повністю оброблений один прокатний валок без переустановлення пластини. Період стійкості без переустановлення пластини склав 125 хвилин (п'ять проходів по 25 хвилин). З врахуванням переустановлення останньої одним інструментом можна повністю обробити бочку й рівчаки двох-трьох валків.

Для порівняння: режими різання керамічними пластинами фірми "Геркулес" є в 3 рази нижчими. Стійкість керамічних пластин хоча і становить 120-180 хвилин, але забезпечує лише один-два проходи по бочці й рівчакам валка замість 5-ти, як у різців з кібориту. Звісно, вартість керамічних пластин є нижчою, але треба порівнювати одночасно різницю у стійкості, вартість пластин і час на їх встановлення у державку.

Крім валків з вибіленого чавуну, лезовий інструмент, оснащений різальними пластинами з кібориту, успішно випробуваний під час обробки рівчаків прокатних шайб трубних станів з твердого сплаву ВК15.

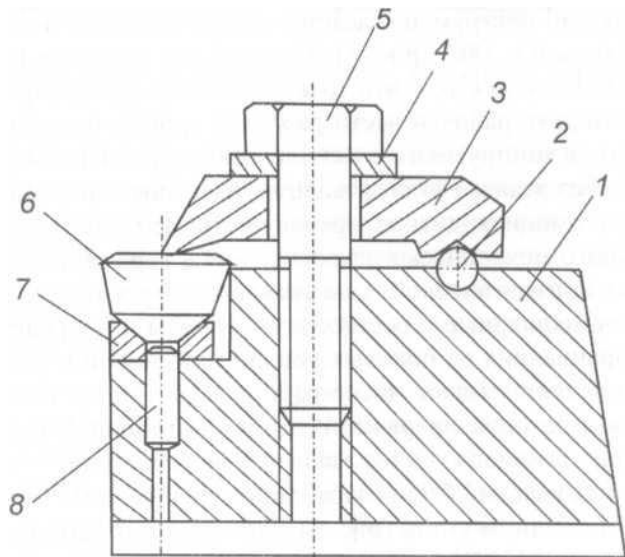


Рисунок 2.4 – Конструкція різцевої державки: 1 – корпус, 2 – опорна кулька, 3 – притискна планка, 4 – шайба, 5 – гвинт, 6 – різальна пластина, 7 – сепаратор, 8 – штифт



## 2.2. Технологічні можливості лезового інструменту, оснащеного пластинами BSN (борсініт)

*Борсініт* – це різновид кібориту, тобто є композиційним матеріалом з безперервним каркасом кубічного нітриду бора, який відрізняється високою твердістю, термостійкістю, механічною міцністю й високими електроізоляційними властивостями, що дозволяє використати його в різних областях техніки. Випускається у вигляді пластин круглої форми діаметром до 30 мм і висотою 3-8 мм (рис. 2.5), а також пластин у вигляді квадрата, трикутника, ромба з діаметром вписаної окружності 3-15 мм і висотою 3,18-4,76 мм відповідно до ГОСТ 28762-90

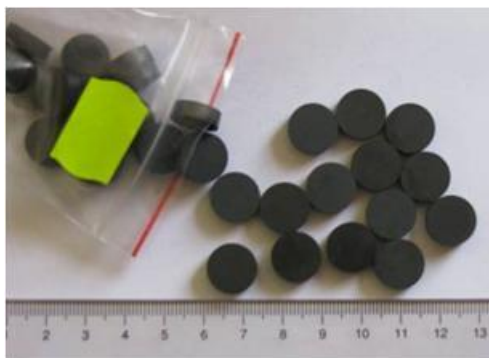


Рисунок 2.5 – Різальні пластини BSN кругової форми  $\varnothing 9,52$  і  $\varnothing 6,00$  мм

"Пластини режущие сменные из сверхтвердых материалов. Технические условия" або ТУ2-037-636-89 "Пластини різальні змінювані багатогранні з надтвердих матеріалів".

Призначення пластин з КНБ «борсініт»: для напівчистої й чистої обробки загартованих вуглецевих, конструкційних і легованих сталей твердістю 40-65 HRC, високоміцних, зносостійких і вибілених чавунів, термооброблених високоміцних і нержавіючих сталей, жароміцних хромонікелевих сплавів, твердих сплавів групи ВК, а також чорнового, напівчистого й чистого оброблення високотвердих наплавлених і напилених покриттів.

Використання багатогранних пластин з ПНТМ на основі КНБ у різальних інструментах дозволяє обробляти вищевказані матеріали зі швидкістю різання 90-450 м/хв., на чистових операціях – стабільно одержувати оброблену поверхню із шорсткістю  $Ra$  0,63-1 мкм. При цьому стійкість інструмента становить 60-120 хвилин. Продуктивність точіння інструментом, оснащеним борсінітом, у порівнянні із продуктивністю точіння твердосплавним інструментом підвищується в 3-6 разів, у порівнянні зі шліфуванням абразивними кругами відповідно в 8-12 разів. Інструмент, оснащений борсінітом, застосовується як для чистового, так і для чорнового оброблення (дозволяє обробляти тверді покриття одразу після напилювання й наплавлення, чавунні вилівки по кірці), при безперервному й переривчастому різанні.

Високоєфективною є обробка різцями з борсініту деталей, напилених з оплавленням порошками системи Ni-Cr-B-Si твердістю до HRC 65, й іншими подібними до них. При цьому продуктивність обробки становить 5...20 см<sup>3</sup>/хв. і у порівнянні з продуктивністю шліфування абразивними кругами підвищується в 8-12 разів. Стійкість інструмента – 40...120 хв. до першого переустановлення

різальної кромки або переточування, шорсткість обробленої поверхні Ra 0,16...1,25 мкм. При точінні покриття ЛС-70ХЗНМ досягається продуктивність обробки 5...10 см<sup>3</sup>/хв.

При забезпеченні задовільного відводу стружки інструмент із пластинами BSN є працездатним при точінні загартованих сталей зі швидкостями різання до 180 м/хв., нікелевих сплавів (типу ЖС, ВЖЛ) – до 300 м/хв., вибілених чавунів – до 450 м/хв. Порівняння працездатності інструмента, оснащеного композитом BSN, і інструмента, оснащеного керамічною пластиною виробництва Німеччини (рекомендується для обробки валків з вибіленого чавуну), показало, що інструмент із композита дозволяє обробляти вибілений чавун зі швидкістю різання, вищою в 2,9-3,4 разів.

### 2.3. Технологічні можливості лезового інструменту, оснащеного алмазно-керамічними пластинами

Одним із пріоритетних напрямків сучасного машинобудування є створення технологій, що дозволяють проводити механічну обробку з високими швидкостями різання й з мінімальною кількістю технологічних операцій і переходів, що, у свою чергу, вимагає створення нових інструментальних матеріалів. Розвиток таких технологій пов'язаний із застосуванням інструмента, оснащеного синтетичними надтвердими матеріалами (НТМ). Сьогодні для заміни природних алмазів у різальному й іншому видах інструментів для механічної обробки ефективно використовують полікристалічні матеріали з порошків синтетичних алмазів. Температура різання при точінні різцями з НТМ на основі алмаза в порівнянні з тонким точінням істотно нижче – при різанні кольорових металів і сплавів, а також полімерних композиційних матеріалів вона, як правило, не перевищує 200-250 °С.

У сучасному виробництві найбільш широке застосування знайшли двошарові різальні вставки, у яких зносостійкий робочий шар з НТМ розташований на підкладці з матеріалу з високими механічними характеристиками, що обумовлює підвищену статичну й ударну міцність робочої частини інструмента. У світі подібні матеріали виготовляють компанії "Дженерал Електрик" зі США, "Де Бірс" з ПАР, "Буткото Електрик" з Японії. В Україні алмазно-твердосплавні пластини (АТП) виготовляють в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України. Як підкладку у двошарових пластинах з алмазним полікристалічним шаром, що містить кобальтовий каталізатор, використовують переважно тверді сплави на основі карбіду вольфраму, що характеризуються високими показниками модуля пружності й меж міцності при стисненні й вигині. Алмазовміщуючий шар може містити компоненти підкладки. Наразі

двошарові пластини з робочим алмазним шаром на твердосплавній підкладці можуть ефективно використовуватися в різних областях промисловості, зокрема, при виробництві бурового інструмента, інструмента для обробки кольорових металів і їхніх сплавів.

Однак все ще існує проблема високопродуктивної лезової обробки титану, цирконію, нікелю, сплавів заліза, твердих сплавів, твердих полімерних композиційних матеріалів, деяких видів кераміки час, під час лезової обробки яких температура різання досягає 700 °С й вище, що вимагає застосування інструментального матеріалу з високою термостійкістю. Створення інструментального матеріалу з термостійким дрібнозернистим алмазним різальним шаром на високотеплопровідній підкладці закладає передумови для інтенсифікації режимів обробки ряду матеріалів і розробки нових технологічних процесів на цій основі.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля такий інструментальний матеріал для різального інструменту створений. Алмазно-керамічні пластини (АКП) інструментального призначення являють собою двошарові пластини з термостійким алмазовміщуючим шаром товщиною 1 мм (розмір алмазних зерен у різальному шарі – 10 мкм) на підкладці з кубічного нітриду бору (рис. 2.6). Різальний інструмент, оснащений АКП, характеризується високою зносостійкістю й термостійкістю при точінні керамічних покриттів на основі  $Al_2O_3$ , титанових сплавів, силумінів, вуглеграфіту.

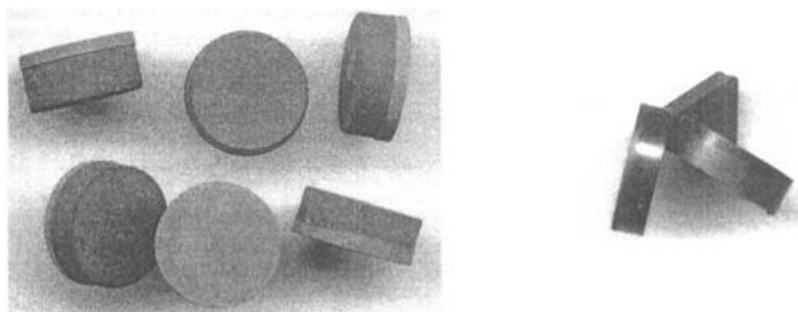


Рисунок 2.6 – Заготовки й АКП з алмазовміщуючим ріжучим шаром товщиною 1 мм (розмір алмазних зерен у ріжучому шарі – 10 мкм)

Як основний спосіб кріплення різальних вставок з АКП було обране механічне кріплення, що має наступні основні переваги: допускається багаторазове використання однієї й тої ж державки для закріплення нових пластинок; прискорюється заміна на верстаті зношеного інструмента, знижується вартість інструмента; виключається звичайна нестабільність стійкості напаяного інструмента, пов'язана з його переточуванням; відсутнє зменшення товщини пластини, що характерно для переточування; знижується брак при виготовленні різців, тому що при механічному кріпленні виключається нагрівання, яке часто викликає утворення тріщин на пластинках.

Дослідження стійкості різального інструменту, оснащеного АКП, при точінні детонаційних керамічних покриттів на основі  $Al_2O_3$  твердістю HRA 80–84, що містять 100 %  $Al_2O_3$ , або  $Al_2O_3$  (85 %) +  $TiO_2$  (15 %), показало, що створений інструментальний композит має високу термостійкість. Як видно із залежності інтенсивності зношування інструмента, оснащеного АКП й АТП, від швидкості

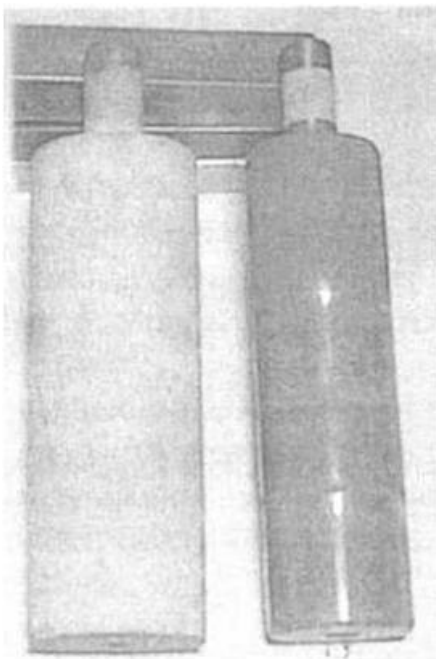


Рисунок 2.7 – Зразки з напиленими покриттями на основі  $Al_2O_3$  і проточеного

різання при точінні покриття на основі  $Al_2O_3$  (рис. 2.7), при швидкостях різання до 55 м/хв. значного підвищення інтенсивності зношування не відзначається. Однак при збільшенні швидкості різання до 70 м/хв. працездатність АТП катастрофічно знижується. Інтенсифікація зношування інструмента під час обробки вищезгаданих керамічних покриттів, що характеризуються високою хімічною інертністю, з високими для даного процесу швидкостями різання визначається переважно високою температурою в зоні контакту інструментального й оброблюваного матеріалів. Проведені експерименти з використанням різця із вмонтованими двома термопарами свідчать про

те, що при точінні покриттів на основі  $Al_2O_3$  пластинами на основі КНБ зі швидкостями різання понад 45 м/хв. температура в зоні різання перевищує 1000 °С. В той же час залежність інтенсивності зношування АКП від швидкості різання в діапазоні до 70 м/хв. має практично лінійний характер, що є підтвердженням більш високої термостійкості цього інструментального матеріалу в порівнянні з АТП.

Виходячи з максимуму довжини шляхи різання оптимальна швидкість різання інструментом, оснащеним АКП, становить 45-55 м/хв. Оброблені покриття на основі  $Al_2O_3$  мають низьку шорсткість поверхні, висотний параметр  $Ra$  якої після точіння на оптимальних режимах різання ( $v = 50$  м/хв.;  $s = 0,05$  мм/об.;  $h = 0,1$  мм) дорівнює 0,53–0,58 мкм. Стійкість інструмента при точінні покриттів складу  $Al_2O_3$  (85 %) +  $TiO_2$  (15 %) на вищезгаданих режимах становить 10–15 хвилин (до зносу по задній поверхні  $h_3 = 0,3$  мкм), що в 1,5 рази вище, ніж під час обробки покриттів зі 100 % вмістом  $Al_2O_3$ .

Обробка титанових сплавів також відбувається при порівняно високих температурах у зоні різання, що обумовлюється низькою теплопровідністю оброблюваного матеріалу й особливостями протікання процесу його точіння. Як

показали проведені експерименти, під час обробки титанового сплаву ВТЗ-1 інтенсивність зношування інструмента, оснащеного АКП, значно зростає в діапазоні швидкостей різання більше 80 м/хв. і є наслідком зростання температури в зоні різання (рис. 2.8). У процесі точіння інструментом, оснащеним АКП ді-

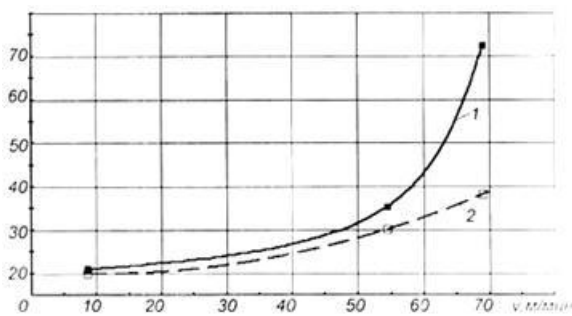


Рисунок 2.8 – Залежність інтенсивності зношування інструмента, оснащеного АТП (1) й АКП (2), від швидкості різання при точінні напиленого покриття  $Al_2O_3$

метром 12,7 мм, з негативним переднім кутом ( $\gamma = -10^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ), при збільшенні швидкості різання вище 95 м/хв. (інші режими: подача  $s = 0,05$  мм/об.; глибина різання  $h = 0,1$  мм) вже спостерігається загоряння стружки, що є свідченням високої температури в зоні різання (оксид титану утворюється при температурі вище  $700^\circ C$ ).

У той же час, навіть у таких умовах АКП зберігають свою працездатність, що також підтверджує їх високу термостій-

кість. Подібне явище під час обробки круглими АКП діаметром 7 мм із геометрією інструмента  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 11^\circ$  спостерігається при більш високій швидкості різання ( $v = 135$  м/хв.) й при незмінних значеннях інших параметрів. Стійкість такого інструмента на режимах  $v = 90$  м/хв.;  $s = 0,11$  мм/об.;  $h = 0,1$  мм до досягнення зносу інструмента  $h_3 = 0,2$  мм складає 55–60 хв. У зв'язку з тим, що в матеріалах на основі титану при температурі понад  $1000^\circ C$  відбуваються необоротні фазові й структурні перетворення, швидкість різання таких матеріалів обмежена 150 м/хв. Оптимальна швидкість різання становить 100-110 м/хв.

Проведені дослідження показали високу працездатність АКП під час обробки алюмінієвих і мідних сплавів, вуглеграфітів, силіцированого графіту, високо твердих керамічних покриттів і титанових сплавів. Залежно від оброблюваного матеріалу й режимів різання при точінні різцями, оснащеними АКП, забезпечується низька шорсткість оброблюваної поверхні –  $Ra = 0,35-1,2$  мкм. Під час обробки ряду матеріалів (керамічні покриття, титанові сплави, силіцирований графіт) стійкість АТП й АКП знаходиться на одному рівні, а при точінні покриттів на основі  $Al_2O_3$  зі швидкостями різання 50-70 м/хв. інтенсивність зношування АКП на 10-20 % нижче в порівнянні з АТП, що визначається високою термостійкістю нового композиційного матеріалу. Показано також перспективу використання АКП після зношування алмазного шару. У цьому випадку у якості різальної пластини виступає підкладка на основі КНБ (матеріал VN–Al) під час обробки залізобуглецевих сплавів, стійкість якої перебуває на рівні монокристалічних різальних пластин з КНБ (CBN + 3 %  $Si_3N_4$ , кіборит, гексаніт-Р).

## 2.4. Технологія алмазного свердління глибоких отворів у міцних й одночасно крихких матеріалах

До глибокого свердління відноситься виготовлення отворів, у яких довжина значно перевершує діаметр ( $l/d > 5$ ). При свердлінні глибоких отворів звичайно різальний інструмент є нерухомим, а деталь обертається. Але можлива обробка й при нерухомій деталі й обертовому інструменті. Для глибокого свердління застосовується спеціальне обладнання й інструмент. Загальні рекомендації тут такі: свердла двостороннього різання (перові, спіральні) застосовуються для свердління отворів середньої й великої величини; для свердління отворів порівняно великого діаметра застосовуються спеціальні свердла для кільцевого свердління. Для свердління глибоких отворів порівняно малого діаметра застосовуються свердла однобічного різання типу рушничних, гарматних. Гарматне свердло має робочу частину зі швидкорізальної сталі, приварену до круглого порожнього стрижня, що має діаметр, трохи менший діаметра робочої частини свердла. Робоча частина свердла має тільки одну різальну кромку й довгу напрямну частину, що охоплює просвердлену частину по дузі  $180^\circ$ . Довжина прямої частини перебуває в межах 5-10 діаметрів отвору й має задній конус у межах 0,03-0,05 мм на 100 мм довжини. Гарматне свердло при свердлінні в суцільному матеріалі має направлятися кондукторною втулкою для створення на початку роботи достатньої опорної поверхні. Режими різання є заниженими проти режимів для спіральних свердлів на 25-30%. Свердління відбувається при інтенсивному надходженні охолоджувальної рідини під тиском 20-50 атм. Призначенням рідини є не тільки охолодження свердла, але й вимивання стружки. Рідина надходить по внутрішній частині стрижня й виносить стружку через проміжок між стінкою просвердленого отвору й свердлом.

Особливості свердління отворів малого діаметру. Під час обробки деталей з мінералокераміки, ситалів і рубіна складною операцією є свердлення отворів малого діаметра (рис. 2.9-2.11). Застосування звичайних схем ультразвукового різання, свердління твердосплавним інструментом є малоефективними через низьку продуктивність, малу точність отвору й значне зношування інструмента. Обробка глибоких отворів електронним променем і променем лазера також малоефективна через низьку точність і більші залишкові напруження, що часто призводить до утворення тріщин на обробленій поверхні.

Процес алмазного свердління можна значно інтенсифікувати наданням інструменту ультразвукових коливань малої амплітуди. При впливі ультразвукових коливань у зоні контакту алмаза зі оброблюваним матеріалом на поверхні останнього утворюється зона підвищеної тріщинуватості – зона попереднього руйнування. Роль ультразвукових коливань полягає в інтенсифікації процесу крихкого руйнування оброблюваного матеріалу за рахунок створення сітки мі-

кротріщин і виколок на його поверхні. Глибина проникнення мікротріщин при ультразвуковому алмазному свердлінні звичайно в 2 рази більше  $Ra$ . Глибина проникнення мікротріщин при свердлінні без ультразвуку приблизно на 10-15% менше.

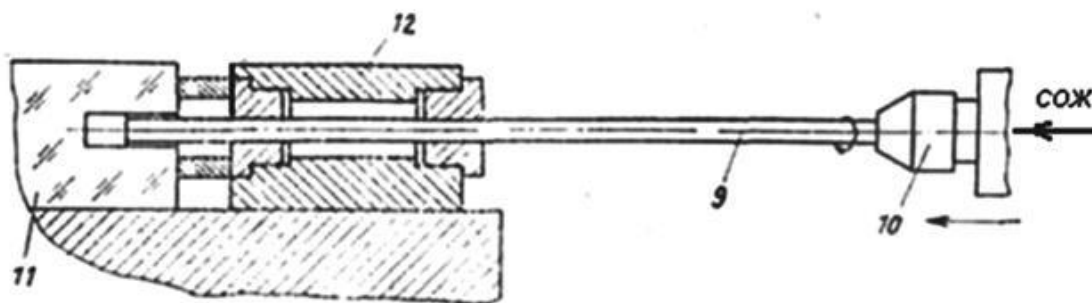


Рисунок 2.9 – Схема алмазного свердління глибоких отворів з обертанням інструмента

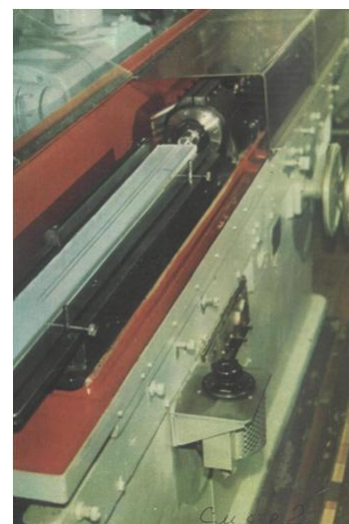
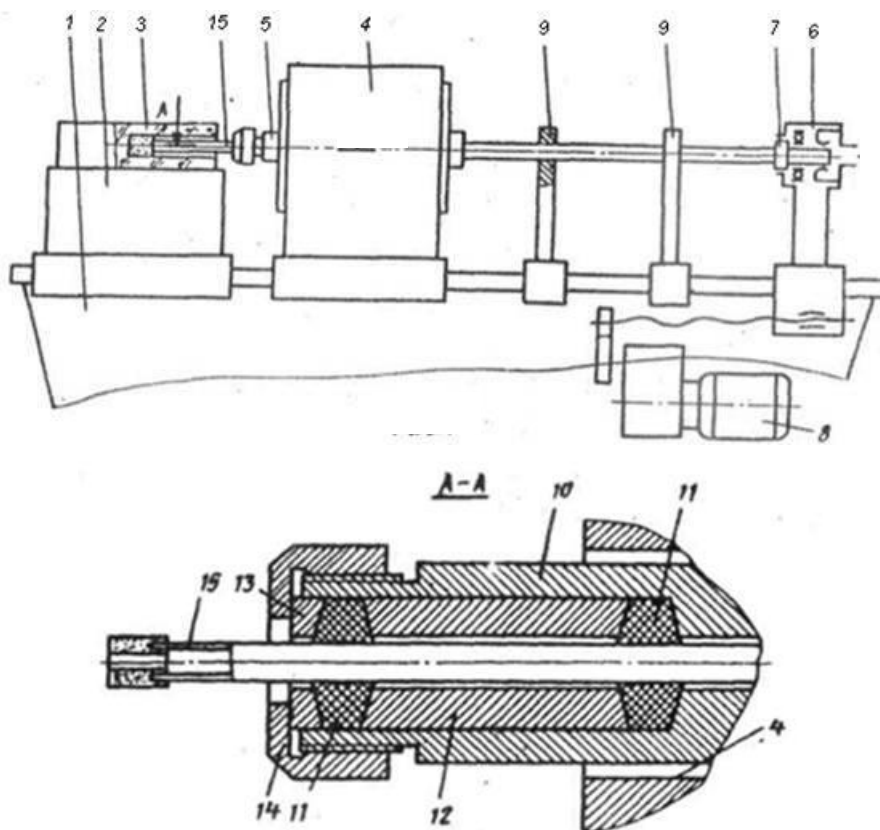


Рисунок 2.10 – Конструкція верстата для алмазного свердління глибоких отворів

Технологічні характеристики ультразвукового алмазного свердління надглибоких отворів зі співвідношенням  $l/d > (10...100)$  залежать від статичного навантаження, окружної швидкості й амплітуди коливань. Оптимальна продуктивність досягається при  $p_{ст} = 3$  МПа (30 кгс/см<sup>2</sup>). При оптимальних значеннях  $p_{ст}$  створюється така середня відстань між робочим торцем свердла й оброблюваним матеріалом, при якому забезпечуються оптимальні співвідношення між глибиною вдавнення алмазних зерен і видаленням шламу з робочого зазору.

Зношування інструмента трохи збільшується в порівнянні зі звичайним свердлінням внаслідок росту навантаження на зерна. Він має мінімум при  $n = 2000$  об./хв. Рекомендована частота обертання свердел діаметром  $d = 4...10$  мм має бути не менш 3000 об./хв., а для  $d = 12...16$  мм – не менш 2000 об./хв.

Збільшення амплітуди коливань інструмента до 10-11 мкм сприяє підвищенню продуктивності й зниженню витрати алмазів, однак подальше збільшення амплітуди коливань (більше 11 мкм) призводить до зниження продуктивності. Максимуму продуктивності приблизно відповідає мінімальне значення питомого зношування інструмента. При амплітуді коливань більше 15 мкм може відбуватися руйнування алмазоносного шару через високі циклічні напруження.

При ультразвуковому алмазному свердлінні великий вплив на ефективність процесу мають концентрація алмазів, їхня зернистість і тип зв'язки. При збільшенні концентрації до 150% продуктивність підвищується в 1,6 рази, а питоме зношування інструмента залишається практично незмінним; однак збільшення  $K$  до 200% призводить до зниження продуктивності й інтенсивного зношування інструмента. При збільшенні зернистості алмаза з 50/40 до 125/100 продуктивність росте, однак при зернистості алмаза 200/100 продуктивність зменшується в 1,8-1,9 рази.

Процес свердління глухих отворів, на відміну від обробки кільцевими свердлами, має такі особливості: більшу площу робочого торця інструмента, погіршення подачі ЗМОТС й видалення шламу. Для того, щоб дно оброблюваного отвору було плоским, кромкостійкість й зносостійкість інструмента має бути високою.

Алмазний інструмент для свердління глухих отворів має довжину  $L$ , кратну півхвильовій довжині ( $L = i \cdot \lambda / 2$ ;  $i = 1, 2 \dots$ ). Для зменшення тертя корпусу його зовнішній діаметр повинен бути меншим за зовнішній діаметр алмазоносного шару на 0,2...0,3 мм.

При збільшенні статичного тиску  $p_{ст}$  до 6...7 МПа значно зростає продуктивність, однак подальший ріст  $p_{ст}$  призводить до різкого збільшення зношування свердел. Продуктивність ультразвукового алмазного свердління глухих отворів у порівнянні зі звичайним алмазним свердлінням підвищується в 8-10 разів, а зношування інструмента знижується в 3-4 рази.

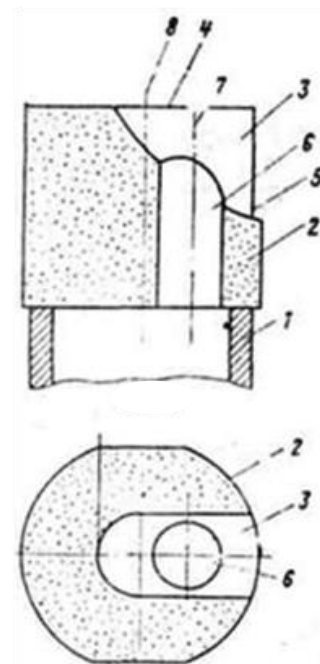


Рисунок 2.11 – Конструкція алмазного свердла на металевій зв'язці



## 2.5. Технологія мікроточіння дзеркальної поверхні виробів

Технологія мікроточіння дзеркальної поверхні використовує устаткування, яке може розглядатися як комплекс, що складається з інструментальних надточних машин, керуючих технологічних систем, пристроїв контролю й т.п., у якому можуть бути використані моделі функціональних залежностей вихідних параметрів процесу мікроточіння від вхідних.

Глибина різання при мікроточінні складає 1-10 мкм. Оскільки полікристалічний алмаз не забезпечує необхідної якості обробки, використовується різець, оснащений вставкою із природного алмаза, що закріплюється пайкою або механічним прихватом. Радіус заокруглення різальної кромки 20 нм. Результатом мікроточіння є отримання дзеркальної поверхні.

Процес мікроточіння здійснюють на надточних верстатах для алмазного мікроточіння. На рис. 2.12 наведена схема такого верстата, оснащеного системою контролю й управління відносним положенням осей шпинделя й супорта; системою керування формоутворенням поверхні, що проточується, системою контролю й керування технологічними параметрами процесу мікроточіння, системою контролю якості обробки. На верстаті можна обробляти плоскі, увігнуті й опуклі сферичні й асферичні поверхні.

Геометрія оброблюваної поверхні залежить від взаємного відносно один одного положення осей шпинделя 1 і супорта 2 (рис. 2.13). Вони повинні розташовуватися в одній площині  $XOY$ . Кут  $\varphi$  між осями шпинделя й супорта в цій площині визначає геометрію оброблюваної поверхні. При перетинанні осей шпинделя й супорта в зазначеній площині перед оброблюваною поверхнею (точка  $C$  на рис. 2.12) під час обробки виходить увігнута поверхня; при перетинанні осей шпинделя й супорта за оброблюваною поверхнею (рис. 2.12) під час обробки виходить опукла поверхня; при паралельному положенні осей супорта й шпинделя один відносно одного в площині  $XOY$  під час обробки виходить плоска поверхня. Відстань точки перетинання осей шпинделя й супорта від оброблюваної поверхні визначає радіус кривизни оброблюваної поверхні. Конструкція головки для закріплення й подачі різця дозволяє змінювати значення радіусу на величину  $\Delta$  (наприклад, з дискретою 0,04 мкм, попередньо встановленою оператором в інтерфейсі керування) завдяки вбудованому в неї спеціальному пристрою й системі керування формоутворенням поверхні, що проточується.

Подібні верстати, крім забезпечення внутрішніх потреб України, наразі поставляються до Китаю.

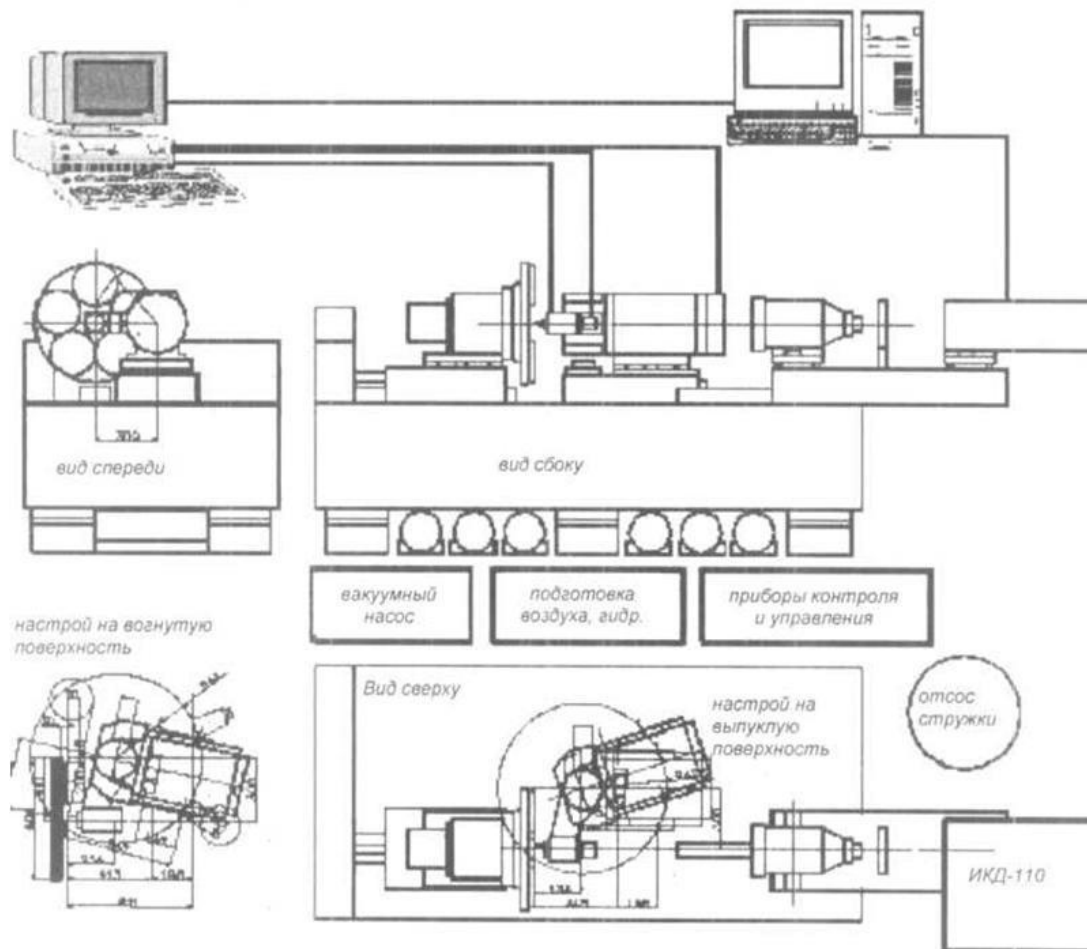


Рисунок 2.12 – Схема надточного верстата алмазного микроотчи́нния мод. САТ-1808

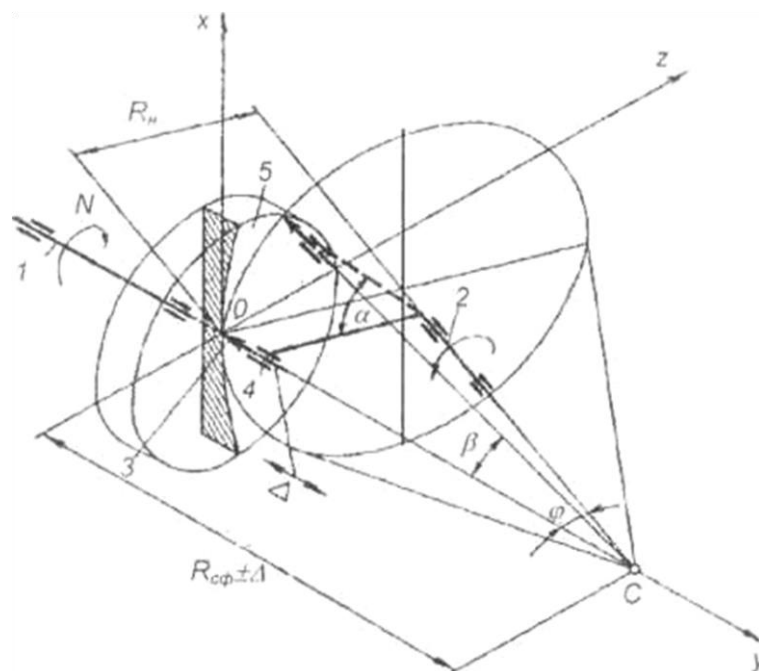


Рисунок 2.13 – Схема обработки асферического зеркала на верстаті САТ-1808:  
 1 – вісь шпинделя; 2 – вісь супорта; 3 – різець; 4 – привід повздовжнього переміщення різця на величину  $\Delta$ ; 5 – дзеркальна поверхня, що обробляється

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1982, ч.1. – 239 с.; ч.2.
2. Ковшов А.Н. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1985. – 496 с.
4. Основы технологии машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.
5. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова, А.А. Гусева, Ю.Б. Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
6. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
7. Технология машиностроения (специальная часть) / Картавов С.А. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, Головное изд-во, 1984. – 272 с.
8. Якимов О.В., Гусарев В.С., Якимов О.О., Линчевський П.А. Технологія автоматизованого машинобудування: Підручник. – К.: ІСДО, 1994. – 400 с.
9. Кулик В.К., Петраков Ю.В., Иотов В.В. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей. – К.: Техніка, 1987. – 176 с.
10. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей. – К. 1977, 192 с.
11. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПК. К. 1991, 192 с.
12. Родин П.Р., Линкин Г.А., Татаренко В.Н. Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПК. М. 1976, 198 с.
13. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 1988. – 736 с.
14. Комиссаров В.И., Леонтьев В.И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
15. Размерный анализ технологических процессов / Матвеев В.В., Тверской М.М. и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
16. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985, Т.1. – 656 с.; т.2. – 496 с.
17. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Технологія обробки спеціальних деталей" для студентів спеціальності 131 – "Прикладна механіка" усіх форм навчання / Уклад.: Ю.В. Петраков, В.Г. Біланенко, С.В. Сохань, В.В. Писаренко. – К.: НТУУ «КПІ», Електронне видання, 2016. – 31 с.
18. Конструкторские базы. Методические указания и контрольные задания к практическим занятиям и самостоятельному изучению дисциплины "Технология машиностроения" для студентов специальности 1201 всех форм обучения / Сост. Ф.Н.Абрамов – К.: Минвуз УССР, КПИ, 1988. – 72 с.
19. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту для студентів спеціальності 7.0902 02 “Технологія машинобудування” / Уклад.: Ю.В. Петраков, В.Г. Біланенко, В.А. Пасічник. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003. – 44 с.

20. Оформление технологической документации. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине "Технология машиностроения" для студентов специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" всех форм обучения / Сост. В.В. Душинский, В.Г. Беланенко. – К.: Минвуз УССР, КПИ, 1988. – 56 с.
21. Порошин В.В., Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
22. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
23. Твердые сплавы - Классификация, история, назначение, сравнение <http://pobedit.com.ua/standarts/articles/43-hard-alloys/201-hard-alloys-classification-history-purpose-comparison.html>.
24. Вдовин Р. А. Повышение качества изготовления лопаток турбины ГТД на основе создания цифровых моделей заготовительных операций: дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2017. – 190 с.
25. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
26. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
27. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рябченко С.В., Нежебовский В.В., Середа Г.В. Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами // Оборудование и инструмент для профессионалов. – №5, 2016. – С. 20-23.
28. Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение / В.К. Старков, С.А. Рябцев, С.В. Костров и др.; под. ред. В.К. Старкова. – М.: МГТУ «Станкин». 2013. – 213 с.
29. Технология автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации / В.А. Полетаев, В.К. Старков, В.Н. Крылов, С.А. Рябцев и др.; под. ред. В.А. Полетаева, В.К. Старкова. – М.: Машиностроение. 2013. – 122.
30. Полетаев В.А. Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета. – № 1 (22), 2012. – с. 165-170.
31. Технология производства авиационных двигателей : Учебн. пособ. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.К. Яценко и др.; Под ред. В.А. Богуслаева / Ч. 3: Методы обработки деталей авиационных двигателей. – 2008. – 638 с.
32. Сакаев А.Х., Макаров В.Ф. Сравнительное исследование шлифования профильных поверхностей лопаток турбины на токарно-лобовом МК163М и станке Elb-Schliff Micro Cut4-520 // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011, № 7 (84) . – С. 165-170.
33. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
34. Технологии механической обработки материалов: Сб. науч. тр. / Отв. ред. Н.В. Новиков; ИСМ НАН Украины. – К., 2006. – 130 с.
35. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 6: Алмазно-абразивный инструмент в техно-

- логиях механообработки / Под ред. А.А. Шепелева, – Киев: ИСМ НАНУ, 2007. – 340 с.
36. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – Киев: ИСМ НАНУ, 2006. – 316 с.
  37. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В.В. Рогова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2006. – 260 с.
  38. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials / R. M'Saoubi, D. Axinte, S.L. Soo, Ch. Nobel, H. Attia, Gr. Karpmeier, S. Engin, W.-M. Sim // CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 557-580.
  39. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites / F. Klocke, S.L. Soo, B. Karpuschewski, J.A. Webster, D. Novovic, A. Elfizy, D.A. Axinte, S. Tonissen // CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 581-604.
  40. Петраков Ю.В., Паньків К.М., Живцов С.П. Формирование геометрических моделей ручья калибров станов холодной прокатки труб // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2009, № 57. – С. 63-70.
  41. Петраков Ю.В., Паньків К.М. Визначення параметрів шару припуску, що зрізується, при 3D-обробці // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2008, № 52. – С. 262-266.
  42. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи при шліфуванні оправок станів холодної прокатки труб // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – ЖДТУ, Вип.12, 2012. – С. 118-127.
  43. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Проектування управляючих програм для шліфування оправок станів холодної прокатки труб на верстаті з ЧПК // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2013, № 69. – С.51-56.
  44. Петраков Ю.В., Субін А.А. Математична модель шліфування внутрішньої гвинтової канавки пари кочення // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 1999, № 37. – С.63-68.
  45. Петраков Ю.В., Субін А.А. Управління циклом врізного шліфування // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2001, № 40. – С.240-244.
  46. Петраков Ю.В., Субін А.А. Визначення граничного алгоритму при шліфуванні внутрішніх гвинтових поверхонь // Вісник Житомирського державного технологічного університету: серія "Технічні науки". – 2003, Вип. 1 (24). – С.56-60.
  47. Петраков Ю.В., Писаренко В.В. Формоутворення ендопротеза колінного суглоба людини циліндричною фрезою на фрезерному верстаті з ЧПК // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – №12, 2012. – С.108-117.
  48. Петраков Ю.В., Писаренко В.В. Simulation of grinding process of 3-D surface artificial knee-joint // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2011, № 61. – С. 208-211.
  49. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Мн., «Наука и техника», 1977. – 256 с.

50. ДСТУ ISO 12085-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів (ISO 12085:1996, IDT).
51. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
52. ISO 3274 GPS Instruments for the measurement of surface roughness by the profile method—contact (stylus) instruments of consecutive profile transformation (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Номінальні характеристики контактних (щупових) приладів). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2012 році.
53. ISO 4287:1997/Cor.1:1998 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters (1997). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення й параметри структури). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2015 році.
54. ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення й параметри структури). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2013 році.
55. ISO 8785 GPS Surface imperfections—terms, definitions, and parameters (1998). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Дефекти поверхні. Терміни, визначення й параметри). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2014 році.
56. ISO 12085 GPS Surface texture. Profile method—motif parameter (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Параметри геометричних узорів). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2013 році.
57. ISO 13565/1 GPS Texture profile method—surface having stratified functional properties— Part I: Filtering and overall measuring conditions (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 1. Фільтрація й загальні умови вимірювань). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2012 році.
58. ISO 13565/2 GPS Characterization of surface texture profile method surfaces having stratified functional properties— Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 2. Характеристика шарів методом виділення лінійної ділянки на кривій процентного вмісту матеріалу). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2012 році.
59. ISO 13565/3 GPS Surface texture profile method—surfaces having stratified functional properties—Part 3: Height characterization using the linear material ratio curve (1998). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 3. Характеристики висоти із застосуванням кривої розподілу матеріалу). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2014 році.
60. UK B15 2TT: Surface Digitization and Parametric Characterization, Birmingham 1993.