

До захисту  
23.05.2025  
Богданов

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Кафедра Механіко-машинобудівний факультет  
Технологій машинобудування та матеріалознавства  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Хрящикова Костянтина Сергійівна  
(ПІБ)

академічної групи 131М-23н-1  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-науковою програмою  
Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва  
(офіційна назва)

на тему Дослідження теплових процесів у зоні різання та їх вплив  
на технологічну систему обробки металів

за наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-С  
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
розділів				
Аналітичний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Технологічний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Спеціальний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Науково-дослідницький	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Рецензент	Анциферов О.В.	89	добре	Анциферов
Нормоконтролер	Рубан В.М.	89	добре	Рубан

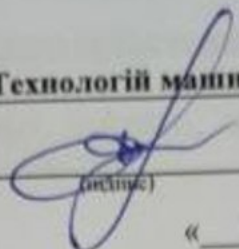
Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

Технологій машинобудування та матеріалознавства  
(повна назва)



(підпис)

В.А. Дербоба

(ім'я та прізвище)

« 03 » 02 2025 року

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти

Хрящикову К.С.

(прізвище та ініціали)

академічної групи

131М-23и-1

(шифр)

спеціальності

131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою

Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва

(офіційна назва)

на тему Дослідження теплових процесів у зоні різання та їх вплив на технологічну систему обробки металів

### 1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 № 317-С

### 2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБИ

Об'єкт досліджень – процеси теплоутворення та теплообміну у зоні різання при механічній обробці металів

Предмет досліджень – теплові потоки, що виникають у зоні контакту інструменту, деталі та стружки, та їх вплив на температурні поля, точність обробки та знос інструменту

Мета – визначення закономірностей розподілу теплових потоків у зоні різання, розробка методів керування тепловими процесами для підвищення ефективності механічної обробки металів

Вихідні дані для проведення роботи – креслення деталі «Вал», характеристики верстатів та різального інструменту, теоретичні дані з процесів теплообміну у зоні різання

### 3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна – встановлення розподілу теплових потоків у зоні різання з використанням методу кінцевих елементів

Практична цінність – розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних геометричних параметрів інструменту та режимів різання для зниження температурних деформацій

та підвищення точності обробки

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Достовірність математичної моделі розподілу теплових потоків у зоні різання з використанням методу кінцевих елементів

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналіз технологічності конструкції деталі	03.02.25-16.02.25
Проект технології обробки деталі	17.02.25-02.03.25
Опис пристосувань верстата та системи ЧПК	03.03.25-16.03.25
Дослідження теплових процесів у зоні різання	17.03.25-04.05.25

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

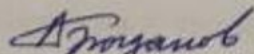
Економічний ефект – підвищення продуктивності обробки за рахунок оптимізація геометрії різального інструменту, режимів різання та температури

Соціальний ефект – поліпшення умов праці за рахунок удосконалення технологічних процесів механічної обробки металів у машинобудуванні

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Забезпечення відповідності технологічного процесу стандартам ДСТУ, ISO, впровадження автоматизації та використання верстатів з ЧПК

Завдання видано

  
(підпис керівника)

О.О. Богданов  
(ініціали та прізвище)

Дата видачі

03.02.2025

Дата подання до екзаменаційної комісії

09.05.2025

Прийнято до виконання

  
(підпис здобувача)

К.С. Хрящук  
(ініціали та прізвище)

## Вступ

Особливе місце у подальшому зростанні економіки країни належить галузям машинобудування, які забезпечують матеріальну основу технічного прогресу всіх галузей народного господарства.

Практичному здійсненню широкого застосування прогресивних типових технологічних процесів, оснащення обладнання, засобів механізації та автоматизації сприяє єдина система технологічної підготовки виробництва, що забезпечує для всіх організацій та підприємств системний підхід оптимізації вибору методів та засобів технологічної підготовки виробництва.

Розробка нових синтетичних надтвердих інструментальних матеріалів дозволило розширити як діапазон режимів різання, так і спектр оброблюваних матеріалів. Підвищення точності верстатів було досягнуто введенням у їхню конструкцію вузлів, що реалізують нові принципи (наприклад, використання безконтактних вимірювальних систем).

Поряд із підвищенням точності верстатів відбувається процес подальшої їх автоматизації на базі регульованих електроприводів, засобів електроавтоматики та обчислювальної техніки. У зв'язку із застосуванням числового програмного управління при обробці на верстаті збільшилася ступінь концентрації на кожному окремому верстаті, і для подальшого підвищення їхньої надійності стали оснащувати засобами діагностування та оптимізації обробки, що дуже важливо для верстатів у складі гнучких виробничих систем.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ДТМ-ІНЖИНІРИНГ».

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Характеристика об'єкту виробництва

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 1.1 – Тривимірна модель деталі «Вал»

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конструкційна легована сталь 40Х використовується для виготовлення деталей, що володіють підвищеною міцністю – вали, осі, плунжери, вал-шестерні, кулачкові вали, колінчасті вали, штоки, шпинделі, кільця, зубчасті вінці, рейки, оправки, піввісі, болти, втулки та ін. Продукція: сортовий прокат, в тому числі фасонний, напівфабрикати, поковки, листовий прокат.

Марка сталі 40Х є важкозварювальною, флокеночутливою та схильною до відпускнуї крихкості.

Зварювальний шов – одна з основних причин утворення тріщин в матеріалі. Тому матеріал зі сталі 40Х розігрівають перед виконанням зварювальних робіт та піддають термічній обробці після нього.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

таблиці 1.3.

Вимоги до робочих поверхонь деталі не є завищеними і відповідають їхньому службовому призначенням. Застосований матеріал забезпечує виконання вимог до механічних властивостей поверхонь і деталі в цілому і має гарні технологічними характеристиками як при обробці тиском, так і різанням.

В цілому, технологічність конструкції деталі Вал після якісного аналізу можна оцінити як гарну за основними показниками.

Таблиця 1.3 – Результати аналізу технологічності конструкції деталі Вал

Показники технологічності конструкції деталі	Оцінка технологічності	
	Добре (допустимо)	Погано (недопустимо)
Наявність в деталі стандартних і уніфікованих елементів.	+	-
Можливість виготовлення деталі зі стандартних і уніфікованих заготовок.	+	-
Наявність оптимальної точності і шорсткості поверхні стали.	+	-
Відповідність фізико-хімічних і механічних властивостей матеріалу, жорсткості форми і розмірів деталі вимога технології механічної і термічної обробки.	+	-
Відповідність показників базових поверхонь деталі (розміри, точність, шорсткість) вимогам установці обробки і контролю.	+	-
Відповідність оформлення робочого креслення деталі вимога КД і ЕСДП РЕВ.	+	-

Крім якісних показників є ще й кількісні. Необхідно визначити показники технологічності конструкції валу.

Дані конструктивного аналізу деталі по поверхнях представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Конструктивний аналіз деталі

Найменування поверхні	Кількість поверхонь	Кількість уніфікованих елементів	Квалітет точності	Параметр шорсткості, мкм
торець Л	1	-	15	12,5
торець П	1	-	15	12,5
Шпонковий паз	3	3	9	3,2
Поверхня Ø20	1	1	15	6,3
Циліндрична поверхня Ø35	1	1	7	3,2
Циліндрична поверхня Ø45	1	1	9	3,2
Циліндрична поверхня Ø40	2	2	6	1,6
Циліндрична поверхня Ø39,5	1	1	15	12,5
Циліндрична поверхня Ø37	1	1	15	12,5
Циліндрична поверхня Ø40	1	1	15	6,3
Шліцева поверхня Ø38	1	1	8	3,2
Шліцева поверхня Ø32	1	1	15	3,2
Канавка	1	1	15	12,5
Фаска 1,6× 45°	2	2	15	12,5
Фаска 7×30°	2	2	15	12,5

Визначимо коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів:

$$K_{yc} = \frac{Q_y}{Q_{\Sigma}}$$

де  $Q_y$  – кількість уніфікованих елементів;

$Q_{\Sigma}$  – загальна кількість поверхонь.

$$K_{yc} = \frac{18}{20} = 0,9$$

Так як  $K_{yc} > 0,6$ , можна зробити висновок, що деталь технологічна.

Визначимо коефіцієнт використання матеріалу:

$$КВМ = \frac{M_d}{M_3}$$

$$КВМ = \frac{2,3}{4,6} = 0,5$$

Для вихідної заготовки цього типу такий показник свідчить про задовільне використання матеріалу.

Аналізуючи вимоги робочого креслення, робимо висновок, що матеріал деталі дозволяє забезпечити необхідні механічні властивості, шорсткість необроблювальних поверхонь та конструктивні особливості деталі.

Для контролю або вимірювання розмірів оброблюваних поверхонь і їх взаємного розташування потрібні спеціальні інструменти або пристосування такі як: прохідний комплексний калібр (для перевірки шліців).

Таким чином, технологічність конструкції деталі «Вал» після якісного і кількісного аналізу можна оцінити як гарну за всіма показниками.

### 1.3 Висновки

Технологічність конструкції деталі «Вал» після якісного і кількісного аналізу можна оцінити як гарну за всіма показниками.

Деталь «Вал» – технологічна.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Обґрунтування форми та розмірів заготовки

Враховуючи, що деталь випускається серійно, а також забезпечуються виключно способом її виготовлення, доцільно використати заготовку типу прокат. Розміри заготовки з сортового прокату визначається із урахуванням припуску на обробку найбільшого діаметра ступеня валу. Довжина заготовки розраховується з урахуванням загальної довжини деталі, враховуючи припуск на кожен із сторін. Найбільший діаметр заготовки дорівнює 45 мм і має загальні допуски за креслеником. Заготовкою буде круглий гарячекатаний сталевий прокат за ДСТУ 4738 діаметром 50 мм з точністю прокатки Б. Довжина заготовки 300 мм з урахуванням припуску на обробку двох торців – 8 і 2 мм.

Прокат за ДСТУ 4738 містить стандартизований сталевий гарячекатаний прокат. Виходячи, що на деталі максимальний діаметр 45 мм, зі стандарту обираю значення, враховуючи припуск. Тому обираю найближче значення діаметр 47 мм, а щоб мінімізувати похибку базування поверхня буде оброблятися на першому установі.

Довжина заготовки з прокату визначається із загальної довжини деталі. Загальна довжина деталі становить 290 мм, додаємо по 3,5 мм на кожен із сторін. Таким чином враховується похибки на відрізанні заготовки, а також припуск на подальшу обробку торців. Отже, обраний прокат з підвищеною точністю Б і діаметром 47 мм. Виходячи, що на деталі максимальний діаметр 45 мм, призначаються за ДСТУ 4738 відхилення на розмір  $\text{Ø}45_{-0,062}$  мм.

## 2.2 Визначення типу виробництва і форми його організації

На цій стадії проектування, в якості вихідних даних для визначення типу виробництва приймаються маса і річна програма випуску деталі «Вал»:

- маса деталі - 2,3 кг;
- річна програма випуску - 1000 шт.

Попередньо приймається середнє серійне виробництво.

Передбачено дві форми організації - групова і потокова, які характеризуються рівнем спеціалізації робочих місць і розташуванням технологічного обладнання.

Для обох деталей вибираємо групову форму організації виробництва. Основним показником, що характеризує серійне виробництво, є величина партії деталей, одночасно що запускаються у виробництво. Розмір партії визначається за формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi},$$

де  $a$  - періодичність запуску деталей у виробництво. Визначається в днях. Можливі значення - 3, 6, 12, 24.

Для багатосерійного виробництва приймаємо, що запас деталей на складі забезпечує роботу складального цеху на 12 днів.

$\Phi$  - число робочих днів у році (254 дня).

Отже, для деталі «Вал»:

$$n = \frac{1000 \cdot 12}{254} \approx 47,3 = 48$$

Розмір партії приймаємо 48 штук, щоб він був кратний річній програмі випуску деталі.

Такт випуску деталей

$$t_B = \frac{60 \cdot F_d \cdot m}{N},$$

де  $F_d$  – річний дійсний фонд роботи верстата, рік; при роботі в одну зміну  $F_d=2030$  год.;

$m$  – число змін роботи станка на добу;

$N$  – річна програма випуску деталі, шт.

$$t_B = \frac{60 \cdot 2030 \cdot 2}{1000} = 243,6 \text{ хв}$$

### 2.3 Методи обробки поверхонь деталі

Таблиця 2.1 – Методи обробки поверхонь деталі «Вал»

Вид поверхні, розмір, мм	Квалітет	Шорсткість, мкм	Метод обробки поверхонь
Установ 1			
Торець П	15	12,5	1. Чистове точіння
Зовнішня Ø40	6	1,6	1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Зовнішня Ø45	15	3,2	1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Зовнішня Ø39,5	15	1,6	1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Зовнішня Ø37	15	12,5	1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Канавка R7	15	12,5	1. Фрезерування
Шпонковий паз 6,3×4×30	9	3,2	1. Чистове точіння 2. Фрезерування різьблення
Різьба М40×1,5	15	6,3	1. Точіння зовнішньої нарізі
Шліцева	15	3,2	1. Фрезерування
Установ 2			
Торець Л	15	12,5	1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове

Зовнішня Ø35	7	3,2	1.Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Зовнішня Ø20	15	6,3	1.Точіння чорнове 2. Точіння чистове
Шпонковий паз 5,3×2×14	9	3,2	1. Фрезерування
Шпонковий паз 10×5	9	3,2	1. Фрезерування
Різьба M20×1,5	15	6,3	1. Точіння зовнішньої нарізі

## 2.4 Вибір верстата, оснащення та інструменту

Для мого проекту був потрібен верстат з ЧПК, який окрім токарної обробки, ще має змогу виконувати фрезерні операції. Тому мій вибір пав на верстат південно-корейського виробництва компанії DOOSAN.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд верстату DOOSAN PUMA MX1600 ST

### Загальна інформація про верстат DOOSAN PUMA MX1600 ST

Параметри обробки	
Максимальна довжина точіння	900 мм
Максимальний діаметр точіння	330 мм
Діаметр патрона	170 мм
Основний шпиндель	
Швидкість шпинделя	6000 об/хв
Потужність двигуна	15 кВт
Обертаючий момент	208 Нм
Контршпиндель	
Швидкість контршпинделя	6000 об/мін
Потужність двигуна контршпинделя	15 кВт
Інші параметри	

Система ЧПК	Fanuc
Габарити	
Довжина	3302 мм
Висота	2769 мм
Глибина	2680 мм
Вага	11300 кг

Пристосування для різання заготовки.

UE-330 V — горизонтальний стрічкопильний верстат по металу маятникового типу. Розпилювання заготовок під кутом до 45 градусів в одну сторону (поворот губок лещат). Верстати з поворотом губок лещат оптимальні для різання в основному під прямим кутом з незначною кількістю різів під кутом заготовок невеликої довжини. Плавне регулювання швидкості полотна, гідравлічне регулювання подачі пильної рами, щітка для очищення полотна. Верстати розроблені для прокату великого перерізу і великих профільних заготовок.

Максимальні розміри заготовок, мм:

- Коло 90 градусів  $D = 330$
- Коло 45 градусів  $D = 255$
- Квадрат 90 градусів  $330 \times 480$
- Квадрат 45 градусів  $280 \times 255$
- Прямокутник 90 градусів  $225 \times 530$

Тип верстата	Ручний
Регулювання подачі	Гідродемпфер
Поворот	Губки лещат
Швидкість полотна, м/хв	25-75
Напруга, В	380
Потужність двигуна, кВт	2,2
Частота, Гц	50
Розмір полотна, мм	34 x 1,1 x 4100
Натяг полотна	Ручне
Вага, кг	600
Розмір в упаковці, мм	2150x810x1380

## 2.5 Вибір технологічних баз і розробка маршруту обробки деталі

Вибір баз є одним з найскладніших і принципових розділів проектування технологічних процесів. Від правильного вибору технологічних баз в значній мірі залежать: фактична точність виконання розмірів, правильність взаємного розташування поверхонь, ступінь складності пристрої, ріжучих і вимірювальних інструментів, загальна продуктивність обробки заготовок.

Вибір базових поверхонь залежить від конструктивних форм деталі і технічних вимог.

Чорнові технологічні бази використовуються тільки на початкових операціях для підготовки чистових баз для наступних операцій.

Маршрут обробки деталі «Вал».

Виходячи з прийнятих МОП, розробляємо маршрут обробки деталі на підставі типового маршруту з урахуванням обраних технологічних баз, і представляємо його у вигляді таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Маршрут обробки деталі «Вал»

№ Операції	Найменування операцій	Зміст операцій	Спосіб установки
005	Стрічково-відрізна	Отримання заготовки	
010	Програмна	Підрізка правого торця поз. 1; Точіння поверхонь валу Ø38, Ø40, Ø45 Точіння канавок 1,2,3 Фрезерування пазу 1 Нарізання різьби М40-1,5 Фрезерування шліців	У патроні
015	Токарна	Підрізка лівого торця поз. 2 Точіння поверхонь Ø20, Ø35, Ø45	У патроні
020	Програмна	Фрезерування пазу 2,3 Нарізання різьби М20-1,5	У центрах та патроні
025	Контрольна	Контролювати оброблювальні розміри	Стіл ВТК

## 2.6 Вибір інструменту

Вибір різальних інструментів здійснюється залежно від методу обробки, форми та розмірів оброблюваної поверхні, її точності та шорсткості, оброблюваного матеріалу.

Вибір інструментів я здійснював за допомогою каталогу ISCAR.

ISCAR - ізраїльська компанія-виробник металорізального інструменту, що входить до складу одного з найбільших у світі металообробних конгломератів IMC Group (International Metalworking Companies).

Якість, продуктивність, стабільність та надійність інструменту ISCAR стали незаперечними, а новизна конструкцій та технологій металообробки є унікальними. ISCAR постійно веде роботи з розробки більш досконалих інструментів, розширюючи номенклатуру продукції, що випускається, і підвищуючи її якість і працездатність.

Це в першу чергу відноситься до вдосконалення створюваних твердих сплавів як у вигляді змінних ріжучих пластин, так і як цільного осьового і фрезерного інструменту. Глибокі дослідження та розробки здійснюються в галузі зносостійких покриттів.

Крім виробництва твердих сплавів, ISCAR виготовляє та постачає всю гаму інструментів для токарних та фрезерних робіт, оснащених різальною керамікою, синтетичними алмазами та КНБ.

Обрані інструменти представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Різальний інструмент

Назва операції	Інструмент	Сторінка каталогу
Підрізати торець	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMG 080404-F3P сплав IC830	115
Точіння поверхонь (чорнове)	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMN 080408-NM сплав IC8250	122
Точіння поверхонь (чистове)	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMG 080404-F3P сплав IC830	115
Точіння канавок (1,2)	Державка HELIR2525-4T12	250
	Пластина GRIP4002Y, сплав IC830	254
Точіння канавок (3)	Державка HELIR2525-4T12	250
	Пластина GRIP4020Y, сплав IC830	255
Фрезерна операція для шпонкового пазу (1)	Кінцева фреза ISCAR EC-H4L-05-10/15C6CFR.2-57	124
	Патрон ISCAR HSK E40 ER16X80 DIN6499 Цанга ER16 SPR 6-7 сплав IC900	120/1066
Нарізання різьби 1)	Державка SER2525M16	652
	Пластина 16ERM1.50 ISO, сплав IC1007	616
Фрезерна операція для шліців	Фреза кінцева ISCAR EC-E3 06-08C06E39 Радіусна кінцева фреза ISCAR EFF-S4-05 022/17C06M57	124/923
	Патрон ISCAR HSK E40 ER16X80 DIN6499 сплав IC900 Цанга ER16 SPR 6-7 сплав IC902	120/1066
Підрізати торець (чорнове)	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMN 080408-NM сплав IC8250	122
Підрізати торець	Державка PWLNR 2525 M-08	6

(чистове)	Пластина WNMG 080404-F3P сплав IC830	115
Точіння поверхонь (чорнове)	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMN 080408-NM сплав IC8250	122
Точіння поверхонь (чистове)	Державка PWLNR 2525 M-08	6
	Пластина WNMG 080404-F3P сплав IC830	115
Фрезерна операція для шпонкового пазу (2)	Кінцева фреза ISCAR EC-H4L-05- 10/15C6CFR.2-57	124
	Патрон ISCAR HSK E40 ER16X80 DIN6499 Цанга ER16 SPR 6-7 сплав IC900	120/1066
Фрезерна операція для шпонкового пазу (3)	Кінцева фреза ISCAR EC-H4L-05- 10/15C6CFR.2-57	124
	Патрон ISCAR HSK E40 ER16X80 DIN6499 Цанга ER16 SPR 6-7 сплав IC900	120/1066
Нарізання різьби (2)	Державка SER2525M16	652
	Пластина 16ERM1.50 ISO сплав IC1007	616

Вибір режимів різання був здійснений за рекомендацією до інструментів в каталозі. Режими наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Режими різання

Назва операції	Подача	Швидкість різання
Підрізати торець	0,100 мм/об	150 м/хв
Точіння поверхонь Ø38, Ø40, Ø45 (чорнове)	0,300 мм/об	145 м/хв
Точіння поверхонь Ø38, Ø40, Ø45 (чистове)	0,150мм/об	175м/хв
Точіння канавок (1,2) (чорнове)	0,210 мм/об	100 м/хв

Точіння канавок (1,2) (чистове)	0,160мм/об	100 м/хв
Точіння канавок (3) (чорнове)	0,150 мм/об	100 м/хв
Точіння канавок (3) (чистове)	0,100 мм/об	100 м/хв
Фрезерна операція для шпонкового пазу (1)	0,05 мм/зуб	200 м/хв
Нарізання різьби (1)	1,500 мм/об	120 м/хв
Фрезерна операція для шліців	Кінцева фреза 0,03-0,07 мм/зуб Радіусна кінцева фреза 0,1-0,3 мм/зуб	180-220 м/хв 190-230 м/хв
Підрізати торець (чорнове)	0,200 мм/об	150 м/хв
Підрізати торець (чистове)	0,100 мм/об	150 м/хв
Точіння поверхонь (чорнове)	0,300 мм/об	145 м/хв
Точіння поверхонь (чистове)	0,150 мм/об	175 м/хв
Фрезерна операція для шпонкового пазу (2)	0,05 мм/об	190 м/хв
Фрезерна операція для шпонкового пазу (3)	0,05 мм/зуб	210 м/хв
Нарізання різьби (2)	1,500 мм/об	120 м/хв

## 2.7 Висновки

В даному розділі було обрано заготовку, розглянуто методи обробки поверхонь деталі, створено маршрут обробки. Здійснено вибір верстатного обладнання та різального інструменту, призначено режими різання.

### 3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Докладний опис пристосувань верстата

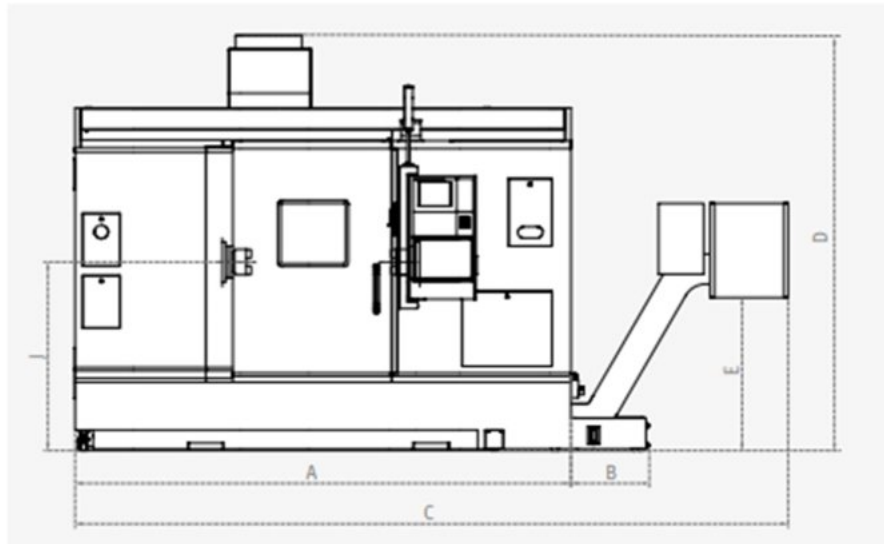


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд верстату DOOSAN PUMA MX1600 ST

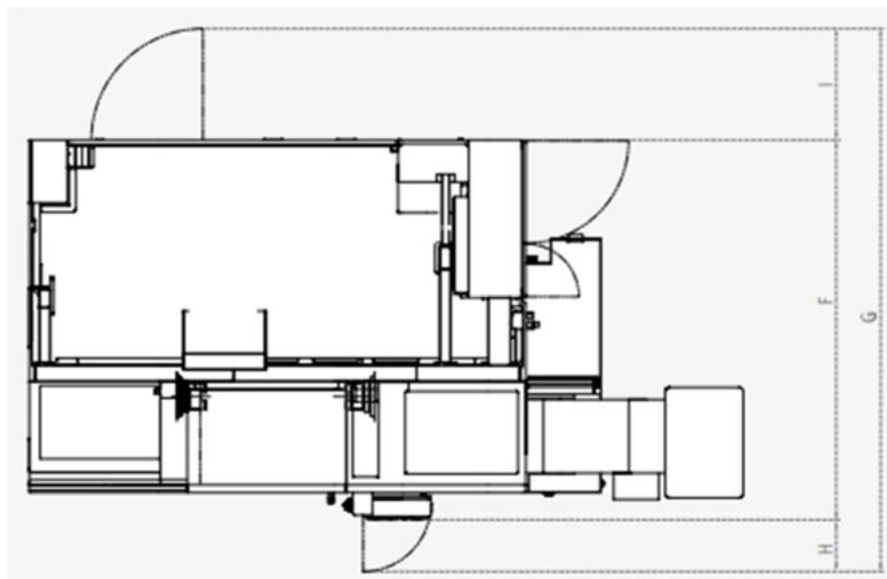
#### Загальна інформація про верстат DOOSAN PUMA MX1600 ST

Параметри обробки	
Максимальна довжина точіння	900 мм
Максимальний діаметр точіння	330 мм
Діаметр патрона	170 мм
Основний шпиндель	
Швидкість шпинделя	6000 об/хв
Потужність двигуна	15 кВт
Обертаючий момент	208 Нм
Контршпиндель	
Швидкість контршпинделя	6000 об/хв
Потужність двигуна контршпинделя	15 кВт
Інші параметри	
Система ЧПК	Fanuc

Габарити	
Довжина	3302 мм
Висота	2769 мм
Глибина	2680 мм
Вага	11300 кг



а)



б)

Рисунок 3.2 – Габарити верстата (а,б)

Привідні блоки BMT-55 виробництва SMW-Autoblok.

Весь приводний інструмент SMW-Autoblok виготовляється на заводі в Турині, Італія. Чудова якість досягається за рахунок застосування найсучасніших та передових виробничих верстатів.

Корпус приводного інструменту оброблений із цільного блоку сталі. Така моноблочна конструкція дозволяє уникнути вібрації та структурних дефектів, які виникають на зварних корпусах та на корпусах з болтовим з'єднанням. Після складання кожен приводний інструмент перевірено для забезпечення точних робочих характеристик.

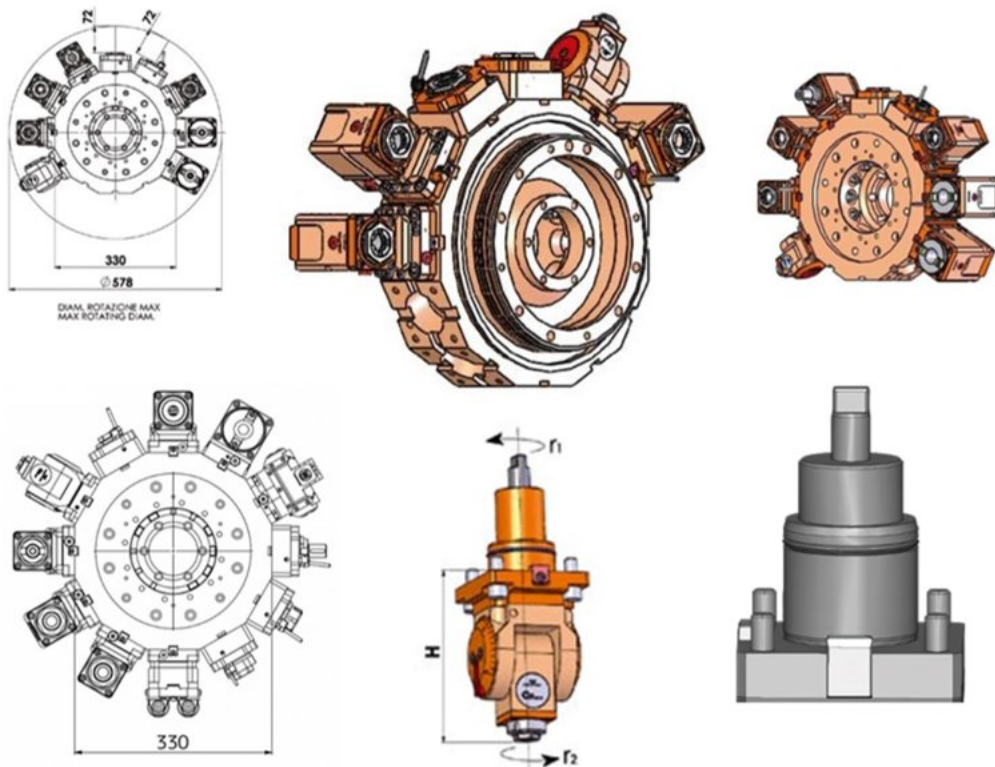


Рисунок 3.3 – Револьверна голова верстату

Таблиця 3.1 – Характеристики приводного блоку верстата

Найменування	Приводний LT-T осьовий-радіальний блок BMT-55 ER16-F(Ø 1-10)
Артикул	05121500
H (мм)	132
M (Нм)	13
V(об/хв)	4000
Бренд	SMW-Autoblok
Передавальні відносини	1:1
СОЖ	зовнішній
Тип	LT-T
Цанга	ER16-F

Таблиця 3.2 – Головний приводний шпиндель верстата

Стандартний діаметр патрону	175
Тип приводу шпинделя	Прямий (мотор-шпиндель)/Built-In
Частота обертання шпинделя ТО, об/хв	688
Частота обертання шпинделя ДО, об/хв	6000
Крутний момент шпинделя піковий (макс.), Нм	208
Потужність шпинделя у постійному режимі роботи (S1-100% часу), кВт	11
Потужність шпинделя пікова (макс), кВт	15
Крутний момент вісі С, Нм	208
Отвір у шпинделі, мм	62
Макс. діаметр прутка, мм	52
Спосіб охолодження	масляне

Таблиця 3.4 – Контршпиндель

Положення контр-шпинделя	Зафіксоване горизонтально
Стандартний діаметр патрону контр-шпинделя, мм	175
Базове оснащення	
Тип привода шпинделя	Прямий (мотор-шпиндель)
Частота обертання ОТ, об/хв	688
Частота обертання ДО, об/хв	6000
Крутний момент контршпинделя Піковий (макс.), Нм	208
Потужність контршпинделя у постійному режимі роботи (S1-100% часу), кВт	11
Потужність контр-шпинделя пікова (макс.), кВт	15
Крутний момент вісі С, Нм	208
Отвір у шпинделі, мм	62
Спосіб охолодження контршпинделя	масляне

### 3.2 Система автоматизації ЧПК

ЧПК FANUC дозволяє виконувати складну машинну обробку, що вимагає наявності кількох осей та траєкторій переміщення. Незалежно від розміру та матеріалу оброблюваного виробу ЧПК FANUC забезпечують поєднання точності, мінімальної тривалості циклу та бездоганної якості поверхні. В результаті скорочується невиробничий час, і виключаються неточності, що пов'язані з одночасною обробкою кількох деталей.

ЧПК: стійки FANUC 0i, i, 30i/31i/32i/35i FANUC Ltd. Стійки ЧПК Fanuc – надійні та зручні системи, з величезним запасом функціональних можливостей.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

- Стійки FANUC 0i-MD: підходять для обробних центрів; максимальна загальна кількість керованих осей: 8; максимальна кількість одночасно керованих осей: 4.

- Стійки FANUC 0i-TD: підходять для токарних верстатів; максимальна загальна кількість керованих осей (1 шлях): 8; максимальна загальна

кількість керованих осей (2 шляхи): 11; максимальна кількість одночасно керованих осей: 4;

- Стійки FANUC 0i-PD: підходять для штампувальних пресів; максимальна загальна кількість керованих осей: 7; максимальна кількість одночасно керованих осей: 4.

- Стійки FANUC 0i-Mate-MD: підходять для обробних центрів; максимальна загальна кількість керованих осей: 6; максимальна кількість одночасно керованих осей: 4.

- Стійки FANUC 0i-Mate-TD: підходять для токарних верстатів; максимальна загальна кількість керованих осей: 6; максимальна кількість одночасно керованих осей: 4.

- Стійки FANUC серій 30i/31i/32i/35i-модель В: для високошвидкісної та високоточної обробки.

- Стійки FANUC серії i-модель А – це високошвидкісне ЧПУ, яке застосовується для різних промислових машин загального призначення.

#### Нова лінійка ЧПК FANUC: Серія 30i/31i/32i-B Plus

##### 1. Змінено базове оснащення ЧПК

Тепер усі стандартно необхідні функції включені до базового оснащення

- 76 функцій, які були раніше опціональними
- базова підтримка функцій кастомізації: FANUC Picture, Macro Executor, C-Language Executor
- 4 Мб пам'яті для зберігання керуючих програм
- 8 Мб пам'яті для користувача ПЗ (розробленого за допомогою засобів кастомізації)
- порт Multi-function Ethernet стандартно присутня на материнській платі ЧПК (відповідно, підтримка різних промислових протоколів можлива без додаткових інтерфейсних плат)

##### 2. Змінено систему формування функціоналу ЧПК

Стали доступними спеціалізовані пакети та набори функцій, призначені для конкретного обладнання або застосування.

Можливість формування специфікації за функціями збережено.

Доступна велика кількість кадрів попереднього перегляду (до 1000 кадрів) та NURBS інтерполяція.

3. Оновлена лінійка дисплейних модулів.

Діагоналі дисплейних модулів, що підтримуються, залишилися без зміни: 10.4”, 15”, 19”, 21.5”.

Доступні, як і раніше, окремо стоїть і об'єднане з дисплеєм виконання ЧПК. Однак тепер у об'єднаному з дисплеєм виконанні замовити ЧПК без нового інтерфейсу iHMI можна лише з дисплеєм із діагоналлю 10.4”.

Крім того, сенсорні дисплейні модулі Panel iH, що використовуються в об'єднаному виконанні, тепер обробляють до двох торкань одночасно, що дозволяє ефективніше використовувати інтерфейс за рахунок керування жестами.

### 3.3 Висновки

В даному розділі було розглянуто пристосування верстата DOOSAN PUMA MX1600 ST, системи автоматизації ЧПК.

## 4. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Теплові потоки в зоні різання

У зоні різання виникають при основних джерелах тепла: тепло деформації в зоні виникнення стружки (інтенсивність джерела  $q_g$ ), тепло тертя на площі контакту стружкою і передньою поверхнею інструменту  $q_{1T}$  та тепло тертя між задньою поверхнею інструменту та деталлю  $q_{2T}$  (рис.4.1).

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Тепло кожного із перелічених джерел так чи інакше передається усім твердим тілам, що залучені в процес різання – деталі, різцю, стружці. Розглянемо джерело тепла, що виникає в зоні стружкоутворення поблизу площі здвигу  $N$  (рис. 4.1).

Тепло цього джерела (тепло деформації) розподіляється між стружкою та деталлю. Стружка переміщуючись по контактній площі  $b \times l_1$  із різцем, віддає йому частину температури що отримана в зоні стружкоутворення. Це

тепло може частково піти в тіло різця, а частково може через інструмент передаватись в деталь, оскільки існує теплообмін між задньою частиною різучого клину й поверхністю різання.

Частина тепла деформації, що потрапила із зони стружкоутворення в деталь, переноситься із нею повз контактну площину  $b \times l_2$  на задній поверхні різця. Деяка частка тепла може при цьому направлятися в інструмент, а звідти – в стружку.

Аналогічні маршрути розповсюдження тепла виникають і від двох інших джерел. Таким чином в зоні різання має місце сплетіння шляхів руху тепла й через це математичний опис процесу теплообміну виявляється дуже складним. Без втрати точності та без відхилення від реальної фізики процесу – схему руху потоків тепла можна значно спростити, ввівши поняття о підсумкових потоках теплоти через контактні поверхні інструменту. Ці потоки показані на рис.4.1. у вигляді джерел інтенсивністю  $q_1$  и  $q_2$ .

Позначимо через  $Q$  загальну теплову потужність процесу різання. Із достатньою для практики точністю можна припустити, що теплова потужність повністю еквівалентна механічній потужності процесу різання.

Із урахуванням вимірів  $P_z$  [кгс],  $V$  [м/хв] та  $Q$  [кал/с], прирівнюючи теплову та механічну потужність процесу, ми також отримаємо

$$Q=0,039P_zV,$$

де  $P_z$  – тангенціальна сила, а  $V$  – швидкість різання.

Далі через  $Q_d$  наведемо потужність джерела тепла деформації,  $Q_{1T}$  та  $Q_{2T}$  - теплова потужність джерел що виникають як результат тертя передньої та задньої поверхні інструменту,  $Q_1$  и  $Q_2$  – теплову потужність вихідних джерел на цих поверхнях.

Величини, що відносяться до передньої поверхні інструменту мають в індексі цифру 1, а ті, що відносяться до задньої поверхні – цифру 2. За цих позначень отримуємо:

$$Q = Q_c + Q_i + Q_p = 0,039 P_z V;$$

$$Q_c = b^*Q_d + Q_{1T} - Q_1; \quad (4.1)$$

$$Q_i = (1 - b^*) Q_d + Q_{2T} - Q_2;$$

$$Q_p = Q_1 + Q_2.$$

Тут  $Q_c$ ,  $Q_i$ ,  $Q_p$  відповідають теплу стружки, деталі та різця;  $b^*$  - частка що характеризує частину тепла деформації що передається стружці;  $P_z$  [кгс] - тангенціальна складова сил різання;  $V$  [м/мин] - швидкість різання.

На основі однієї із формул (1) підсумовуємо що температурне поле можна отримати суперпозицією (сумою полів) що виникаю в результаті дії вихідних потоків теплообміну  $Q_1$  та  $Q_2$ . Аналогічні підсумки можна зробити про складові сумарного поля в деталі та стружці для яких  $Q_1$  и  $Q_2$  є стоками теплоти.

Оскільки стружка, інструмент та деталь що які приймають участь в металообробці є лезовими інструментами, - об'ємні тіла, то враховуючи складне просторове сплетіння теплових потоків в зоні різання, джерела теплоутворення є тривимірними. Урахування об'ємності джерел призводить до суттєвого ускладнення математичного апарату. Через це, джерела для розрахунків джерела теплоутворення будемо вважати двовимірними (пласкими), розподіленими по тих чи інших ділянках поверхності різця, стружки чи виробу, із розмірами що дорівнюють площі контакту цих тіл.

Характерна особливість всіх лезових інструментів – наявність ріжучого клину із зоною деформації матеріалу деталі, томи лезовий інструмент зазвичай схематизується у вигляді необмеженого клину із кутом розтину  $\beta$ , що не є безкінечним тілом, особливо в напрямку головного ріжучого краю. Але оскільки довжина цього краю зазвичай значно ширше ширини розрізу, то ріжучий клин можна вважати необмеженим у двох напрямках.

Щодо деталі що обробляється, то її розміри завеликі у порівнянні із розмірами джерел тепла. Тому схематизуємо її у вигляді напівпростору (напівбескінечного тіла).

Стружку при обробці лезовим інструментом схематизуємо у вигляді однорідного стрижня безкінечної довжини із відповідним режимом різання перетином.

Важливим і складним питанням є визначення розподілу щільності теплових потоків на контактних поверхнях деталі, інструменту та стружки. У теперішній час немає єдиної думки щодо цього питання, що обумовлене великою складністю процесів деформації та тертя в зоні різання. Припустимо, що тепло деформації  $q_g$  утворюється в площині зсуву та розподілене рівномірно (рис.4.2). тепло тертя стружки о передню поверхню розподілена за законом:

$$c(x) = q_c \sqrt{1 - (x/c)}$$

а тепло тертя деталі о задню поверхню ріжучої пластини розподілене за законом:

$$q_h(y) = q_h [1 - (y/h)^2]$$

Розміри ріжучої пластини у напрямку осі X достатньо великі у порівнянні із площею контакту стружки та передньої поверхні. Тому поверхня, що протиставлена задній поверхні пластини виключена із розрахунку. Тепловий потік через зазначену поверхню прийняти нулю.

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

Поверхня ріжучої пластини протилежна передній поверхні контактує із твёрдосплавною підкладкою та через неї із масивним корпусом різця. Тому температура цієї поверхні прийнята рівною температурі корпусу різця та навколишнього середовища. Нехтуючи теплообміном у напрямку головного ріжучого краю на межі контакту між передньою та задньою поверхнею із стружкою та деталлю що призведе до деяких завищень розрахункових температур, будемо розглядати задачу в двовимірному просторі:

$$\partial t / \partial \tau = a (\partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2),$$

із початковими та обмежуючими умовами:

$$t(x, y, 0) = 20^\circ\text{C};$$

$$\text{при } y = 0, 0 \leq x \leq c :$$

$$-\lambda \partial t / \partial y = q_1 ;$$

$$\text{при } y = 0, c < x < \infty$$

$$\partial t / \partial y = 0 ;$$

при  $x = 0, 0 \leq y \leq h$  :

$$-\lambda \partial t / \partial x = q_2 ;$$

при  $x = 0, h < y < \infty$  :

$$\partial t / \partial x = 0;$$

при  $x > 0, y = 4,76$  :

$$t = 20^\circ\text{C} ;$$

при  $y > 0, x = 9,52$ :

$$\partial t / \partial x = 0,$$

де  $q_1$  и  $q_2$  вихідні теплові потоки на передній та задній поверхнях ріжучої пластини.

Розрахунки наведені за методикою Резнікова показали що вихідний тепловий потік  $q_2$  (за умов:  $t_p = 0,6$  мм;  $S = 0,6$  мм/об;  $V = 2,5$  м/с;  $\gamma = 0^\circ$ ) близький до нуля. Застосування методу теплових джерел дозволяє розраховувати середні температури на передній  $t_{1cp}$  та задній  $t_{2cp}$  поверхнях інструменту в межах зони різання. Для зазначених умов ці температури становили  $t_{1cp} = 890^\circ\text{C}$ ,  $t_{2cp} = 1030^\circ\text{C}$ , а середня температура зони різання  $t_{cp} = 942^\circ\text{C}$ .

Існуючі аналітичні методи, в тому числі й метод джерел, не дозволяють виконувати розрахунки температурних полів в різальному інструменті й частина інструменту взагалі виключається з розрахунків. Тому для дослідження температурного поля в ріжучій пластині слід використовувати числові методи. Аналіз літературних джерел показав що найбільш ефективним для даної мети є метод кінцевих елементів (МКЕ).

Процедура побудови кінцевомірного аналогу варіаційної задачі за допомогою МКЕ складається із трьох етапів: розбиття області на кінцеві елементи, побудова функцій форми кінцевого елемента, перехід до кінцевої задачі.

Похідною розбиття області  $D$  евклідового простору  $E^r$  ( $r = 1,2,3$ ) на кінцеві елементи (рис. 4.2.). В якості кінцевих елементів обираються криволінійні багатокутники у випадку  $r = 3$ . Окремий кінцевий елемент будемо позначати через  $k$ , сукупність кінцевих елементів на котрі розбивається область  $D$ , позначимо як  $T$  та назвемо це розбиттям області  $D$ . Позначимо через  $h$  максимальний діаметр кінцевих елементів  $k$ , що входять в розбиття  $T$ .

$$h = \max \text{diam } k.$$

Для того, щоб характеризувати розбиття області однотипними елементами при різних  $h$  будемо застосовувати позначку  $T_h$ .

Розбиття  $T$  на області  $D$  виконується таким чином, щоб задовольнити наступні загальні вимоги:

- 1)  $D = \cup k$  ;

$D_h$  будь який кінцевий елемент  $k \in T$  знаходиться в області  $D$ .

- 2) для кожного  $k \in T$  множину  $k$  замкнуто і його множина внутрішніх точок  $k$  не є порожньою.

- 3) для кожного  $k \in T_h$  межа  $\partial k$  неперервна по Ліпшицу.

- 4) розбиття  $T_h$  повністю показує область  $D$  в тому сенсі, якщо  $D_h = \cup k$ ,  $k \in T_h$ , то для будь якого компакту  $B \in D_h$  прилеглих до елементу  $k$  в цій точці.

Припускаючи, що тип кінцевого елементу що використовується в розбитті  $T$  обраний, побудуємо функції форми (базисні функції). Будемо називати  $P_1, P_2, \dots, P_s$  кінцевого елементу всі його вершини, а також, можливо, деяке число внутрішніх точок цього елементу.

Неперервні частково-дифференційовані функції  $\varphi_i(x)$ ,  $i = 1, s$ ,  $x \in T$  є функціями форми елементу  $k$ , якщо:

$$\varphi_i(p_i) = 1, \varphi_i(p_j) = 0, i \neq j.$$

Нехай деяка функція  $\psi_j(x)$ ,  $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3)$ ,  $\psi \in H$  приймається у вузлах  $p_i$ ,  $i = 1, s$  елементу  $k$  значення  $\psi_j(p_i)$ . Деяку функцію  $\psi_j$  за її вузловим значенням за допомогою функції форми  $\varphi_j(x)$ :

$$\psi_j(x) \approx \psi_{jh}(x) = \sum \psi_j(p_i) \varphi_i(x), x \in T. \quad (4.2)$$

Перейменуємо у деякому порядку всі вузли й позначимо їх сукупність через  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_S\}$ . Виокремивши функції  $\psi_{jh}(x)$  для всіх кінцевих елементів  $k \in T$ , аналогічно (4.2), наближене рішення  $\psi_h$  розглянутої задачі будемо шукати у вигляді:

$$\psi_{jh}(x) = \sum \psi_j(p_i) \varphi_i(x), j = 1, 2, 3. \quad (4.3)$$

Тим самим проводиться апроксимація простору рішень  $H$  підпростором  $H_h$  функцій вигляду (4.3). Якщо  $H_h \subset H$ , то апроксимацію називають внутрішньою, а якщо  $H_h \not\subset H$ , то зовнішньою; далі будемо

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Таким чином будемо розглядати кінцевомірну варіаційну задачу

$$\inf J(\Psi_h) \quad (4.4)$$

Враховуючи спосіб побудови множини  $V_h$  можна зробити висновок, що до задачі (4.4) повністю застосовуються результати теорії про існування і однозначність рішення.

Оскільки функції форми вважаються заданими, то всі функції  $\Psi_h$  визначаються фактичними властивостями вузловими значеннями, а функціонал  $J(\Psi_h)$  є по суті функцією  $J_h(u_i)$  багатьох змінних:

$$u_i = (\Psi_{1h}(p_i), \Psi_{2h}(p_1), \Psi_{3h}(p_1), \dots, \Psi_{3h}(p_s)).$$

Із урахуванням отриманих законів розподілу функцій по елементу, виконав необхідне інтегрування за об'ємом і поверхністю кінцевого елемента значення функції  $J(\Psi_h)$  для окремого елемента можна привести до вигляду:

$$\Delta J = 1/2 \{u_i\}^T [k] \{u_i\}^T \{r_i\} \quad (4.5)$$

де  $[k]$  – матриця жорсткості кінцевого елемента у місцевій системі координат;  $\{r_i\}$  – відповідний вектор вузлових сил.

При складанні конструкції із окремих кінцевих елементів необхідна спільність їх переміщень та кутів повороту описується у загальних вузлах відображенням вектору загальних переміщень  $\{u_i\}$  із системи координат кінцевого елемента  $k$ , у глобальну систему координат  $D$  із застосуванням матриці направляючих косинусів  $[\xi]$

$$\{u_i\} = [\xi] \{U_i\}$$

де  $\{U_i\}$  – вектор вузлових переміщень в глобальній системі координат.

Відповідні перетворення матриці жорсткості елемента  $[k]$  та вектору вузлових сил  $\{r_i\}$  мають вигляд

$$[K] = [\xi]^T [k] [\xi]$$

$$\{R\} = [\xi]^T \{r_i\} \quad (4.6)$$

де  $[K]$  і  $\{R\}$  – матриця жорсткості і вектор вузлових сил в глобальній системі координат. Потрібно підмітити, що матриця  $[K]$  є симетричною та додатньо напіввизначеною.

Повне значення функціоналу  $J$  для всієї конструкції отримується в результаті суперпозиції матриць жорсткості та вектору вузлових сил, а також виключення степенів свободи відповідних заданим граничним умовам

$$J(\Psi) = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\} - \{U\}^T \{R\}. \quad (4.7)$$

Умова стаціонарності функціоналу (4.7) призводить до системи алгебраїчних рівнянь відносно вузлових переміщень області  $D$

$$\Delta J(\Psi) = [K] \{U\} - \{R\} = 0. \quad (4.8)$$

Таким чином вирішення крайового завдання на етапі навантаження зводиться до послідовного вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь (4.8) із поточнюванням у кожному наближенні векторами загальних вузлових сил  $\{R\}$  за рахунок пластичних деформацій в матеріалі конструкції.

Рішення задачі дозволило отримати результати наведені на рисунках 3 – 6 у вигляді ізотерм у площині  $x - y$ , та у вигляді графіків температур.

На рисунках 4.3 й 4.4 представлені результатів розрахунків температурних полів при різних кутах за передньою поверхнею різця ( $0^\circ$  та  $20^\circ$  відповідно) та за однакових умов різання ( $t = 0,6$  мм;  $S = 0,6$  мм/об;  $V = 2,5$  м/с).

На рисунках 4.5 та 4.6 представлені розподіли температур по передній та задній поверхні різця та по поверхням контакту різця зі стружкою і деталлю.

Середні температури по передній та задній поверхням у межах зони різання корелюються із середніми температурами що отримані розрахунками за методикою Резнікова. Так за умов  $t_p = 0,6$  мм;  $S = 0,6$  мм/об;  $V = 2,5$  м/с;  $\gamma = 0^\circ$  середні температури отримані методом кінцевих елементів складають  $t_{1cp}$

= 840°C,  $t_{2cp} = 850^\circ\text{C}$ . Ці значення відрізняються від експериментальних результатів на 10÷10% .

Максимальні температури отримані за допомогою методу кінцевих елементів відповідають вершині ріжучої пластини, або наближені до неї, що

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.

## 4.2 Керування тепловими процесами в технологічній системі

Температура суттєво впливає на технологію механічної обробки металів.

В конкретних умовах виробництва температура процесу часто стає фактором що перешкоджає підвищенню продуктивності операцій та зниженню собівартості продукції. Тому важливо встановити оптимальні значення температур для різних видів та умов обробки і шукати можливості для їх досягнення.

За допомогою теплового аналізу можливо вирішувати два основних типи практичних задач: пояснити та спрогнозувати фізичні явища що виникають при механічній обробці матеріалів; відшукати та оцінити способи керування термічним режимом процесу механічної обробки із ціллю підвищення ефективності технологічних операцій та якості виробів. Якщо на основі умов обробки задано значення оптимальної температури, то виникає питання про можливість керування термічним режимом процесу механічної обробки.

Ціль регулювання термічного режиму може бути загальна зміна температури зони обробки (зниження або підвищення) чи зміна температури окремих ділянок поверхні інструменту чи деталі, які називають направленою зміною температури. Направлена зміна температури необхідна для захисту від надмірного нагрівання найбільш зношуваних ділянок робочої поверхні інструменту, або для зниження термічних деформацій тих ділянок інструменту що найбільше впливають на точність обробки.

Змінюючи форму та геометричні параметри робочої частини інструменту можна також впливати на теплоутворення в зоні механічної обробки, а також на інтенсивність та напрямок потоків що забезпечують відведення тепла через інструмент.

Розглянемо питання про передній кут лезових інструментів. Відомо що передній кут  $\gamma$ , точніше кут різання  $\delta = 90^\circ - \gamma$ , суттєво впливає на сили  $P_z$ ,

$P_y$  и  $P_x$  та відповідно на інтенсивність джерел теплоутворення в зоні різання. При збільшенні  $\gamma$  – сили різання, зазвичай, зменшуються. Знижується інтенсивність теплових джерел еквівалентних роботі тертя передньою поверхнею інструменту. Оскільки кут  $\gamma$  впливає на утворення стружки  $l_1$  контакту по передній поверхні, інтенсивність джерел  $q_d$  та  $q_{1T}$  змінюється не прямо пропорційно куту різання  $\delta$ , навіть якщо між силою  $P_z$  та кутом  $\delta$  є майже пряма пропорційність.

З іншої сторони, передній кут інструменту впливає на здатність відводу тепла від зони різання. При збільшенні  $\gamma$  та заданого значення заднього кута, кут загострення інструменту  $\beta$  зменшується. Це сповільнює відвід тепла в туло інструменту, але одночасно й полегшує перехід тепла від площі контакту на задній його поверхні далі в тіло оброблюваної деталі.

Різний вплив  $\gamma$  на теплообмін та теплоутворення призводить до того, що в окремих випадках є можливість встановити значення переднього кута відповідно до оптимальної температури  $\theta^*$ . При цьому теплофізичні розрахунки не вичерпують всіх вимог до оптимізації переднього кута інструменту, оскільки вони не стосуються проблем міцності ріжучого клину, шорсткості оброблюваної поверхні та інших важливих умов, необхідних для задоволення технічних вимог до операції. Проте, якщо інші вимоги задовольняються, то завжди потрібно прагнути досягти оптимального значення  $\gamma$  отриманого на основі теплофізичних розрахунків.

Режими різання прямо впливають на температуру що виникає в зоні металообробки, а швидкість різання – на утворення стружки, сили різання, та відповідно, на температуру різання. Із зменшенням швидкості різання – температура різання знижується спочатку швидко, потім повільніше, тому що неоднозначно змінюється у часі сама температура деформації, та нерівномірно – інтенсивність теплоутворення.

При обробці металів на надвисокій швидкості різання, температура різання досягає температури плавлення металу. Як і на звичайній швидкості, при надшвидкісному різанні на початку обробки спостерігається процес

невстановленого різання, при якому температура різання зростає, а потім стабілізується. Фізично це можливо в тому випадку, коли встановлене значення температури різання близько чи дорівнює температурі плавлення оброблюваного металу, що вказує на неможливість використання надвисокої швидкості в умовах безперервного різання.

Зменшити температуру різання можливо при уривистому режимі різання. Обмежуючи час одиничного контакту інструменту із заготовкою на ділянці невідновленого режиму різання.

Для обробки на надвисокій швидкості різання (100...300) можна застосовувати короткочасну дію високої температури на ріжучий інструмент при правильному підборі періодизації уривистого процесу різання, що забезпечують прийнятний темп зношення ріжучого інструменту.

Види обробки із змінними умовами різання з точки зору теплофізичного аналізу можна розділити на два основних типи:

- Дискретна зміна у часі умов різання (зміна швидкості, товщі зрізу, геометрії інструменту).
- Непреривна зміна одного чи декількох елементів режиму різання у часі по якомусь закону.

У процесі різання металів необхідно також забезпечити ефективне охолодження ріжучого інструменту та деталі.

У сучасному виробництві застосовують різноманітні технологічні середовища: ЗОР (Засіб Охолодження Рідкий), тверді змазки, розплави поверхньо-активних металів.

Охолоджуючі властивості ЗОР значно впливають на режими обробки й стійкість інструменту, зниження температурних деформацій у процесі різання та підвищують точність обробки. Сильне нагрівання дорізьової сторони стружки відносно її зовнішньої поверхні що охолоджується ЗОР викликає додаткові завивання стружки, оскільки збільшується її довжина на дорізьовій стороні.

ЗОР знижує температуру різання при лезовій обробці із швидкістю до 150 м/хв, а при більш високій швидкості тільки стабілізує температуру оброблюваної заготовки. Зниження температури інструменту і деталі в процесі різання підвищує точність обробки за рахунок зменшення температурних деформацій.

Теплообмін із ЗОР зменшує радіус завивання стружки, оскільки призводить до різних теплових подовжень зовнішньої та дорізцевої сторін стружки. Інтенсивне охолодження оброблюваної деталі дозволяє запобігти зварювання стружки та інструменту, що забезпечує зниження сил тертя.

Зниження температур різання із застосуванням ЗОР досягається за рахунок активного тепловідведення із незайнятих стружкою поверхонь інструменту, дотичних до зони різання. Збільшення інтенсивності відводу тепла від стружки дає менший вплив на температуру в зоні різання через короткочасність контакту стружки та інструменту.

Інтенсивність охолодження зростає при застосуванні розпилення рідини, що подається в зону обробки під тиском 0,2...0,4 Мпа. Швидкість потоку розпилення рідини складає декілька сотень метрів на секунду. Найменші частки рідини мають охолоджуючий ефект за рахунок не тільки теплообміну, але і через випаровування. Тому розпилення потоку рідини рекомендується застосовувати при обробці важкооброблюваних металів, а також у тих випадках, коли потрібен постійний нагляд за ділянками обробки.

### 4.3 Висновки

Проаналізовано математичну модель розподілу теплових потоків у зоні різання з використанням методу кінцевих елементів. Встановлено кореляцію між геометричними параметрами інструменту, режимами різання та температурними полями у зоні обробки. Визначено оптимальні значення переднього кута інструменту для мінімізації температурних деформацій.

Наукова новизна:

– отримано за допомогою методу кінцевих елементів детальний розподіл температурних полів у площині  $x$ – $y$  для різних геометричних параметрів інструменту та режимів різання;

– встановлено взаємозв'язок між формою інструменту, інтенсивністю теплоутворення та напрямком теплових потоків, що дозволяє прогнозувати знос інструменту та точність обробки.