

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 Дубяги Іллі Олеговича  
(ІПБ)

академічної групи 131М-23Н-1  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код 1 назва спеціальності)

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

на тему Оптимізація параметрів режимів різання механічної обробки  
деталі «Вал»

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Дербаба В.А.			
розділів				
Аналітичний	Дербаба В.А.			
Технологічний	Дербаба В.А.			
Спеціальний	Дербаба В.А.			
Науково- дослідницький	Дербаба В.А.			

Рецензент				
-----------	--	--	--	--

Нормоконтролер	Рубан В.М.			
----------------	------------	--	--	--

Дніпро  
2025

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
**Технологій машинобудування та матеріалознавства**  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ **В.А. Дербаб** \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали та прізвище)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти \_\_\_\_\_ **Дубягі І.О.** \_\_\_\_\_ академічної групи \_\_\_\_\_ **131М-23н-1** \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності \_\_\_\_\_ **131 Прикладна механіка** \_\_\_\_\_

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

на тему \_\_\_\_\_ **Оптимізація параметрів режимів різання механічної обробки** \_\_\_\_\_  
деталі «Вал» \_\_\_\_\_

**1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

Об'єкт досліджень – процес точіння зовнішньої поверхні деталі «Вал»

Предмет досліджень – параметри режимів різання при точінні зовнішньої поверхні деталі «Вал» довжиною 300 мм та діаметром 100 мм

Мета – підвищення ефективності процесу точіння за рахунок визначення оптимальних режимів різання

Вихідні дані для проведення роботи – кресленик деталі «Вал», дані про матеріал деталі, характеристики верстатів та різального інструменту, теоретичні та довідкові дані з оптимізації процесів різання

**3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ**

Новизна – встановлення оптимальних режимів різання при точінні деталі, вплив товщини різальної пластини на режими різання

Практична цінність – розробка методики визначення оптимальних параметрів режимів різання для умов серійного виробництва, зниження витрат на обробку, підвищення продуктивності

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Достовірність математичної моделі оптимізації режимів різання, актуальність та відповідність обмеженням верстатного обладнання, використання сучасних програмних засобів моделювання

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналітичний розділ: аналіз технологічності конструкції деталі	03.02.25-17.02.25
Технологічний розділ: проєкт технології обробки деталі	18.02.25-03.03.25
Спеціальний розділ: розробка верстатного пристрою	04.03.25-17.03.25
Науково-дослідницький розділ: оптимізація режимів різання при точінні	18.03.25-05.05.25

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект – оптимізація виробничого циклу виготовлення деталі, зниження витрат на обробку за рахунок оптимізації режимів

Соціальний ефект – поліпшення умов праці за рахунок зменшення часу роботи, впровадження сучасних методів оптимізації, поліпшення якості продукції

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Забезпечення відповідності технологічного процесу стандартам ДСТУ, ISO, використання верстатів з ЧПК, використання математичного моделювання

Завдання видано \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

**В.А. Дербабя**  
(ініціали та прізвище)

Дата видачі **03.02.2025**

Дата подання до екзаменаційної комісії **09.05.2025**

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис здобувача)

**І.О. Дубяга**  
(ініціали та прізвище)

## Реферат

Пояснювальна записка: 58 с., 12 рис., 16 табл., 5 додатків, 22 джерела.

Тема роботи: Оптимізація параметрів режимів різання механічної обробки деталі «Вал».

Оптимізація та пошук оптимальних режимів різання матеріалів на верстатах із числовим програмним керуванням є важливими завданнями в галузі металообробки. Вирішення цих завдань має багато переваг, пов'язаних із підвищенням продуктивності виготовлення деталей, економією ресурсів, забезпеченням високої якості обробки та ін. Тому визначення оптимальних режимів різання при механічній обробці деталі «Вал» має актуальне наукове та практичне значення.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу точіння за рахунок визначення оптимальних режимів різання.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

- 1) аналіз джерел інформації з питань моделювання та оптимізації параметрів режимів різання;
- 2) створення та дослідження математичної моделі режиму точіння поверхні валу;
- 3) визначення оптимальних параметрів режимів різання.

Об'єкт дослідження – процес точіння зовнішньої поверхні деталі «Вал».

Предмет дослідження – параметри режимів різання при точінні зовнішньої поверхні деталі «Вал» довжиною 300 мм та діаметром 100 мм.

Методика досліджень – методи проведення досліджень базувалися на основах оптимізації процесів різання, теорії різання та різального інструменту.

Результат роботи – створення та дослідження математичної моделі для визначення оптимальних режимів різання (частоти обертів шпинделя та

подачі) при точінні зовнішньої поверхні деталі «Вал». Проведено розрахунки оптимальних режимів різання для різальних пластин товщиною  $Ct = 2,38$ ;  $4,76$  та  $6,35$  мм для отримання заданої шорсткості поверхні.

Наукова новизна:

– встановлено, що при точінні поверхні валу довжиною 300 мм та діаметром 100 мм різальною пластиною товщиною  $Ct = 4,76$  мм для отримання шорсткості поверхні  $Ra = 3,2$  мкм, оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделя становлять  $S = 0,12$  мм/об та  $n = 651,42$  об/хв.

– обґрунтовано, що при точінні поверхні валу довжиною 300 мм та діаметром 100 мм використання різальної пластини товщиною  $Ct = 2,38$  мм дозволяє отримати шорсткість поверхні з  $Ra = 50$  мкм до  $Ra = 6,3$  мкм при оптимальних значеннях подачі  $S = 0,17$  мм/об та частоти обертів шпинделя  $n = 437,14$  об/хв.

Практична цінність роботи полягає в розробці методики визначення оптимальних параметрів режимів різання при точінні зовнішньої поверхні деталі «Вал» з використанням різальних пластин різної товщини.

В аналітичному розділі на підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу визначено, що деталь «Вал» – технологічна.

В технологічному розділі проведено вибір і обґрунтування методу отримання заготовки, розраховано припуски на механічну обробку, розроблено маршрут обробки деталі, режими різання та норми часу.

В спеціальному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового пазу. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

В науково-дослідницькому розділі розглянуто оптимізацію режимів різання при точінні поверхні валу. Розроблена математична модель для визначення оптимальних значень частоти обертів шпинделя та подачі. Для полегшення проведення математичних обчислень використано пакет MathCad.

Проведено розрахунки оптимальних режимів різання при точінні поверхні валу, побудовані графіки залежностей подачі, обертів шпинделю та швидкості різання від заданої шорсткості поверхні. Досліджено вплив товщини різальної пластини на оптимальні режими різання.

Ключові слова: механічна обробка, вал, моделювання, оптимізація, математична модель, режими різання, точіння.

## ЗМІСТ

Вступ	8
1 Аналітичний розділ	9
1.1 Характеристика об'єкту виробництва	9
1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі	11
1.3 Висновки	14
2 Технологічний розділ	15
2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей	15
2.2 Вибір і обґрунтування методу отримання заготовки	16
2.3 Розробка маршруту виготовлення деталі	20
2.4 Розрахунок міжопераційних припусків і допусків	22
2.5 Маршрут обробки деталі, режими різання, норми часу	27
2.6 Висновки	35
3 Спеціальний розділ	36
3.1 Конструкція пристосування	36
3.2 Розрахунок пристосування	36
3.3 Висновки	39
4 Науково-дослідницький розділ	40
4.1 Постановка задачі дослідження	40
4.2 Оптимізація режимів різання при точінні	42
4.3 Висновки	55
5 Загальні висновки	56
6 Перелік посилань	57
ДОДАТОК А (Кресленики)	59
ДОДАТОК Б (Маршрутна карта)	64
ДОДАТОК В (Програма MathCad)	68
ДОДАТОК Г (Специфікація)	71
ДОДАТОК Д (Відгук, рецензія)	73

## Вступ

Машинобудівна галузь є важливим елементом сучасної промисловості, яка визначає напрямки розвитку національної економіки. Одним із ключових завдань у цій галузі є виробництво валів – деталей, що мають стратегічне значення для створення рухомих механізмів і передач руху у різних типах машин.

Вали є основними елементами будь-якої кінематичної ланки, оскільки вони передають крутильний момент, забезпечуючи рух інших деталей механізму. Ці деталі характеризуються високими вимогами до точності обробки, міцності та стійкості до зносу під час експлуатації. Тому вибір матеріалу та технологічного методу виготовлення валів є однією з найважливіших задач у машинобудуванні

Для виготовлення валів найчастіше використовують вуглецеві сталі, які володіють високою міцністю, пластичністю та стійкістю до механічних змін. У разі необхідності збільшення стійкості до зносу чи термічних навантажень застосовують леговані сталі. Для деяких спеціальних застосувань, таких як автомобільні та авіаційні вали, можуть використовуватися легкі сплави, що дозволяють зменшити масу конструкції без втрати її якості.

У цій роботі представлено розробку технологічного процесу та оптимізацію параметрів режимів різання при виготовленні деталі «Вал».

## 1 Аналітичний розділ

### 1.1 Характеристика об'єкту виробництва

Деталь «Вал» входить до виробу «Редуктор комбайна». Деталь виготовляється у серійному виробництві, програма випуску  $N = 7500$  шт/рік. В процесі роботи вона витримує напруження кручення та гнуття. В конструкції деталі передбачено дві зовнішні поверхні 7-го квалітету точності, дві поверхні 9-го квалітету точності, циліндричні і конусні поверхні за 12 квалітетом точності, шпонковий паз, отвір та інші поверхні за 14 квалітетом точності.

Згідно креслення матеріал деталі – сталь 45 ДСТУ 7809:2015 [1].

Замінник: 40Х, 50, 50Г2.

Класифікація: сталь конструкційна вуглецева якісна.

Застосування: вал-шестерні, колінчасті та розподільні вали, шестірні, шпинделі, бандажі, циліндри, кулачки та інші нормалізовані деталі, що поліпшуються і піддаються поверхневій термообробці, від яких потрібна підвищена міцність [2, 3].

Зварюваність: важкозварювана.

Флокеночутливість: малочутлива.

Схильність до відпускнуї крихкості: не схильна.

Хімічний склад сталі 45 приведений в таблиці 1.1, в таблиці 1.2 – механічні властивості [2, 3].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 45

Елементи	Вміст елементів, %
Вуглець (C)	0,42-0,5
Кремній (Si)	0,17-0,37
Марганець (Mn)	0,5-0,8
Нікель (Ni)	до 0,25
Сірка (S)	до 0,035
Фосфор (P)	до 0,035
Хром (Cr)	до 0,25
Мідь (Cu)	до 0,25
Залізо (Fe)	~97

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 45

Характеристика	Значення
Межа міцності при розтягу ( $\sigma_B$ ), МПа	600-750
Межа текучості ( $\sigma_T$ ), МПа	355
Відносне подовження ( $\delta_5$ ), %	16
Ударна в'язкість (КСУ), Дж/см <sup>2</sup>	59
Твердість за Брінеллем (НВ), НВ	207-255
Твердість за Роквеллом (HRC), коли сталь загартована	28-32

## 1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі

Оцінка конструкції деталі на технологічність буває двох видів: якісна та кількісна.

Якісна оцінка виконується суб'єктивно, самим технологом на підставі досвіду виробництва і полягає: чи зручно з технічної точки зору досягати задану конструктором форму деталі, забезпечити точність та якість обробки; чи можлива обробка заданої деталі на стандартному устаткуванні, стандартним різальним інструментом, чи доступне його підведення та нормальна умова обробки [4, 5].

Робоче креслення деталі «Вал» виконано на форматі А2 у відповідності до ДСТУ 3321:2003 та має всі необхідні підписи. Креслення наведено головним видом із місцевими розрізами та виносними елементами. Таке зображення дає повне уявлення про конструкцію деталі і визначає конфігурацію деталі. На кресленні проставлені усі необхідні розміри, які визначають геометричні параметри елементів деталі, граничні відхилення та квалітети точності з полями допусків.

На кресленні є всі необхідні дані про матеріал і масу деталі, які наведені у відповідних графах.

Проста конструкція деталі дозволяє застосовувати високопродуктивні методи обробки і верстати з ЧПК. В процесі обробки деталі є можливість витримувати правило суміщення технологічних та вимірювальних баз.

Призначені граничні відхилення розмірів та параметри шорсткості відповідають одне одному і не є завищеними, та знаходяться в межах геометричних похибок металорізальних верстатів нормальної точності.

Зміна заданих на кресленні розмірів не є доцільною, так як при контрольному вимірюванні виникає потреба застосування додаткового вимірювального інструменту.

Конструкція деталі не передбачає необхідності додаткових технологічних операцій (рисунок 1.1).

За якісною оцінкою деталь «Вал» технологічна.

При кількісній оцінці визначаємо наступні коефіцієнти:

- 1) коефіцієнт точності;
- 2) коефіцієнт шорсткості.

В таблиці 1.4 приведені характеристики поверхонь деталі «Вал».

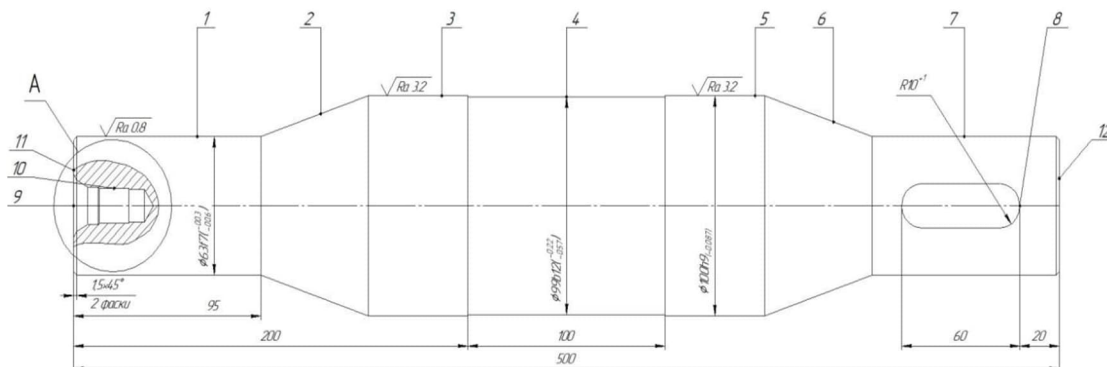


Рисунок 1.1 – Ескіз деталі «Вал»

Таблиця 1.3 – Характеристика поверхонь деталі «Вал»

№ поверхні	Кількість поверхонь	Найменування	Розмір, мм	Квалітет	Допуск, мм	Шорсткість Ra
11, 12	2	Торці деталі	500	H14	11,5	12,5
1, 7	2	Зовнішня поверхня	Ø63	f7	0,03	0,8
2, 6	2	Зовнішня конусна поверхня	Ø63, 100	h14	2,2	12,5
3, 5	2	Зовнішня поверхня	Ø100	h9	2,2	3,2
4	1	Зовнішня поверхня	Ø99	b12	0,35	12,5
8	1	Паз	60; Ø10	h14	0,065	6,3
9	1	Центрувальний отвір	16	H14		6,3
10	1	Різьба	M16-7H	H14		6,3

1) Визначаємо коефіцієнт точності.

Деталь вважається технологічною за точністю, якщо виконується

умова:

$$K_T = 1 - \frac{1}{T_{\text{ср}}} \geq 0,8,$$

де  $T_{\text{ср}}$  – середній квалітет розмірів деталі.

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де  $n_i$  – кількість розмірів кожного квалітету.

$$T_{\text{ср}} = \frac{7 \cdot 2 + 9 \cdot 2 + 12 \cdot 1 + 14 \cdot 7}{12} = 11,83$$

$$K_T = 1 - \frac{1}{11,83} = 0,92 > 0,8$$

$0,92 > 0,8$  – за показником точності деталь технологічна.

2) Визначаємо коефіцієнт шорсткості

Деталь вважається технологічною за шорсткістю, якщо виконується

умова:

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{\text{Ш}_{\text{ср}}} \leq 0,32,$$

де  $\text{Ш}_{\text{ср}}$  – середня шорсткість.

$$\text{Ш}_{\text{ср}} = \frac{\sum \text{Ш}_{\text{ср}} \cdot n_i}{\sum n_i}$$

$$\text{Ш}_{\text{ср}} = \frac{12,5 \cdot 5 + 6,3 \cdot 3 + 3,2 \cdot 2 + 0,8 \cdot 2}{12} = 7,45$$

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{7,45} = 0,13 < 0,32$$

$0,13 < 0,32$  – за показником шорсткості деталь технологічна.

За кількісною оцінкою деталь «Вал» технологічна.

### 1.3 Висновки

На підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу робимо висновок, що деталь «Вал» – технологічна.

## 2 Технологічний розділ

### 2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей

Програма випуску деталей встановлена в завданні і складає  $N = 7500$  шт/рік. Задана програма визначається за даною кількістю випуску готових виробів на рік при визначній кількості змін на добу і встановленою тривалістю змін [4, 5].

Детальна програма виробів визначається за формулою:

$$N = N_p \cdot m \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right),$$

де  $N_p = 7500$  – кількість виробів виготовлених на рік, шт.;

$m = 1$  – кількість деталей на одну машину, шт.;

$h = 2$  – відсоток деталей запасних частин, %.

$$N = 7500 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right) = 7650 \text{ шт.}$$

Такт виробництва визначимо за формулою:

$$t_B = \frac{60 \cdot \Phi_D}{N},$$

де  $\Phi_D = 2080$  - річний фонд роботи обладнання, годин.

$$t_B = \frac{60 \cdot 2080}{7650} = 16,9 \text{ хв.}$$

Розмір партії визначимо за формулою:

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

де  $N = 7650$  – річна програма випуску, шт.;

$a = 5$  – періодичність запуску деталей у виробництво, днів;

$\Phi = 260$  – число робочих днів у році.

$$n = \frac{7650 \cdot 5}{260} = 145 \text{ шт.}$$

## 2.2 Вибір і обґрунтування методу отримання заготовки

Спосіб отримання заготовок визначається призначенням і конструкцією деталі, матеріалом, технічними вимогами, масштабом і серійністю випуску, а також економічністю виготовлення [6, 7. 8].

Вибір заготовки визначимо на базі зіставлення варіантів: перший варіант – прокат, а інший варіант – штампування.

Перший варіант – прокат.

1. Визначення діаметру прокату (до найбільшого діаметру деталі додаємо загальний припуск на механічну обробку  $2 Z_{od}$ ):

$$D_{пр} = d_{max} + Z_{od},$$

$$D_{пр} = 100 + 5 = 105 \text{ мм},$$

де  $d_{max} = 100$  мм – найбільший діаметр деталі в мм;

$Z_{od} = 5$  мм – припуск на діаметр в мм.

Приймаємо прокат діаметром  $D_{пр} = 105$  мм.

Визначаємо допуск прокату:

$$D_{пр} = 100 + 5 = 105 \text{ мм}.$$

Визначення довжини заготовки:

$$L_{пр} = L_{общ.д.} + Z_{oL},$$

$$L_{пр} = 500 + 5 = 505 \text{ мм},$$

де  $L_{пр}$  - довжина заготовки з прокату, мм;

$L_{общ.д.} = 500$  мм (по кресленню) - загальна довжина деталі, мм;

$Z_{oL} = 5$  мм - припуск на обробку торців, мм.

Маса заготовки:

$$m_{\text{заг}} = V \cdot \rho = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho$$

$$m_{\text{заг}} = 3,14 \cdot 52,5^2 \cdot 505 \cdot 7,86 \cdot 10^{-6} = 34,3 \text{ кг},$$

де  $\rho = 7,86 \text{ кг/мм}^2$  – питома вага сталі.

Діаметр прокату – 105 мм;

Довжина штучної заготовки – 505 мм;

Маса заготовки – 34,3 кг.

Ескіз заготовки з прокату приведено на рисунку 2.1.

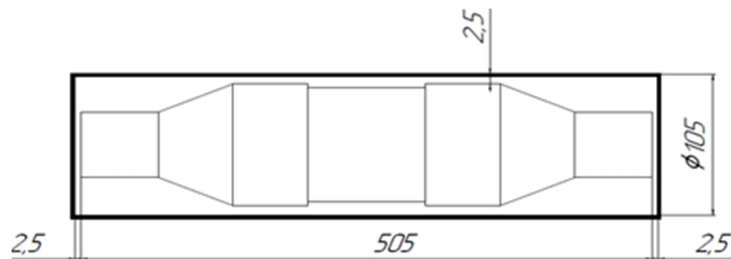


Рисунок 2.1 – Ескіз заготовки з прокату

Коефіцієнт використання матеріалу заготовки:

$$КВМ_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{зпр}}},$$

де  $M_{\text{д}} = 21,19$  – маса деталі, кг;

$M_{\text{зпр}} = 4,5$  – маса заготовки, кг.

$$КВМ_{\text{пр}} = \frac{21,19}{34,3} = 0,62.$$

Другий варіант – штампування.

Конструктивні характеристики поковки

1) Встановлення точності поковки

При виготовленні поковки на кривошипних гаряче штампувальних

пресах в закритих штампах встановлюємо точність поковки - Т2.

2) Встановлення групи стали

Для сталі 45 встановлюємо групу сталі - М2.

3) Ступінь складності

Ступінь складності визначають шляхом розрахунку відношення маси  $G_{\text{п}}$  поковки до маси  $G_{\text{ф}}$  геометричної фігури, в яку вписується форма поковки. При розрахунку відношення  $G_{\text{п}}/G_{\text{ф}}$  приймають ту з геометричних фігур, маса якої найменша.

Ступінь складності поковок відповідає наступним числовим значенням відношення  $G_{\text{п}}/G_{\text{ф}}$ :

С1 - більше 0,63;

С2 - більше 0,32 до 0,63 включ.;

С3 - більше 0,16 до 0,32 включ.;

С4 - більше 0,16. (для поковок з тонкими елементами, наприклад у вигляді диска, кільця та ін.)

Для деталі «Вал» геометричною фігурою, в яку вписується форма поковки, є циліндр діаметром 105 мм і довжиною 510 мм, маса якого дорівнює:

$$G_{\text{ф}} = 0,001 \cdot m_{1\text{пм}} \cdot L_{\text{д}}$$

$$G_{\text{ф}} = 0,001 \cdot 61,65 \cdot 500 = 30,825 \text{ кг}$$

Орієнтована розрахункова маса поковки:

$$G_{\text{п}} = k_{\text{р}} \cdot m_{\text{д}}$$

$$G_{\text{п}} = 1,5 \cdot 21,19 = 31,79 \text{ кг}$$

де  $k_{\text{р}} = 1,5$  – коефіцієнт для визначення орієнтованої розрахункової маси поковки

$$G_{\text{п}} / G_{\text{ф}} = 31,79 / 30,825 = 1,031$$

це відповідає ступеню С2.

4) Конфігурація поверхні роз'єму штампу – П (плоска).

5) Вихідний індекс – 11.

При виготовленні поковки на кривошипних гаряче штампувальних пресах в закритих штампах встановлюємо припуски на обробку зовнішніх поверхонь деталі та розміри штампованої заготовки. Для цього визначаємо методи обробки поверхонь деталі. Допуски на розміри приймаємо по таблиці (індекс 9).

Дані приведені у таблиці 2.1. Ескіз заготовки, яка отримується штампуванням, приведено на рисунку 2.2.

Таблиця 2.1 – Допуски, припуски та розміри заготовки

Розмір поверхні (D, L)	Точність	Шорсткість	Методи обробки	Припуск мм	Допуск мм	Розміри заготовки мм
100 (D1)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,2×2=4,4 5	+1,4 -0,8	D1+2Zo 100+5=105
85(D2)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,0×2=4 4	+1,3 -0,7	D1+2Zo 85+4=89
63(D3)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,0×2=4 4	-1,3 -0,7	D1+2Zo 63+4=67
201,2(L1)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,5×2=5 5	+1,6 -0,9	L1+2Zo 206,2
95(L2)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,2×2=4,4 5	+1,3 -0,7	L2+2Zo 97,5
500(L3)	h12	Ra 10	Точіння одноразове Приймаємо	2,5×2=5 5	+1,6 -0,9	L1+2Zo 505

б) Визначення маси штампованої заготовки:

$$m_{\text{ШТ}} = 0,001 \cdot (Ld1 \cdot m_{1M} + Ld2 \cdot m_{1M} + Ld3 \cdot m_{1M} + Ld4 \cdot m_{1M})$$

$$m_{\text{ШТ}} = 0,001 \cdot (206,2 \cdot 67,97 + 113,8 \cdot 48,84 + 195 \cdot 27,68) = 24,97 \text{ кг}$$

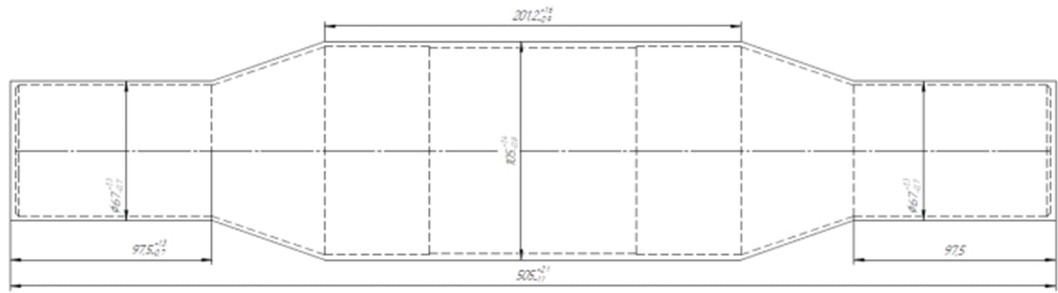


Рисунок 2.2 – Ескіз заготовки, яка отримується штампуванням

7) Визначення коефіцієнта використання матеріалу заготовки:

Коефіцієнт використання матеріалу заготовки:

$$КВМ_{\text{пок}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{зпок}}}$$

де  $M_{\text{д}} = 21,19$  – маса деталі, кг;

$M_{\text{зпок}} = 24,97$  – маса заготовки, кг.

$$КВМ_{\text{пок}} = \frac{21,19}{24,97} = 0,85.$$

$КВМ_{\text{пок}} > КВМ_{\text{пр}} (0,85 > 0,62)$

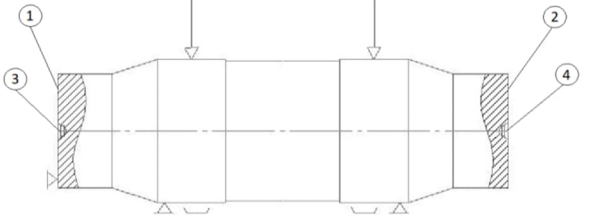
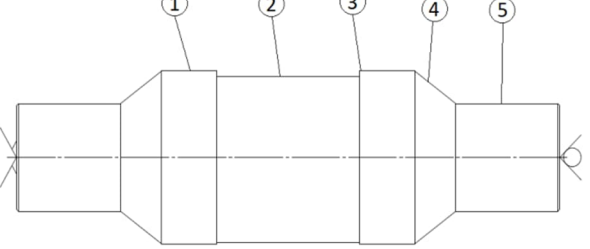
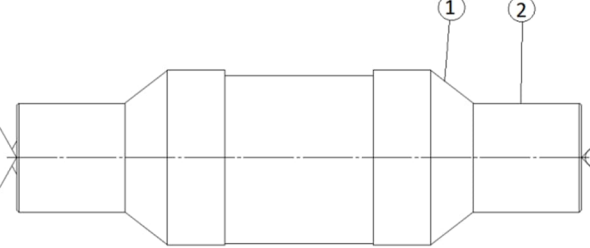
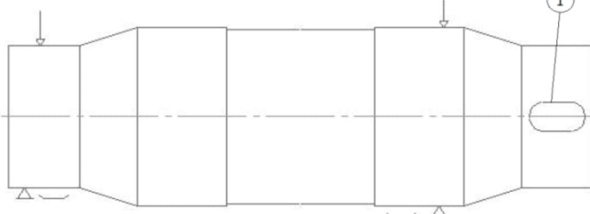
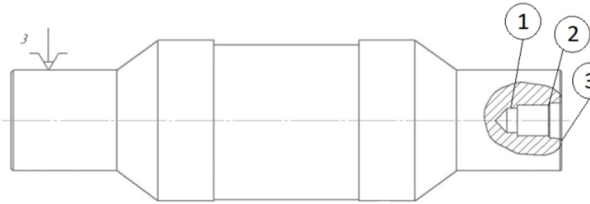
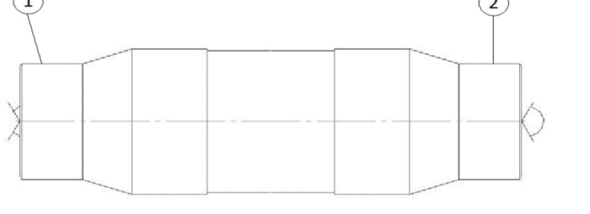
Таким чином, для даного «Вала» в якості заготовки доцільно прийняти штамповану заготовку.

### 2.3 Розробка маршруту виготовлення деталі

Маршрут обробки деталізначається у залежності від типу виробництва та точності поверхонь. Деталь «Вал» виготовляється в умовах серійного виробництва, в якому застосовується, як універсальне обладнання так і обладнання з ЧПК. Для виготовлення даної деталі заданої точності та для забезпечення технологічних вимог необхідно в технологічному процесі витримувати єдність та сумісність баз [4, 5].

Розроблений технологічний процес виготовлення деталі «Вал» представлений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технологічний маршрут механічної обробки деталі «Вал»

Номер та найменування операції	Зміст операції	Схема встановлення
005 Фрезерно-центрувальна	1.Фрезерувати торці 1, 2. 2.Свердлити отвори 3, 4.	
010 Токарна з ЧПК	1. Точити поверхні 5, 4, 3, 2, 1 начорно. 2. Точити поверхні 5, 3, 1 начисто.	
015 Токарна з ЧПК	1. Точити поверхні 1, 2 начорно. 2. Точити поверхню 2 та фаску начисто.	
020 Шпонково-фрезерна	1. Фрезерувати шпонковий паз 1	
025 Токарно-гвинторізна	1. Свердлити отвір 1. 2. Зенкерувати отвір 2 та фаску 3. 3. Нарізати різьбу.	
030 Термообробка		
035 Шліфувальна	1.Шліфувати поверхні 1, 2.	
040 Мийна	Промити деталь	
045 Контрольна	Контролювати розміри деталі	

## 2.4 Розрахунок міжопераційних припусків і допусків

Припуск на обробку поверхонь деталі може бути призначений за відповідними довідковими таблицями або на основі розрахунково-аналітичного методу визначення припусків. Таблиці дають змогу призначити припуски незалежно від технологічного процесу оброблення деталі й умов його здійснення, і тому в загальному випадку є завищеними, містять резерви зниження витрат матеріалу і трудомісткості виготовлення деталі. Застосування розрахунково-аналітичного методу скорочує в середньому витрату металу в стружку, порівняно з табличними значеннями, створює єдину систему визначення припусків на обробку [5, 8].

Виконаємо розрахунок міжопераційних припусків і допусків розрахунково-аналітичним методом для циліндричної поверхні  $\varnothing 100_{-0,087}$  шорсткістю  $Ra = 3,2$  мкм.

Технологічний маршрут обробки поверхні:

Заготовка,

Точіння чорнове (h11),

Точіння чистове (h9).

Розмір припусків на обробку визначається за формулою;

$$2Z_{imin} = 2 \cdot [(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2}],$$

де  $R_z$  - висота мікронерівностей, мкм;

$h$  - глибина дефектного поверхневого шару;

$\rho$  - сумарне значення просторових відхилень для елементарних поверхонь на попередньому переході;

$\varepsilon$  - похибка установки заготівлі під час переходу.

$R_z, h$  – встановлюються для заготовки та для кожного технологічного переходу:

Заготовка Rz = 200 h = 250,

Чорнове точіння Rz = 50 h = 50,

Чистове точіння Rz = 25 h = 25.

Сума просторових відхилень:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_K^2 + \Delta_{\text{екс}}^2},$$

$\Delta_K = 1800$  мкм – допуск короблення;

$\Delta_{\text{екс}} = 1100$  мкм відхилення від концентричності.

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{1800^2 + 1100^2} = 2109 \text{ мкм.}$$

В процесі обробки відхилення постійно змінюється і визначається за допомогою коефіцієнтів:

$$\Sigma \Delta_{\text{чор}} = 2109 \cdot 0,06 = 126,54 \text{ мкм}$$

$$\Sigma \Delta_{\text{чист}} = 126,54 \cdot 0,05 = 6,33 \text{ мкм}$$

Значення менше 5 мкм не враховується.

Похибка установки:

$\epsilon_{\text{чор}} = 80$  мкм – заготовка штампована на кривошипному пресі,

$\epsilon_{\text{чист}} = 0$  мкм – з чисто оброблюваною базою  $\varnothing 80$ ).

Розмір припуску розраховується по переходах:

Чорнове точіння:

$$2Z_{\text{min}} = 2 \cdot \left( 200 + 250 + \sqrt{2019^2 + 80^2} \right) = 5121 \text{ мкм}$$

Чистове точіння:

$$2Z_{\text{min}} = 2 \cdot \left( 50 + 50 + \sqrt{126,54^2 + 0^2} \right) = 453 \text{ мкм}$$

Визначаємо розрахунковий розмір на чистове точіння, починаючи з мінімального розміру деталі:

$$d_p \text{ чист} = d_{\text{ном}} - \delta = 100 - 0,087 = 99,913 \text{ мм.}$$

На останні переходи розрахунковий розмір визначається за формулою:

$$d_p = d_{i-1} + 2Z_{\text{min}i}$$

Чорнове точіння

$$d_p \text{ чорн} = 99,913 + 0,453 = 100,366 \text{ мм}$$

Заготовка

$$d_p \text{ заг} = 100,366 + 5,121 = 105,487 \text{ мм}$$

Міжопераційні розміри.

Мінімальні граничні розміри виконується шляхом округлення розрахункового розміру:

$$d_{min\text{заг}} = 105,5 \text{ мм}$$

$$d_{min\text{чорн}} = 100,4 \text{ мм}$$

$$d_{min\text{чист}} = 99,913 \text{ мм}$$

Максимальні граничні розміри визначаються за формулою:

$$d_{max} = d_{min} + Td$$

$$Td \text{ заг} = 2200 \text{ мкм} = 2,2 \text{ мм};$$

$$Td \text{ чорн} = 220 \text{ мкм} = 0,22 \text{ мм};$$

$$Td \text{ чист} = 87 \text{ мкм} = 0,087 \text{ мм}.$$

$$d_{max\text{заг}} = 105,5 + 2,2 = 107,7 \text{ мм}$$

$$d_{max\text{чорн}} = 100,4 + 0,22 = 100,62 \text{ мм}$$

$$d_{max\text{чист}} = 99,913 + 0,087 = 100 \text{ мм}$$

Дійсні розміри припусків.

Мінімальні розміри припусків – різниця мінімальних граничних розмірів, визначаються за формулою:

$$Z_{min} = d_{min_{i-1}} - d_{min_i}$$

Чорнове

$$Z_{min} = 105,5 - 100,4 = 5,1 \text{ мм}$$

Чистове

$$2Z_{min} = 100,4 - 99,913 = 0,487 \text{ мм}$$

Перевіряємо вірність розрахунків:

$$2Z_{max} = d_{max_{i-1}} - d_{max_i}$$

Чорнове

$$2Z_{max} = 107,7 - 100,62 = 7,080 \text{ мм}$$

Чистове

$$2Z_{max} = 100,62 - 100 = 0,620 \text{ мм}$$

$$2Z_{max} - 2Z_{min} = Td_{(i-1)} - Td_i$$

Чорнове

$$7080 - 5100 = 2200 - 220 \text{ мкм}$$

Чистове

$$620 - 487 = 220 - 87$$

$$133 = 133$$

$$2Z_{max_{общ}} - 2Z_{min_{общ}} = Td_{заг} - Td_{д}$$

$$7700 - 5587 = 2200 - 87$$

Розрахунок виконано вірно.

Отриманні дані заносимо у таблицю 2.3. Розрахунок припусків приведено в таблиці 2.4.

Корегування номінальних розмірів:

Для заготовки –  $\varnothing 106_{-0,8}^{+1,4}$

Для чорнового точіння –  $\varnothing 100,62_{-0,22}$

Для чистового точіння –  $\varnothing 100_{-0,087}$

Таблиця 2.3 – Карта розрахунку припусків на обробку та граничних розмірів за технологічними переходами

Елементарна Поверхня деталі і технологічний маршрут її обробки	Квалітет	Елементи припуску, мкм				Розрахунковий припуск $2Z_{min}$ ,	Допуск $T_d$ , мкм	Розрахунковий розмір, мм	Операційні розміри		Граничні припуски, мкм	
		Rz	h	$\Delta$	$\epsilon_y$				mind	maxd	Z min	Z max
Зовнішня поверхня $\varnothing 100h9^{+1,4}_{-0,8}$												
Заготовка		200	250	2109			2200	105,487	105,5	107,7		
Точіння Чорнове	11	50	50	126,54	80	5121	220	100,366	100,4	100,62	5100	7080
Точіння Чистове								99,913	99,913	100	487	620
$\sum Z_i$											5587	7700

Таблиця 2.4 – Розрахунок припусків

Елементарна поверхня деталі і технологічний маршрут її обробки	Квалітет	Розрахунковий припуск $2Z_{min}$ , мкм	Допуск $T_d$ , мкм	Розрахунковий розмір, мм	Операційні розміри, мм		Граничні припуски, мкм	
					dmin (Lmin)	dmax (Lmax)	$2Z_{min}$	$2Z_{max}$
Зовнішня поверхня $\varnothing 63f7^{-0,3}_{-0,06}$								
Заготовка			2200	67,6	67,6	69,8		
Точіння чорнове	11	2500	220	65,1	65,1	65,32	2500	4480
Точіння чистове	9	1500	87	63,6	63,6	63,687	1500	1633
Шліфування	7	650	30	62,94	62,94	62,97	660	717
Торці 500H14 <sub>-1,55</sub>								
Заготовка		5	2500	503,45	503,45	505,95		
Фрезерування однократне	14	2×2500	1550	498,45	498,45	500	5	5,95
Зовнішня поверхня $\varnothing 100h9_{-0,087}$								
Заготовка	15	5	1,4	104,913	104,9	106,3		
Точіння чорнове	11	4	0,22	100,913	100,9	101,12	4	5,18
Точіння чистове	9	1	0,087	99,913	99,913	100	0,987	1,12

## 2.5 Маршрут обробки деталі, режими різання, норми часу

Розроблений технологічний маршрут обробки деталі «Вал» з вибором обладнання та інструменту наведено в таблиці 2.5. Характеристики верстатів – таблиці 2.6 - 2.9.

Таблиця 2.5 – Технологічний маршрут обробки деталі (обладнання та інструмент)

Номер та найменування операції	Зміст операції	Обладнання	Інструмент
1	2	3	4
005 Фрезерно-центрувальна	1.Фрезерувати торці 1, 2. 2.Свердлити отвори 3, 4.	HAAS EC-400	Фреза торцева Ø55 мм TAEGUTEC TFMBLV 763-22R-06 з пластинами BLMV 0603R-M; Свердло центрувальне Ø10 ДСТУ ISO 866:2018
010 Токарна з ЧПК	1. Точити поверхні 5, 4, 3, 2, 1 начорно. 2. Точити поверхні 5, 3, 1 начисто.	HAAS ST-25	Різець токарний TAEGUTEC TCLNR 2525 M0904-TB з пластиною CNMG 090404; Різець токарний TAEGUTEC PDJNR 2525 M15 з пластиною DNMG 150612 MT
015 Токарна з ЧПК	1. Точити поверхні 1, 2 начорно. 2. Точити поверхню 2 та фаску начисто.	HAAS ST-25	Різець токарний TAEGUTEC TCLNR 2525 M0904-TB з пластиною CNMG 090404; Різець токарний TAEGUTEC PDJNR 2525 M15 з пластиною DNMG 150612 MT
020 Шпонково-фрезерна	1. Фрезерувати шпонковий паз 1	HAAS VF-2	Фреза шпонкова Ø20 мм TAEGUTEC TSE 2200M
025 Токарно-гвинторізна	1. Свердлити отвір 1. 2. Зенкерувати отвір 2 та фаску 3. 3. Нарізати різьбу.	HAAS EC-400	Свердло Ø15 мм TAEGUTEC 3ED 150-159-20T0-3D з пластиною 3ED-150-P+; Зенкер TAEGUTEC 3P-TCF45-309-12-06; Мітчик M16 TAEGUTEC TRH554C05 MF16X1.5
030 Термообробка	Термічна обробка деталі	Термопід	
035 Шліфувальна	1.Шліфувати поверхні 1, 2.	CORMAK MW 200×750	Круг шліфувальний ПП 250x25x 32 14A 40CM ДСТУ ISO 603-5:2019
040 Мийна	Промити деталь	Мийна машина	

Номер та найменування операції	Зміст операції	Обладнання	Інструмент
1	2	3	4
045 Контрольна	Контролювати розміри деталі	Стіл ВТК	Бездротова інтуїтивна система вимірювання, вбудована в верстат з ЧПК HAAS; Штангенциркуль ШЦ-I-150-0,05 DIN 862; Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 DIN 862; Калібр-пробка різьбова М10 ПР-НЕ DIN 7162; Зразки шорсткості поверхні Mikrotex ОШ-30

Таблиця 2.6 – Технічна характеристика верстата HAAS EC-400

Найменування параметру	Значення
Система управління ЧПК	Haas
Переміщення по осі X, мм	559
Переміщення по осі Y, мм	635
Переміщення по осі Z, мм	559
Швидкість обертання шпинделя, об/хв.	8100
Прискорені переміщення за осями X, Y, Z, м/хв.	35,6
Максимальна потужність, кВт	22,4
Габаритні розміри верстата, мм	5130×2540×2840
Вага верстата, кг	7947

Таблиця 2.7 – Технічна характеристика верстата HAAS ST-25

Найменування параметру	Значення
Система управління ЧПК	Haas
Максимальне коливання деталей, мм	533
Максимальна довжина різання, мм	572
Максимальний діаметр різання, мм	330
Переміщення по осі X, мм	213
Переміщення по осі Z, мм	572
Швидкість обертання шпинделя, об/хв.	6000
Прискорені переміщення за осями X, Z, м/хв.	24
Кількість інструменту	12
Максимальна потужність, кВт	22,4
Габаритні розміри верстата, мм	3630×2290×2340
Вага верстата, кг	4536

Таблиця 2.8 – Технічна характеристика верстата HAAS VF-2

Найменування параметру	Значення
Система управління ЧПК	Haas
Робочі ходи: вісь X, мм	762
Робочі ходи: вісь Y, мм	406
Робочі ходи: вісь Z, мм	508
Довжина стола, мм	914
Ширина стола, мм	356
Швидкість обертання шпинделя, об/хв.	8100
Прискорені переміщення за осями X, Z, м/хв.	25,4
Кількість інструменту	20
Максимальна потужність, кВт	22,4
Габаритні розміри верстата, мм	2570×2510×2570
Вага верстата, кг	3539

Таблиця 2.9 – Технічна характеристика верстата CORMAK MW 200×750

Найменування параметру	Значення
Висота центрів, мм	135
Відстань між центрами, мм	750
Макс. діаметр шліфування (зовнішнє), мм	5-200
Макс. довжина шліфування (зовнішнє), мм	750
Швидкість колеса шпинделя, об/хв	1670
Потужність основного двигуна, кВт	4
Габаритні розміри верстата , мм	2750×2030×2050
Вага верстата, кг	4300

Визначення режимів різання та норм часу здійснюємо за відповідними методиками [9, 10, 11].

Виконаємо розрахунок режимів різання для операції 010 Токарна з ЧПК.

Зміст операції:

Установити та закріпити деталь;

Перехід 1 Точити поверхню  $\varnothing 100$ ,  $\varnothing 99$ ,  $\varnothing 63$  начорно з фаскою та конусом;

Перехід 2 Точити поверхню  $\varnothing 100$ ,  $\varnothing 63$  начисто;

Розкріпити та зняти деталь.

1-й перехід:

глибина різання  $t = 2,5$  мм;

подача  $S_{от} = 0,73$  мм/об;

поправочні коефіцієнти на подачу:

$$K = K_m \cdot K_{sm} \cdot K_{sy} \cdot K_{sn} \cdot K_{sp}$$

$$K = 1,15 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,15$$

дійсна подача  $S_o = S_{от} \cdot K = 0,84$

швидкість різання  $V_T = 140$  м/хв.

Поправочні коефіцієнти на швидкість різання  $K_v$ :

$$K_v = K_{vm} \cdot K_{vc} \cdot K_{vo} \cdot K_{v\phi}$$

$$K_v = 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,85$$

Дійсна швидкість різання:

$$V_d = V_T \cdot K_v = 119$$

Частота обертання  $n$ :

$$n = n_{\phi} = 1000 \cdot V_d / \pi \cdot D = 379 \text{ об/хв.}$$

Потужність різання з поправочним коефіцієнтом:

$$N_{\phi} = 11 \cdot K_{N\phi} = 11 \cdot 1 = 11 \text{ кВт} < 22,4 \text{ кВт} - \text{різання можливе.}$$

Подача за хвилину:

$$S_{xv} = S_o \cdot n_{\phi} = 318 \text{ мм/хв.}$$

Довжина робочого ходу:

$$L = l + l_{вр.} + l_{пе} = 384,8 \text{ мм}$$

Основний час  $T_o$ :

$$T_o = L / S_{xv} = 1,21 \text{ хв.}$$

2-й перехід:

глибина різання  $t = 0,3 \text{ мм}$ ;

подача  $S_{от} = 0,31 \text{ мм/об}$ ;

поправочні коефіцієнти на подачу:

$$K = K_m \cdot K_{sm} \cdot K_{sy} \cdot K_{sn} \cdot K_{\phi}$$

$$K = 1,15 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,15$$

дійсна подача  $S_o = S_{от} \cdot K = 0,35$

швидкість різання  $V_T = 320 \text{ м/хв.}$

Поправочні коефіцієнти на швидкість різання  $K_v$ :

$$K_v = K_{vm} \cdot K_{vc} \cdot K_{vo} \cdot K_{v\phi}$$

$$K_v = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,8$$

Дійсна швидкість різання:

$$V_d = V_T \cdot K_v = 256 \text{ м/хв}$$

Частота обертання  $n$ :

$$n = n_{\phi} = 1000 \cdot V_d / \pi \cdot D = 815 \text{ об/хв.}$$

Потужність різання з поправочним коефіцієнтом

$$N_{\phi} = 11 \cdot K_{Nм} = 6 \cdot 1 = 6 \text{ кВт} < 22,4 \text{ кВт} - \text{різання можливе.}$$

Подача за хвилину:

$$S_{xv} = S_o \cdot n_{\phi} = 285 \text{ мм/хв.}$$

Довжина робочого ходу:

$$L = l + l_{вр.} + l_{пе} = 196,2 \text{ мм}$$

Основний час  $T_o$ :

$$T_o = L / S_{xv} = 0,69 \text{ хв.}$$

Розрахунок норм часу.

Штучний час:

$$T_{шт} = (T_{ца} + T_{д} \cdot K_{ТВ}) + (1 + \% T_{обс} / 100) = 5,29 \text{ хв.}$$

Час циклу автоматичної роботи:

$$T_{ца} = \Sigma T_o + \Sigma T_{м.д.} = 2,9 \text{ хв.}$$

Основний час (з розрахунку режимів різання):

$$T_{ц.а} = \Sigma T_o + \Sigma T_{м.д.} = 1,9 \text{ хв.}$$

Машинно-допоміжний час:

$$T_{м.д.} = 1 \text{ хв.}$$

Допоміжний час:

$$T_{д} = T_{д.у.} + T_{д.вим.} + T_{д.оп.} = 2,05 \text{ хв.}$$

Допоміжний час на встановлення та зняття деталі:

$$T_{д.у.} = 0,41 \text{ хв.}$$

Допоміжний час на вимірювання:

$$T_{д.вим.} = 0,24 \text{ хв.}$$

Допоміжний час, пов'язаний з операцією:

$$T_{д.оп.} = 1,4 \text{ хв.}$$

Час на обслуговування та на відпочинок %:

$$T_{обс.} = 7 \text{ хв.}$$

Підготовчо-заключний час:

$$T_{пз} = T_{пз1} + T_{пз2} + T_{пр.обр.} = 25,5 \text{ хв.}$$

На організаційну підготовку;

$$T_{пз1} = 16 \text{ хв.}$$

На наладку верстата:

$$T_{пз2} = 4 \text{ хв.}$$

На пробну обробку деталі:

$$T_{пр.обр.} = 5,5 \text{ хв.}$$

Норма часу:

$$T_{шт.к.} = T_{шт} + T_{пзп} = 5,46 \text{ хв.}$$

Режими різання та норми часу на інші операції представлені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Режими різання та норми часу

№	Найменування	t, мм	S <sub>o</sub> , мм/об	V, м/хв	n, об/хв	T <sub>о</sub> , хв	T <sub>доп</sub> , хв	T <sub>шт</sub> , хв	T <sub>пз</sub> , хв	T <sub>шк</sub> , хв
005	Фрезерно- центрувальна	2,5	1,44	96,7	308	0,2	0,87	1,22	21	1,51
		7,5	0,15	35,3	750	0,097				
010	Токарна з ЧПК	2,5	0,84	119	379	2,05	2,05	5,29	25,5	5,46
		0,3	0,35	255	815					
015	Токарна з ЧПК	2,5	0,84	119	379	0,49	2,05	4,14	25,5	4,31
		0,3	0,35	255	815	0,33				
020	Шпонково- фрезерна	7,5	0,21	21	334	3,16	1,26	7,58	20	7,72
025	Токарно- гвинторізна	7,5	0,5	26,4	560	0,34	1,52	1,99	24	2,32
		1	0,5	20,5	385	0,07				
			1,5	14,5	290	0,06				
035	Шліфувальна	0,3	15	2,65	177	6,41	1,14	8,31	23	8,62

## 2.6 Висновки

В даному розділі проведено вибір і обґрунтування методу отримання заготовки, розраховано припуски на механічну обробку, розроблено маршрут обробки деталі, режими різання та норми часу.

### 3 Спеціальний розділ

#### 3.1 Конструкція пристосування

Деталь «Вал» встановлюється на призми з прихватами до упору в торець.

При подачі стисненого повітря в штокову порожнину пневматичної камери шток з діафрагмою під тиском повітря опускаються вниз, і за допомогою притискних планок деталь притискається до призми. Після закінчення фрезерування пазу повітря подається в безштокову порожнину за допомогою рукоятки на пневмосистемі пневматичної камери, шток підіймається вгору і звільнює деталь.

#### 3.2 Розрахунок пристосування

Деталь  $\varnothing 100$  Н9<sub>-0,087</sub> на дві поверхні встановлюємо з кутом  $\alpha = 90^\circ$  на призми. Розмір глибини шпонкової канавки заданий від верхньої утворюючої. Похибку базування можна визначити за формулою [12]:

$$E = 1,21 \cdot T_d$$

$T_d$  – допуск на зовнішню циліндричну поверхню, до якої деталь встановлюється на призму .

Похибка базування:

$$E = 1,21 \cdot 0,087 = 0,105 \text{ мм}$$

Розрахунок зусилля затиску деталі:

$$V = C_v \cdot D_d / (T^m \cdot t^x \cdot S_{zy} \cdot B^u \cdot Z^p) \cdot K_v$$

Коефіцієнти в формулі

$$C_v = 12; d = 0,3; m = 0,26; x = 0,3; u = 0; p = 0; y = 0,25$$

$$K_{\nu} = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} = 0,772 \cdot 1 \cdot 1 = 0,772$$

$$K_{mv} = K_z \cdot (720 / TO)^n = 1 \cdot (750 / 1000)^{0,9} = 0,772$$

$$V = 12 \cdot 20^{0,3} / (80^{0,26} \cdot 10^{0,3} \cdot 0,1^{0,25} \cdot 3^0) \cdot 0,772 = 6,49 \text{ м/хв.}$$

Потрібна сила різання:

$$F_z = 10 \cdot C_f \cdot t^x \cdot S^y \cdot B^n \cdot z / (D^d \cdot n^2) \cdot K_{mf}$$

Коефіцієнти в формулі

$$K_{mf} = (TO \div 750)^n = (1000 \div 750)^{0,9} = 1,266$$

$$C_f = 68,2; \quad x = 0,86; \quad y = 0,72; \quad n = 1; \quad d = 0,86; \quad w = 0$$

$$F_z = 10 \cdot 68,2 \cdot 10^{0,86} \cdot 0,1^{0,72} \cdot 7,5^1 \cdot 3 / (20^{0,86} \cdot 125^0) \cdot 1,266 = 2039 \text{ Н}$$

Крутний момент:

$$M_{кр} = F_z \cdot D / (2 \cdot 100)$$

$$M_{кр} = 2039 \cdot 20 / (2 \cdot 100) = 204 \text{ Нм}$$

Сила затиску, що здвигає

$$F_{зд} = 1,2 \cdot F_z = 1,2 \cdot 2039 = 2446 \text{ Н}$$

Зусилля затиску деталі:

$$F_{зат} = 2 \cdot K \cdot M / (D^3 \cdot ((f_1 + f_2) / \sin 0,5))$$

$$F_{зат} = 2 \cdot 2,5 \cdot 204 \div (0,6 \cdot ((0,25 + 0,25) / 0,7071)) = 2404 \text{ Н}$$

Розмір приводу затиску:

$$D_d = \sqrt{F_{зат} / (P_n \cdot 0,58 \cdot k)} = \sqrt{2404 / (0,58 \cdot 0,4 \cdot 0,95)} = 104 \text{ мм}$$

Приймаємо  $D_d = 100 \text{ мм}$

Визначаємо діаметр упорної шайби штока:

$$d = 0,7 \cdot D_d = 0,7 \cdot 100 = 70 \text{ мм}$$

Визначаємо діаметр штока:

$$d_{шт} = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 70 = 21 \text{ мм}$$

Приймаємо  $d_{шт} = 20 \text{ мм}$ .

### 3.3 Висновки

В даному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового пазу. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

## 4 Науково-дослідницький розділ

### 4.1 Постановка задачі дослідження

Оптимізація режимів різання для верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) є ключовим фактором, який визначає ефективність сучасного металообробного виробництва. Цей процес має значення не тільки для підвищення продуктивності, але й для забезпечення якості обробки деталей, продовження терміну служби інструменту та зменшення витрат на енергію. Збільшення швидкостей і подачі дозволяє скоротити час обробки заготовок. Крім того, оптимальні режими різання забезпечують більш якісну шорсткість поверхні обробленої деталі. Економія матеріалів та енергозбереження стають додатковими перевагами цього підходу.

Проте процес оптимізації режимів різання супроводжується деякими викликами і обмеженнями. Одним із головних недоліків є складність визначення параметрів, що потребує спеціальних знань та досвіду. Проведення аналізу та тестування для визначення оптимальних режимів може бути затратним у часі. Крім того, стандартні алгоритми оптимізації часто не враховують специфічні умови конкретного виробництва, що може призвести до неточностей. Зміна типу матеріалу або умов роботи також потребує регулярних корекцій, що збільшує складність управління процесом.

Таким чином, оптимізація режимів різання для верстатів з ЧПК є складним, але стратегічно важливим напрямком розвитку сучасних технологій металообробки. Вона вимагає комплексного підходу, що враховує як технічні особливості верстатів, так і економічні аспекти виробничого процесу. У разі успішного застосування цього підходу, виробництво отримує значний потенціал для підвищення якості продукції та конкурентоспроможності на ринку.

Аналіз сучасних досліджень щодо оптимізації режимів різання для верстатів з ЧПК показує, що ця тема активно вивчається у багатьох країнах

світу. Наприклад, дослідження авторів з Індії [13], демонструє ефективність застосування методу сірого аналізу для визначення оптимальних параметрів обробки на токарних верстатах з ЧПК. Дослідники з'ясували, що такий підхід дозволяє значно покращити точність результатів та зменшити час обчислень.

У статті [14], було проаналізовано можливості методу Тагучі для оптимізації параметрів фрезерування. Автори зазначили, що застосування цього методу сприяє досягненню компромісних рішень між різними цілями, такими як швидкість різання, подача та глибина різання. Результати дослідження підтвердили ефективність такого підходу для забезпечення якості поверхні деталей.

Окрім того, наукова робота [15] надає огляд застосування штучного інтелекту для оптимізації режимів різання. У даному дослідженні зазначається, що методи машинного навчання, такі як нейронні мережі та генетичні алгоритми, стають все більш популярними через свою високу точність та адаптивність до складних задач.

Також варто звернути увагу на статтю [16], яка акцентує увагу на екологічному аспекті оптимізації процесів металообробки. Автор зазначає, що правильний підхід до встановлення режимів різання може значно зменшити енерговитрати та емісію вуглекислого газу, що є важливою частиною сучасного підходу до сталого розвитку промисловості

Науковці з Польщі у своїй роботі [17] вивчили вплив основних параметрів різання на знос інструменту та якість поверхні при фрезеруванні. Вони зробили висновок, що взаємозв'язок між швидкістю різання та подачею має критичне значення для продовження терміну служби інструменту.

Вітчизняні дослідники в своїх роботах [18, 19] розглядають формування обмежень, цільову функцію та методи рішення створених математичних моделей механічної обробки різанням.

Загалом, сучасні дослідження свідчать про те, що оптимізація режимів різання є комплексним процесом, який вимагає застосування передових технологій та методик.

В даній роботі на основі досліджень, вказаних вище, створимо математичну модель механічної обробки валу при точінні та виконаємо її аналіз.

#### 4.2 Оптимізація режимів різання при точінні

Вихідні дані.

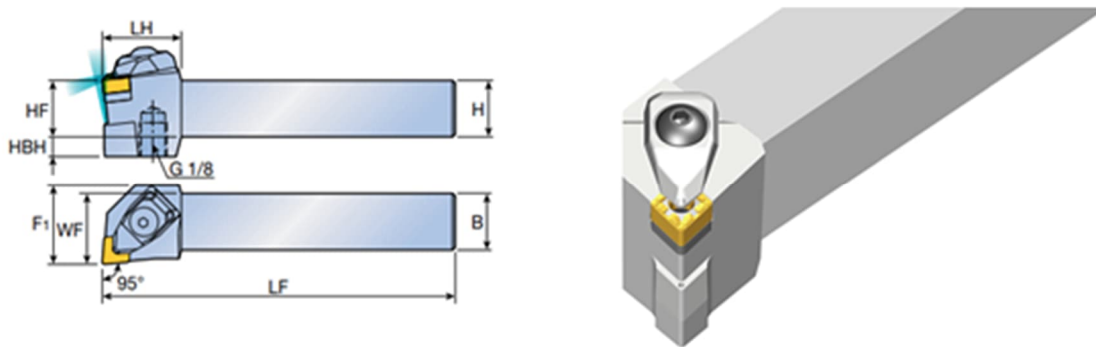
Операція 010 – Токарна з ЧПК.

Точіння поверхні валу довжиною  $L = 300$  мм на діаметрі  $D = 100$  мм.

Різальний інструмент

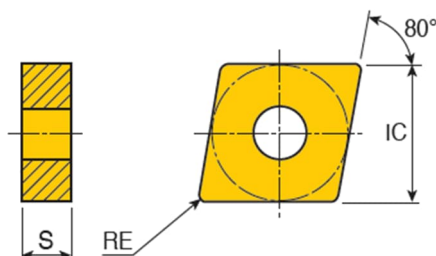
Різець токарний TAEGUTEC TCLNR 2525 M0904-TB з пластиною CNMG 090408.

Вигляд різця та пластини з основними геометричними параметрами представлено на рисунках 4.1 – 4.2.



H	HF	B	LF	LH	WF	HBH	F1	MIID
25.0	25.0	25.0	150.0	28.0	32.0	7.0	32.0	CNMG 090408

Рис. 4.1 – Геометричні параметри різця [20]



Позначення	IC	S	RE	ap (min)	ap (max)	ft (min)	ft (max)	Сплав
CNMG 090408	9.52	4.76	0.80	0.50	3.00	0.13	0.40	TT9235 TT9080 TT9225 TT5080 TT9215

Рис. 4.2 – Геометричні параметри пластини [20]

Вибір технічних обмежень.

1) Обмеження за стійкістю

$$n^{yv} \cdot S \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot k_v}{D \cdot \pi \cdot T^{mv} \cdot t^{xv}}, \quad (4.1)$$

де  $C_v = 350$ ,  $x_v = 0,15$ ,  $y_v = 0,2$ ,  $k_v = 1,36$   $m_v = 0,2$  – коефіцієнти за довідниками;

$D = 100$  мм – діаметр деталі;

$t = 2,5$  мм – глибина різання;

$T = 60$  хв – стійкість різця.

2) Обмеження за потужністю

$$n^{yp} \cdot S^{np+1} \leq \frac{612^{np+1} \cdot N_B \cdot \eta}{C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np+1} \cdot \pi^{np+1}}, \quad (4.2)$$

де  $C_{pz} = 300$ ,  $x_p = 1$ ,  $y_p = 0,75$ ,  $n_p = -0,15$  – коефіцієнти за довідниками;

$\eta = 0,95$  – коефіцієнт корисної дії верстата;

$N_B = 22,2$  кВт – потужність верстата.

3) Обмеження за міцністю механізму подачі

$$n^{yp} \cdot S^{np} \leq \frac{P_x \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{3,5 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np} \cdot \pi^{np}}, \quad (4.3)$$

де  $P_x = 10000$  Н – допустиме тягове зусилля.

4) Обмеження за міцністю державки різця

$$n^{yp} \cdot S^{np} \leq \frac{W \cdot \sigma \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot \pi^{np} \cdot D^{np} \cdot l_p}, \quad (4.4)$$

де  $W$  – момент опору перерізу різця;

$\sigma$  – допустиме напруження на вигин;

$l_p$  – виліт різця.

5) Обмеження за міцністю пластини різця

$$n^{yp} \leq \frac{34 \cdot C_m^{1,35} \left(\frac{\sin 60}{\sin \varphi}\right)^{0,8}}{C_{pz} \cdot t^{xp-0,77}}, \quad (4.5)$$

де  $C_m = 4,76$  – товщина різальної пластини.

6) Обмеження за шорсткістю

$$n^{0,58} \cdot S^{0,06} \leq \frac{Ra \cdot \pi^{0,06} \cdot D^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05} \cdot 100^{0,58}}{0,85 \cdot 1000^{0,06} \cdot t^{0,31} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}}, \quad (4.6)$$

де  $Ra$  – параметр шорсткості;

$HB = 255$  – твердість сталі;

$r$  – радіус при вершині різця.

$\varphi, \varphi_1$  – головний та допоміжний кути в плані.

7) Обмеження за мінімальними обертами шпинделя

$$n \geq n_{min}, \quad (4.7)$$

$$n \geq 10.$$

8) Обмеження за максимальними обертами шпинделя

$$n \leq n_{max}, \quad (4.8)$$

$$n \leq 6000.$$

9) Обмеження за мінімальною подачею

$$S \geq S_{min}$$

$$S \geq 0,05 \quad (4.9)$$

10) Обмеження за максимальною подачею

$$S \leq S_{max}$$

$$S \leq 4 \quad (4.10)$$

Цільова функція.

Вибрані технічні обмеження разом із цільовою функцією дозволяють побудувати математичну модель процесу обробки. Як цільову функцію прийнято собівартість операції  $F$ , яка виражається через режими обробки у вигляді

$$F = \frac{C}{S_0 \cdot n},$$

де коефіцієнт  $C$  залежить від умов обробки, але не залежить від режимів різання.

Оптимальна модель охоплює кілька варіантів (технологічних способів) виробництва, розподілу або споживання і призначена для вибору таких значень змінних, що характеризують ці варіанти, щоб було знайдено кращий з них.

Після визначення технологічних обмежень зводимо нерівності та рівняння цільової функції в одну систему. Перехід до лінійної системи здійснюється логарифмуванням [18, 19].

Математична модель.

Математична модель оптимального режиму різання містить систему технічних обмежень, виражених у вигляді лінійних нерівностей, та лінійне рівняння цільової функції. Тому необхідно привести всі технічні обмеження та цільову функцію до лінійного вигляду шляхом логарифмування.

Цільова функція буде мати наступний вигляд:

$$F = \ln(n) + \ln(S) \rightarrow \max \quad (4.11)$$

Введемо позначення:  $y = \ln(n)$ ,  $x = \ln(S)$ .

Для полегшення проведення математичних обчислень та побудови графіків використовуємо пакет MathCad. Приклад програми для розрахунку оптимальних режимів різання наведено в додатку.

В загальному вигляді система обмежень (формули 4.1 – 4.10) та цільова функція (формула 4.11) для токарної обробки поверхні валу буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 n^{yv} \cdot S &\leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot k_v}{D \cdot \pi \cdot T^{mv} \cdot t^{xv}}, \\
 n^{yp} \cdot S^{np+1} &\leq \frac{612^{np+1} \cdot N_B \cdot \eta}{C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np+1} \cdot \pi^{np+1}}, \\
 n^{yp} \cdot S^{np} &\leq \frac{Px \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{3,5 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np} \cdot \pi^{np}}, \\
 n^{yp} \cdot S^{np} &\leq \frac{W \cdot \sigma \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot \pi^{np} \cdot D^{np} \cdot lp}, \\
 n^{yp} &\leq \frac{34 \cdot Cm^{1,35} \left(\frac{\sin 60}{\sin \varphi}\right)^{0,8}}{C_{pz} \cdot t^{xp-0,77}}, \\
 n^{0,58} \cdot S^{0,06} &\leq \frac{Ra \cdot \pi^{0,06} \cdot D^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05} \cdot 100^{0,58}}{0,85 \cdot 1000^{0,06} \cdot t^{0,31} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}}, \\
 \ln(n) &\geq \ln(n_{min}) \\
 \ln(n) &\leq \ln(n_{max}) \\
 \ln(S) &\geq \ln(S_{min}) \\
 \ln(S) &\leq \ln(S_{max}) \\
 F &= \ln(n) + \ln(S) \rightarrow \max
 \end{aligned} \right\} (4.12)$$

Зазначена математична модель не є вичерпною та може бути доповнена іншими обмеженнями.

Після проведення математичних перетворень у виразі (4.12) отримаємо математичну модель для визначення оптимальних режимів різання при точінні валу у вигляді системи рівнянь (4.13).

$$\left. \begin{aligned}
 0,2 \cdot y + x &\leq 7,29 \\
 0,75 \cdot y + 0,85 \cdot x &\leq 7,29 \\
 0,75 \cdot y - 0,15 \cdot x &\leq 4,62 \\
 0,75 \cdot y - 0,15 \cdot x &\leq 4,53 \\
 0,75 \cdot y &\leq 3,45 \\
 0,58 \cdot y - 0,06 \cdot x &\leq 1,03 \\
 x &\leq 1,609 \\
 x &\geq 6 \\
 y &\leq 2,3 \\
 y &\geq 8,7 \\
 F = y + x &\rightarrow \max
 \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Для визначення оптимальних режимів подачі та частоти обертання шпинделю в пакеті MathCad була створена програма (наведена в Додатках). Дана програма дозволяє одразу отримати шукані значення оптимальних параметрів без побудови додаткових графіків. Після підстановки всіх вихідних даних було отримане рішення системи (4.13), визначені оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделю.

Після рішення системи (4.13) було досліджено вплив параметру шорсткості  $Ra$  (обмеження 4.6) та товщині пластини  $St$  (обмеження 4.5) на подачу  $S$ , частоту обертів шпинделя  $n$ , швидкість різання  $V$ .

Отримані дані внесені до таблиці 4.1. Графіки залежностей приведені на рисунках 4.3 – 4.5.

Таблиця 4.1 – Оптимальні режими різання (товщина пластини  $St = 4,76$  мм)

Шорсткість поверхні $Ra$ , мкм	Подача $S$ , мм/об	Частота обертів шпинделя $n$ , об/хв	Швидкість різання $V$ , м/хв
25	0,59	145,38	45,67
12,5	0,59	145,38	45,67
6,3	0,34	239,36	75,2
3,2	0,12	651,42	193,34

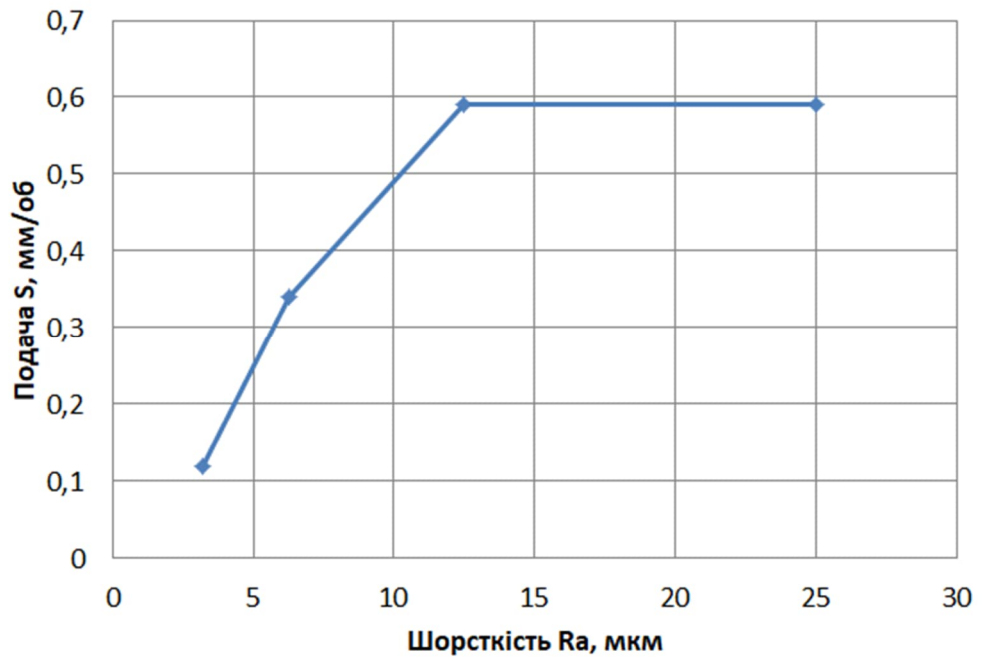


Рис. 4.3 – Залежність подачі від шорсткості поверхні  
(товщина пластини  $Ct = 4,76$  мм)

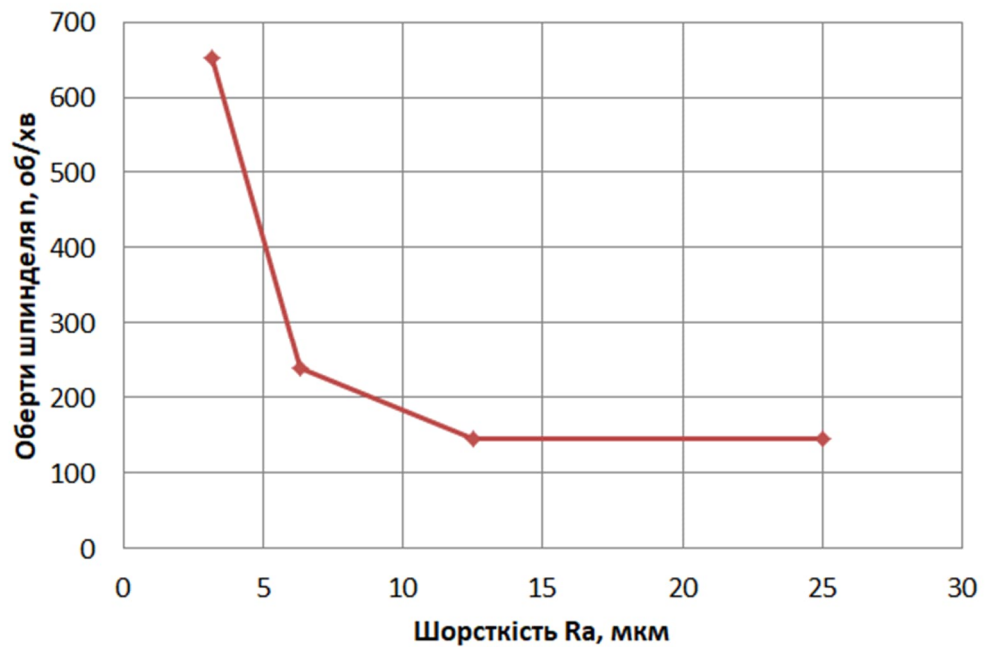


Рис. 4.4 – Залежність частоти обертів шпинделя від шорсткості  
поверхні (товщина пластини  $Ct = 4,76$  мм)

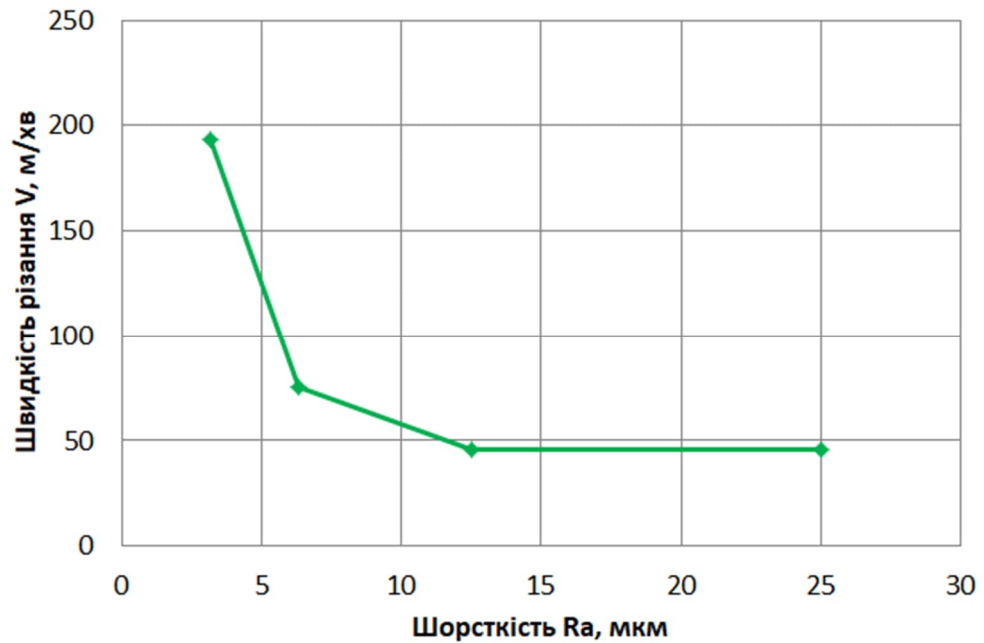


Рис. 4.5 – Залежність швидкості різання від шорсткості поверхні  
(товщина пластини  $Cm = 4,76$  мм)

З графіків видно, що для отримання найкращої шорсткості поверхні  $Ra = 3,2$  мкм (задана за кресленням деталі) при використанні різальної пластини товщиною  $Cm = 4,76$  мм треба застосовувати подачу  $S = 0,12$  мм/об та частоту обертів шпинделя  $n = 651,42$  об/хв.

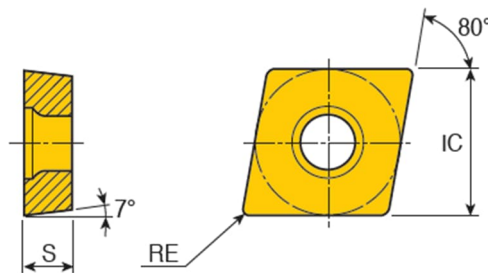
На першому переході для отримання шорсткості поверхні з  $Ra = 50$  мкм до  $Ra = 12,5$  мкм при точінні поверхні валу можливо використовувати постійну подачу та частоту обертів шпинделя відповідно  $S = 0,59$  мм/об та  $n = 145,38$  об/хв.

На другому переході – отримання шорсткості поверхні з  $Ra = 12,5$  мкм до  $Ra = 3,2$  мкм – необхідно скорегувати подачу та частоту обертів шпинделя в діапазоні  $S = 0,34 \div 0,12$  мм/об та  $n = 239,36 \div 651,42$  об/хв.

Дослідження оптимальних режимів різання при різній товщині різальної пластини.

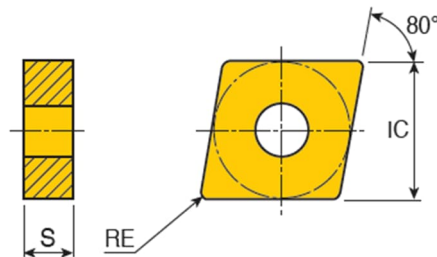
На наступному етапі було обрано пластини для різального інструменту з аналогічними параметрами, але товщиною  $Cm = 2,38$  та  $6,35$  мм.

Вигляд пластин з основними геометричними параметрами представлено на рисунках 4.6 – 4.7.



Позначення	IC	S	RE	ap (min)	ap (max)	ft (min)	ft (max)	Сплав
ССМТ 060208	6.35	2.38	0.80	0.40	2.00	0.08	0.25	ТТ9080 ТТ9225 ТТ9215 ТТ8115В

Рис. 4.6 – Геометричні параметри пластини товщина пластини  $Cm = 2,38$  мм [21]



Позначення	IC	S	RE	ap (min)	ap (max)	ft (min)	ft (max)	Сплав
CNMG 160608	15.88	6.35	0.80	0.50	6.50	0.13	0.50	ТТ9235 ТТ9225 ТТ5080 ТТ9215

Рис. 4.7 – Геометричні параметри пластини товщина пластини  $Cm = 6,35$  мм [22]

Отримані дані оптимальних режимів різання для товщини пластин  $St = 2,38$  та  $6,35$  мм внесені до таблиць 4.2 – 4.3. Графіки залежностей приведені на рисунках 4.8 – 4.9.

Таблиця 4.2 – Оптимальні режими різання (товщина пластини  $St = 2,38$  мм)

Шорсткість поверхні $Ra$ , мкм	Подача $S$ , мм/об	Частота обертів шпинделя $n$ , об/хв	Швидкість різання $V$ , м/хв
25	0,17	437,14	137,33
12,5	0,17	437,14	137,33
6,3	0,17	437,14	137,33
3,2	0,12	615,42	193,34

Таблиця 4.3 – Оптимальні режими різання (товщина пластини  $St = 6,35$  мм)

Шорсткість поверхні $Ra$ , мкм	Подача $S$ , мм/об	Частота обертів шпинделя $n$ , об/хв	Швидкість різання $V$ , м/хв
25	0,99	92	29
12,5	0,99	92,09	28,93
6,3	0,34	239,36	75,2
3,2	0,12	615,42	193,34

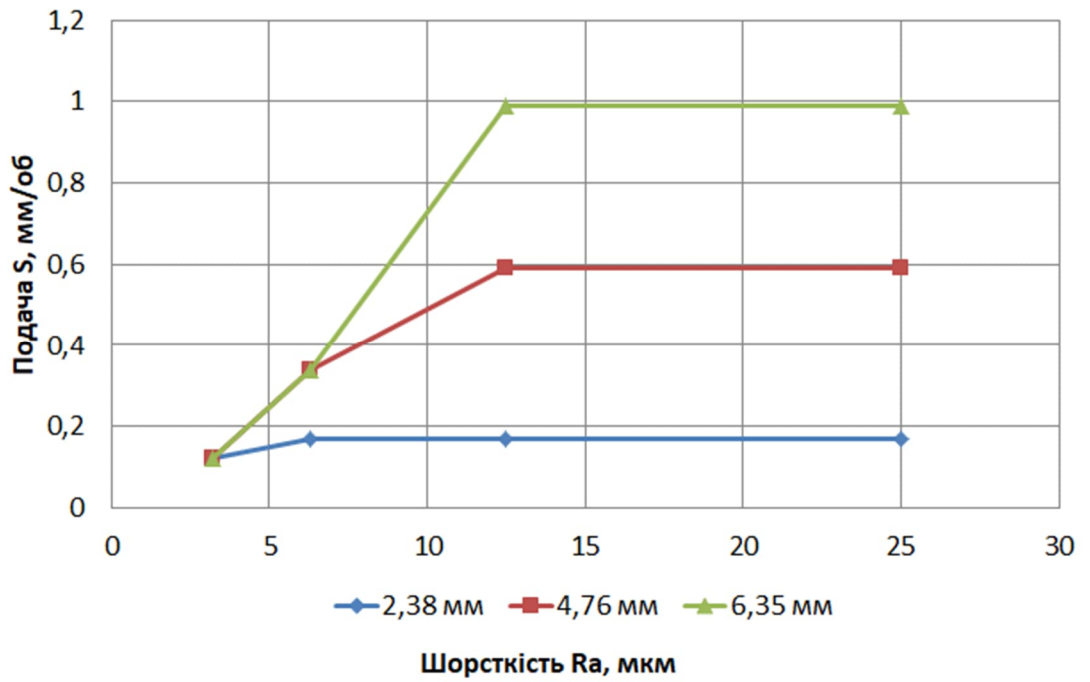


Рис. 4.8 – Залежність подачі від шорсткості поверхні для пластин різної товщини

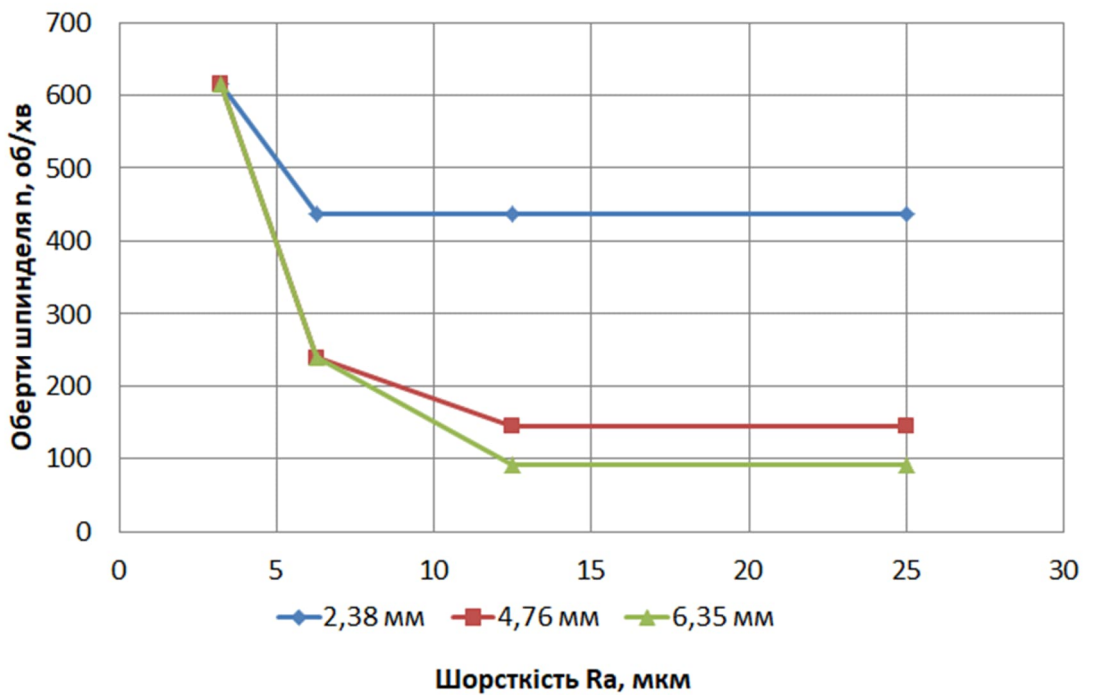


Рис. 4.9 – Залежність частоти обертів шпинделя від шорсткості поверхні для пластин різної товщини

З приведених вище таблиць та графіків залежностей частоти обертів шпинделя та подачі від заданої шорсткості поверхні видно, що при використанні пластин товщиною  $Cm = 4,76$  мм та  $Cm = 6,35$  мм необхідно змінювати оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделя для отримання заданої шорсткості поверхні від  $Ra = 50$  мкм до  $Ra = 3,2$  мкм.

Використання різальної пластини товщиною  $Cm = 2,38$  мм потребує корекції режимів різання, починаючи з шорсткості  $Ra = 6,3$  мкм до  $Ra = 3,2$  мкм.

Можна запропонувати проводити точіння поверхні валу довжиною 300 мм та діаметром 100 мм різальною пластиною товщиною  $Cm = 2,38$  мм на постійних оптимальних режимах подачі  $S = 0,17$  мм/об та частоти обертів шпинделя  $n = 437,14$  об/хв., з отриманням шорсткості поверхні  $Ra = 6,3$  мкм.

В подальшому для отримання заданої шорсткості валу за кресленням  $Ra = 3,2$  мкм – оптимальні параметри подачі  $S = 0,12$  мм/об та частоти обертів шпинделя  $n = 651,42$  об/хв.

Таким чином:

– встановлено, що при точінні поверхні валу довжиною 300 мм та діаметром 100 мм різальною пластиною товщиною  $Cm = 4,76$  мм для отримання шорсткості поверхні  $Ra = 3,2$  мкм, оптимальні значення подачі та частоти обертів шпинделя становлять  $S = 0,12$  мм/об та  $n = 651,42$  об/хв.

– обґрунтовано, що при точінні поверхні валу довжиною 300 мм та діаметром 100 мм використання різальної пластини товщиною  $Cm = 2,38$  мм дозволяє отримати шорсткість поверхні з  $Ra = 50$  мкм до  $Ra = 6,3$  мкм при оптимальних значеннях подачі  $S = 0,17$  мм/об та частоти обертів шпинделя  $n = 437,14$  об/хв.

### 4.3 Висновки

В даному розділі розглянуто оптимізацію режимів різання при точінні поверхні валу. Розроблена математична модель для визначення оптимальних значень частоти обертів шпинделя та подачі. Для полегшення проведення математичних обчислень використано пакет MathCad.

Проведено розрахунки оптимальних режимів різання при точінні поверхні валу, побудовані графіки залежностей подачі, частоти обертів шпинделю та швидкості різання від заданої шорсткості поверхні. Досліджено вплив товщини різальної пластини на оптимальні режими різання.

## 5 Загальні висновки

В аналітичному розділі на підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу визначено, що деталь «Вал» – технологічна.

В технологічному розділі проведено вибір і обґрунтування методу отримання заготовки, розраховано припуски на механічну обробку, розроблено маршрут обробки деталі, режими різання та норми часу.

В спеціальному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування шпонкового пазу. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

В науково-дослідницькому розділі розглянуто оптимізацію режимів різання при точінні поверхні валу. Розроблена математична модель для визначення оптимальних значень частоти обертів шпинделя та подачі. Для полегшення проведення математичних обчислень використано пакет MathCad.

Проведено розрахунки оптимальних режимів різання при точінні поверхні валу, побудовані графіки залежностей подачі, обертів шпинделю та швидкості різання від заданої шорсткості поверхні. Досліджено вплив товщини різальної пластини на оптимальні режими різання.

## 6 Перелік посилань

1. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови.

2. URL: [https://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=87](https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=87)

3. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/45>

4. Мельничук П.П. Технологія машинобудування: підруч. / П.П. Мельничук, А.І. Боровик, П.А. Лінчевський, Ю.В. Петраков, - Житомир: ЖДТУ, 2005 – 882 с.

5. Добрянський С.С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С.С. Добрянський, Ю.М. Малафєєв ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

6. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування та виробництво заготовок. Львів: Світ, 1996. 368 с.

7. Добрянський С.С., Малафєєв Ю.М., Пуховський Є.С. Проектування і виробництво заготовок / підручник. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 353 с.

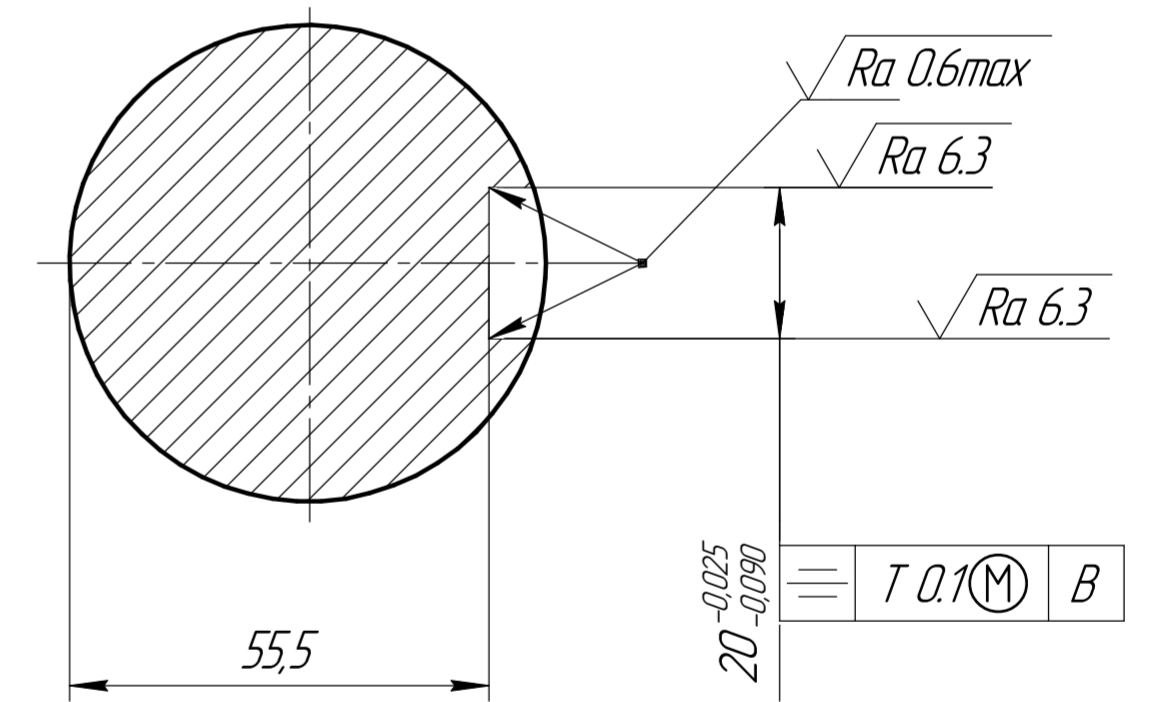
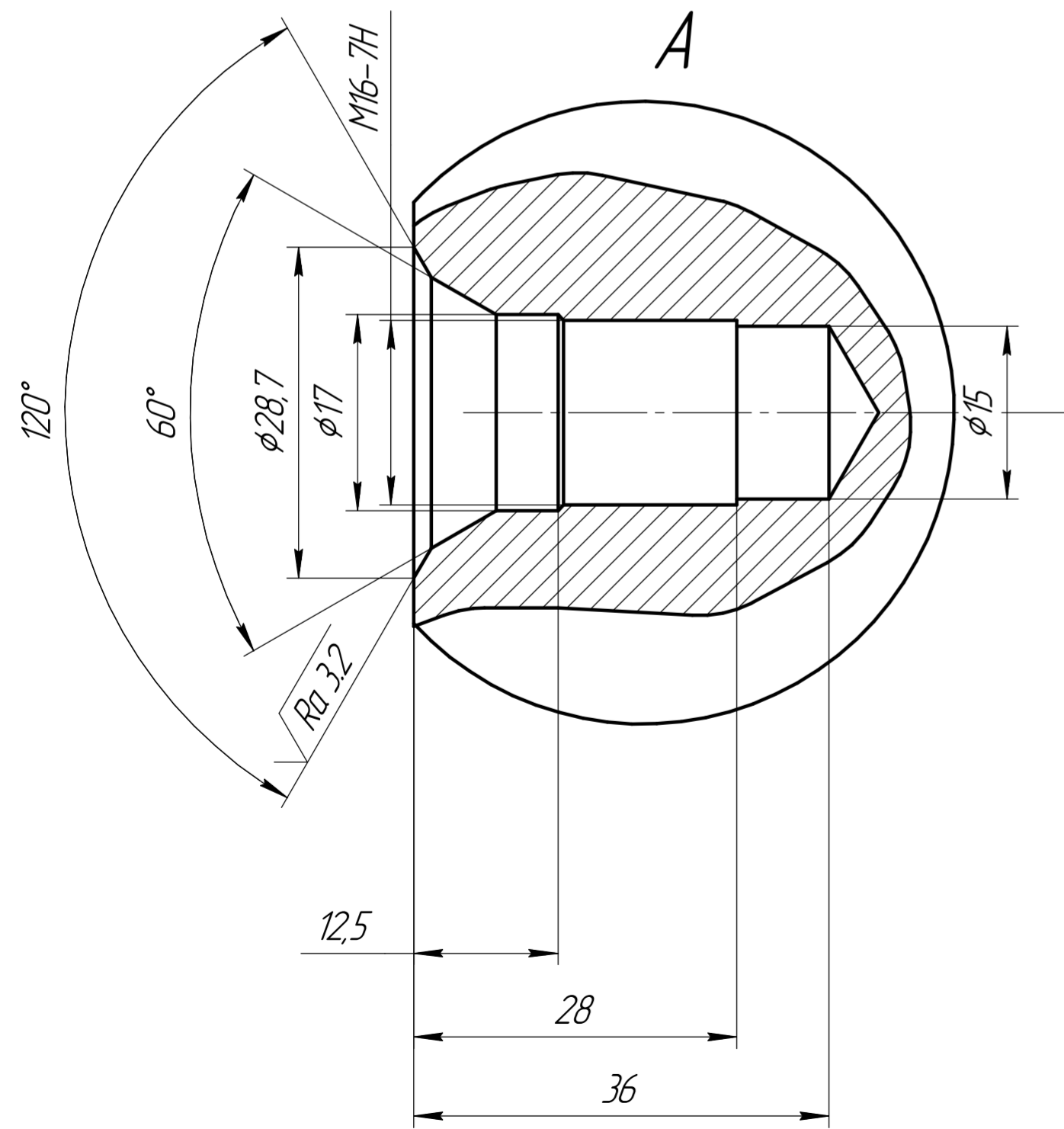
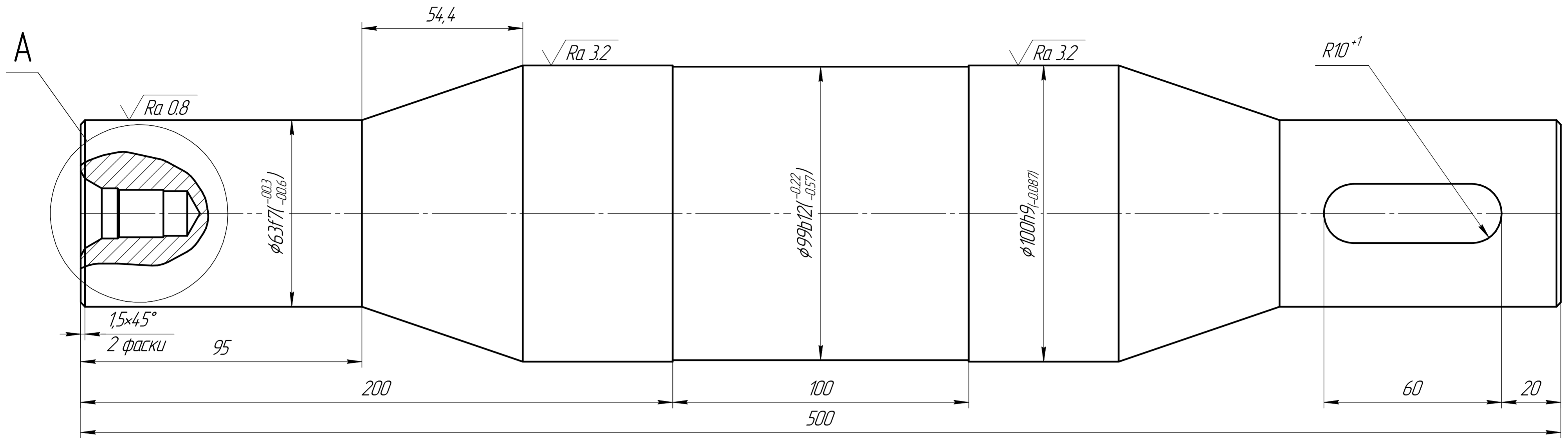
8. Довідковий посібник із призначення операційних припусків на механічну обробку табличним методом / Упоряд.: С.Г. Пінковський, Ю.Г. Кравченко, В.Г. Олейниченко. – Дніпропетровськ: НГАУ, 2002. – 15 с.

9. Ю. Паливода. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник / Ю. Паливода, А. Дячун, Р. Лещук. – Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, 2019. – 240с.

10. Дідик Р.П. Розрахункові операції режимів механічної обробки матеріалів: точіння, свердління, зенкерування, розгортання: навч. посіб. / Р.П. Дідик, В.В. Зіль, С.Т. Пацера. – Д.: «Національний гірничий університет», 2013. – 196 с.

11. Буц Б.Д., Приходько В.Є., Ткачоа Ю.В. Розрахунок режимів різання металів: Навч. Посібник. – Д.: РВВ ДНУ, 2005. – 76 с.
12. Приходько В.П., Литвин О.В. Проектування оснащення верстатів, роботів і машин: Навч. посіб. / Приходько В.П., О.В.Литвин. – [Електронний ресурс] / - К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 212 с.
13. Suchithra R, Suresh Kumar M. Optimization of Machining Parameters in CNC Turning Using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
14. Altun İ., et al. Multi-objective optimization of CNC milling process parameters using Taguchi-based grey relational analysis. *Journal of Manufacturing Processes* , 2020.
15. Mohammadi A., Rezaei J. Artificial intelligence techniques for machining parameter optimization: A review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021.
16. Othman M.N. Sustainable machining through process optimization: A review. *Sustainability* , 2022.
17. Polish Researchers. Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in CNC milling. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* , 2020.
18. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф.В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с.
19. Кроль О.С. Методи та процедури оптимізації режимів різання: монографія. - Луганськ: вид-во ВНУ ім. В. Даля, 2013. – 260 с.
20. <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Family.aspx?fnum=1009&mapp=IS&app=377&GFSTYP=M>
21. <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Family.aspx?fnum=1657&mapp=IS&app=377&GFSTYP=M>
22. <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Family.aspx?fnum=1813&mapp=IS&app=377&GFSTYP=M>

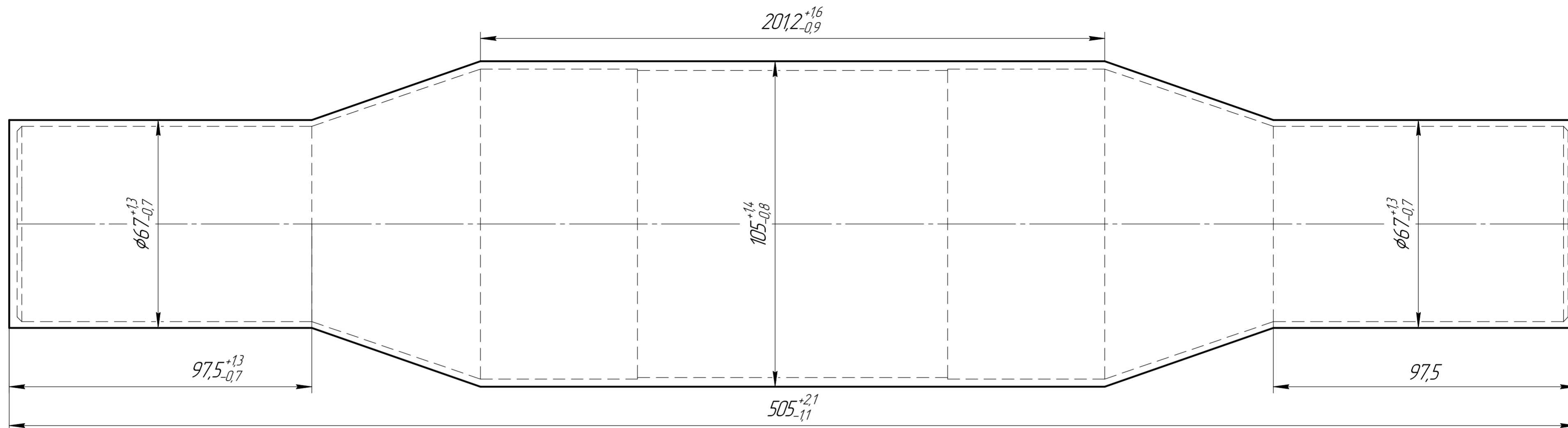
ДОДАТОК А  
(Кресленики)



1. 44...46HRCз
2. Радіальне біття пов. φ63f7, φ100h9 відносно вісі центрів не більше 0,05 мм.
3. Невказані граничні відхилення розмірів по H14, h14, ± IT14/2

Перв. примен.	Спроб. №	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инд. № дил.	Инд. № подл.

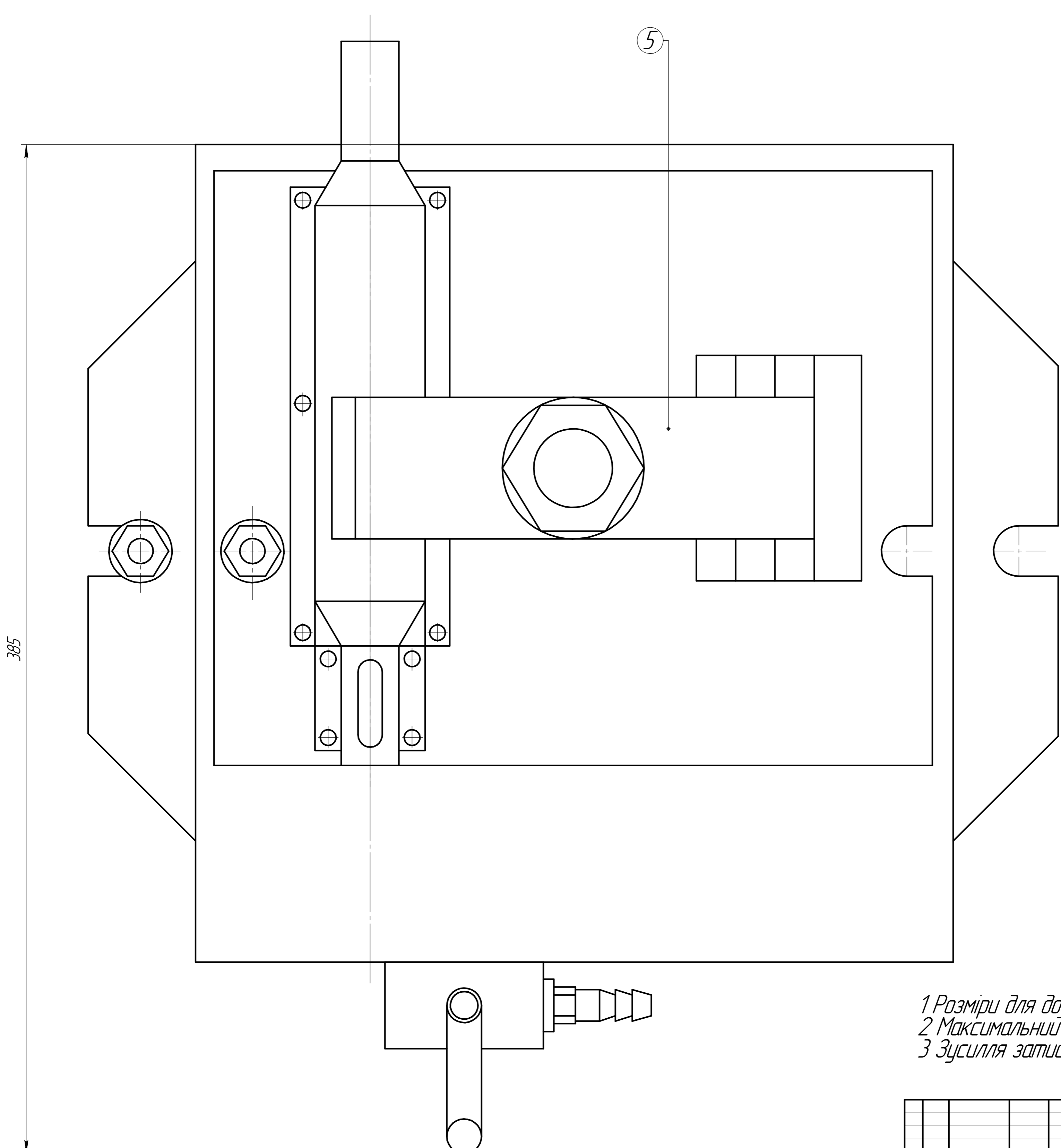
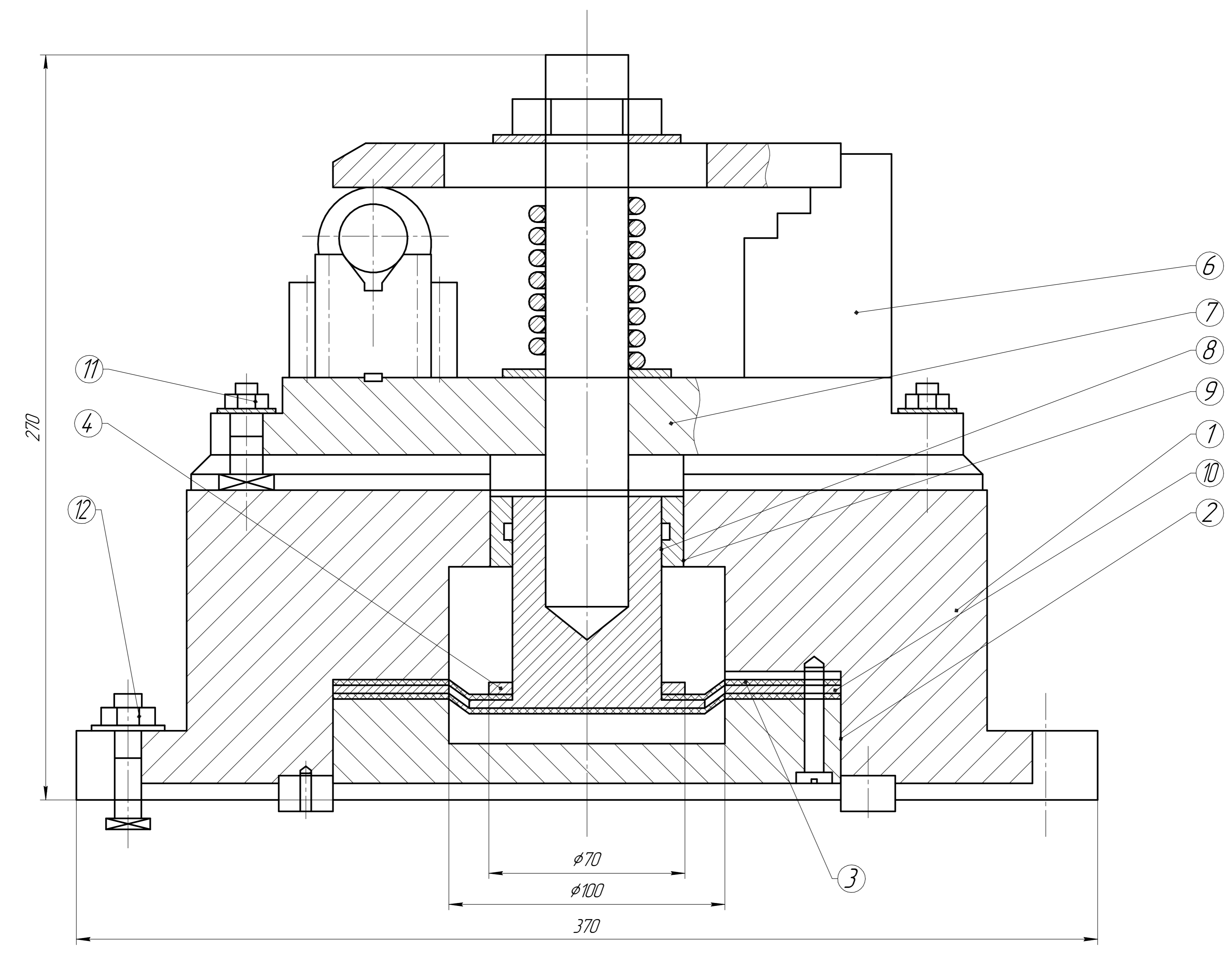
ТМБМ3.131-ОНПМ.25.09.01				Лит.	Маса	Масштаб
Вал					21,19	1:1
Эк. Арх.	№ докум.	Підп.	Дата	Сталь 45 ДСТУ 7809:2015		
Разроб.	Дубяга			НТУ «ДП» 131м-23н-1ММФ		
Керів.	Дердаба			Копіював		
Т.контр.				Формат А2		
Н.контр.	Рудан					
Затв.						



- 1 Невказані штамповочні радіуси  $R=3,5$  мм
- 2 Невказані штамповочні нахили до  $3^\circ$
- 3 Допускається зміщення штампю до 1 мм

Перв. примен.	
Спроб. №	
Підп. і дата	
Інв. № дідл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

				ТМБМ3.131-ОНПМ.25.09.02				
Эм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Заготовка	Лит.	Маса	Масштаб
Разр.	Дубляга						24,97	1:1
Керів.	Дердаба				Архив	Архив		
Т.контр.					Сталь 45 ДСТУ 7809:2015			НТУ «ДП» 131м-23н-1 ММФ
Н.контр.	Рудан				Копіяваб			Формат А2
Затв.								

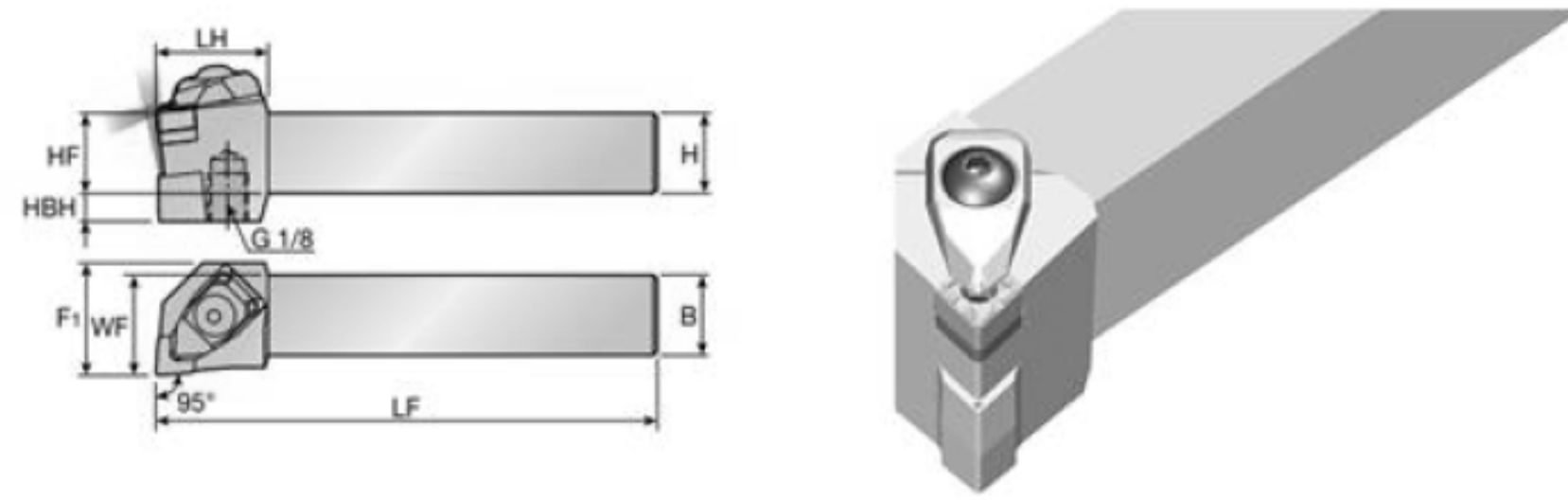


1 Розміри для довідок  
 2 Максимальний хід штоку 10 мм  
 3 Зусилля запису на штоку  $F_3=24.04 \text{ Н}$

Лист № 1	Лист № 2	Лист № 3	Лист № 4	Лист № 5	Лист № 6	Лист № 7	Лист № 8	Лист № 9	Лист № 10	Лист № 11	Лист № 12
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------

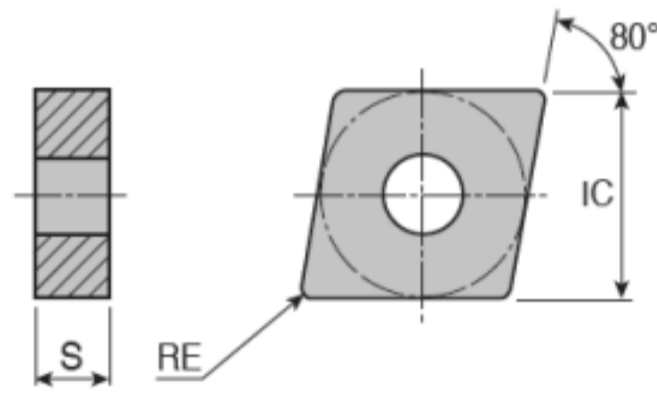
ТМБМЗ.131-ОНПМ.25.09.03.СК						Лит	Маса	Масштаб
Зм	Арх	№ док-м	Підп	Дата	Прийняття фрезерне	1:1	НТУ «ДП» 131М-23Н-1 ММФ	Формат А1
Розроб	Директ	Лектор	Лектор	Лектор				
Керів	Директ	Лектор	Лектор	Лектор				
І.контр.	Рубан	Заліз						

# Науково-дослідницький розділ



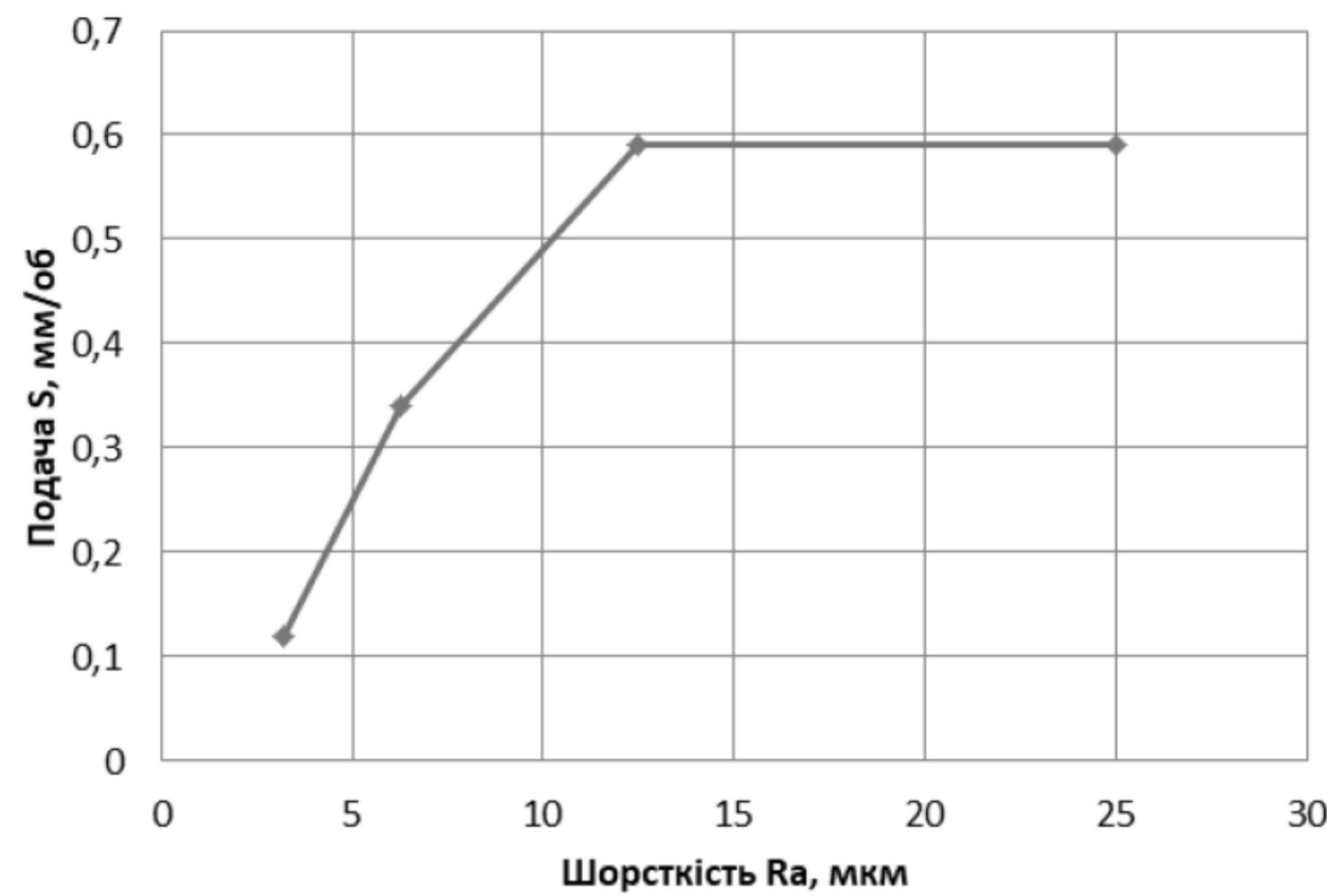
H	HF	B	LF	LH	WF	HBH	F1	MIID
25.0	25.0	25.0	150.0	28.0	32.0	7.0	32.0	CNMG 090408

Різець TAEGUTEC TCLNR 2525 M0904-TB

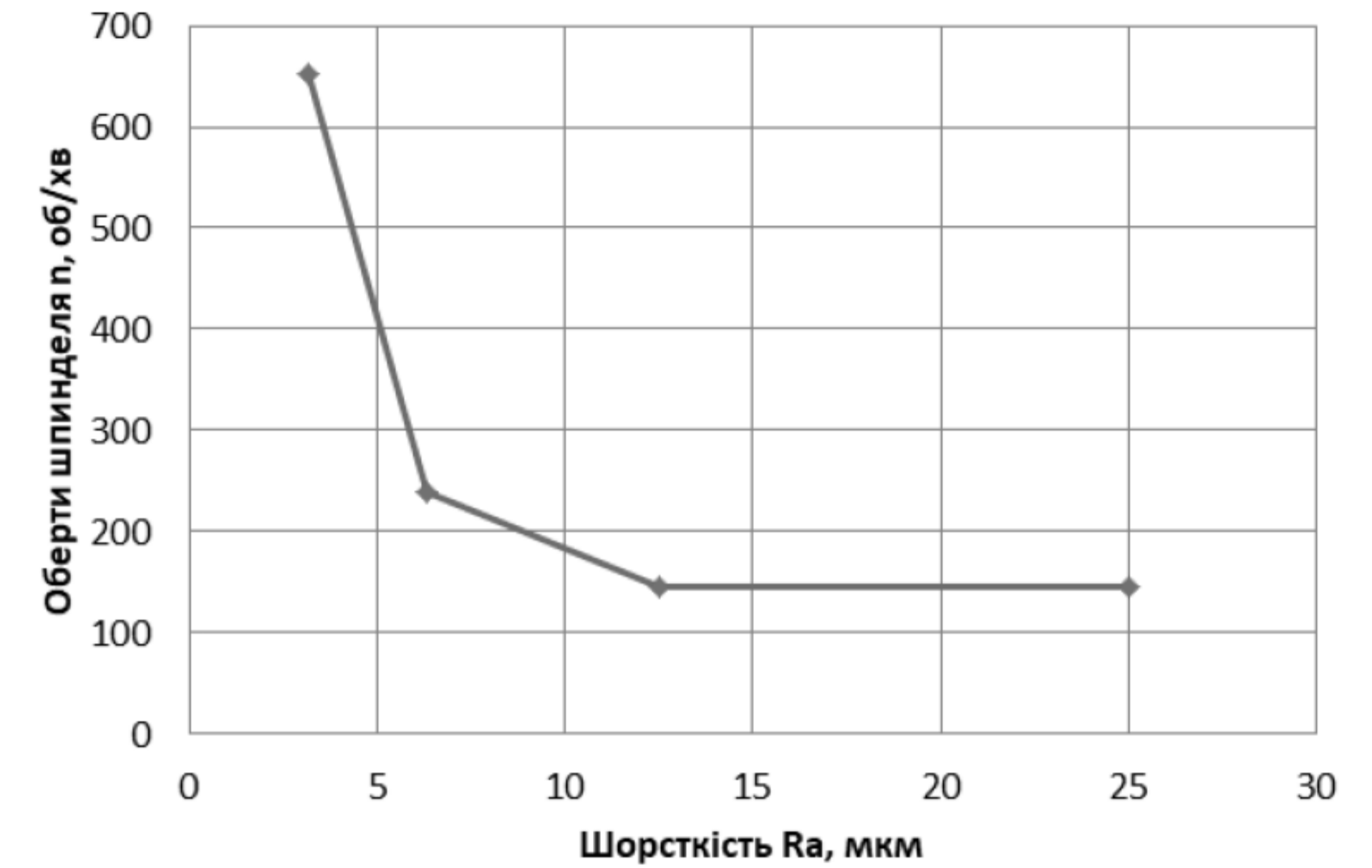


Позначення	IC	S	RE	ap (min)	ap (max)	ft (min)	ft (max)	Сплав
CNMG 090408	9.52	4.76	0.80	0.50	3.00	0.13	0.40	TT9235 TT9080 TT9225 TT5080 TT9215

Товщина пластини  $C_m = 4,76$  мм



Залежність подачі від шорсткості поверхні (товщина пластини  $C_m = 4,76$  мм)



Залежність частоти обертів шпинделя від шорсткості поверхні (товщина пластини  $C_m = 4,76$  мм)

$$n^{yv} \cdot S \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot k_v}{D \cdot \pi \cdot T^{mv} \cdot t^{xv}}$$

$$n^{yp} \cdot S^{np+1} \leq \frac{612^{np+1} \cdot N_B \cdot \eta}{C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np+1} \cdot \pi^{np+1}}$$

$$n^{yp} \cdot S^{np} \leq \frac{P_x \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{3,5 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot D^{np} \cdot \pi^{np}}$$

$$n^{yp} \cdot S^{np} \leq \frac{W \cdot \sigma \cdot 1000^{np} \cdot 100^{yp}}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^{xp} \cdot \pi^{np} \cdot D^{np} \cdot l_p}$$

$$n^{yp} \leq \frac{34 \cdot C_m^{1,35} \left(\frac{\sin 60}{\sin \varphi}\right)^{0,8}}{C_{pz} \cdot t^{xp-0,77}}$$

$$n^{0,58} \cdot S^{0,06} \leq \frac{Ra \cdot \pi^{0,06} \cdot D^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05} \cdot 100^{0,58}}{0,85 \cdot 1000^{0,06} \cdot t^{0,31} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}}$$

$$\ln(n) \geq \ln(n_{min})$$

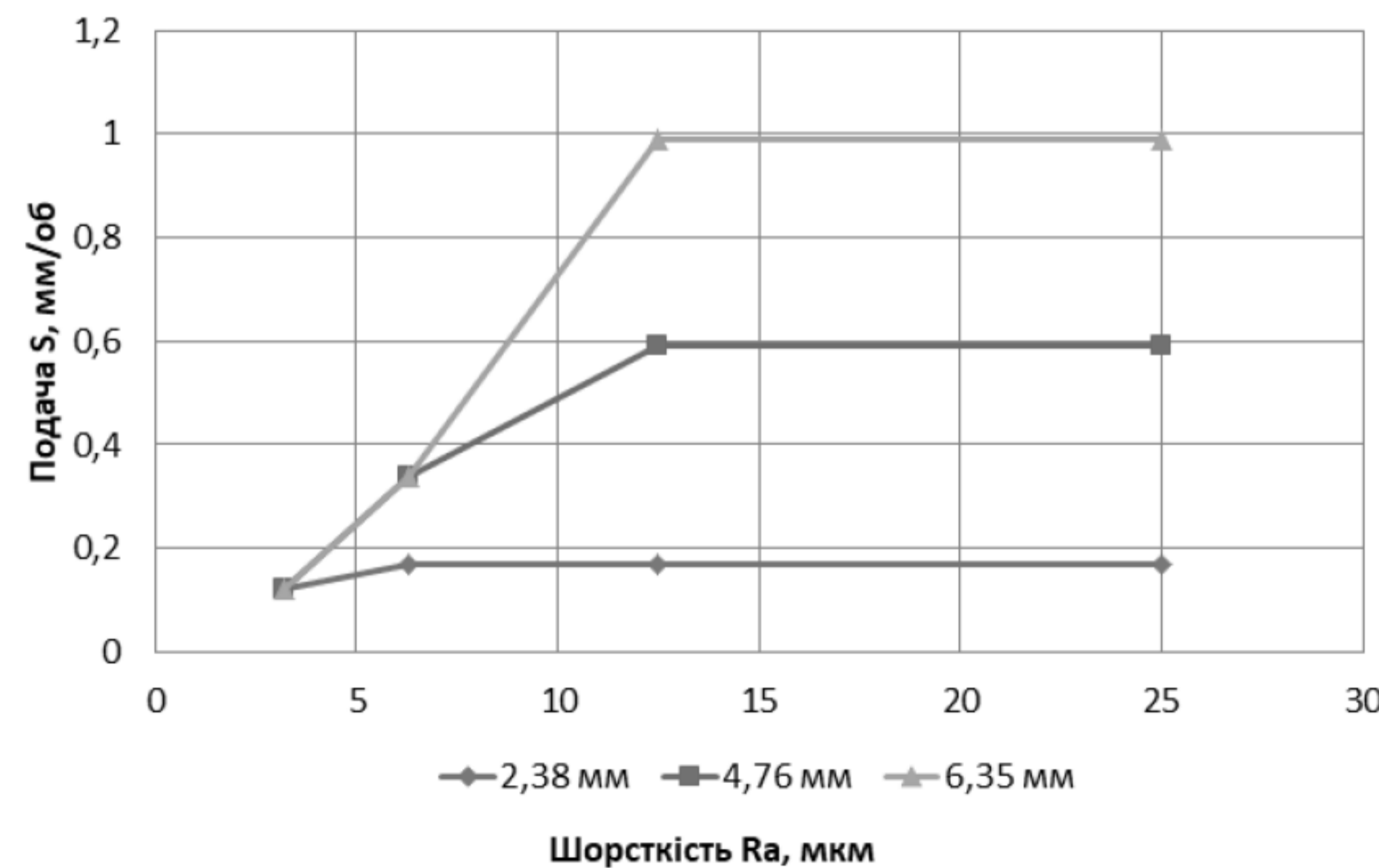
$$\ln(n) \leq \ln(n_{max})$$

$$\ln(S) \geq \ln(S_{min})$$

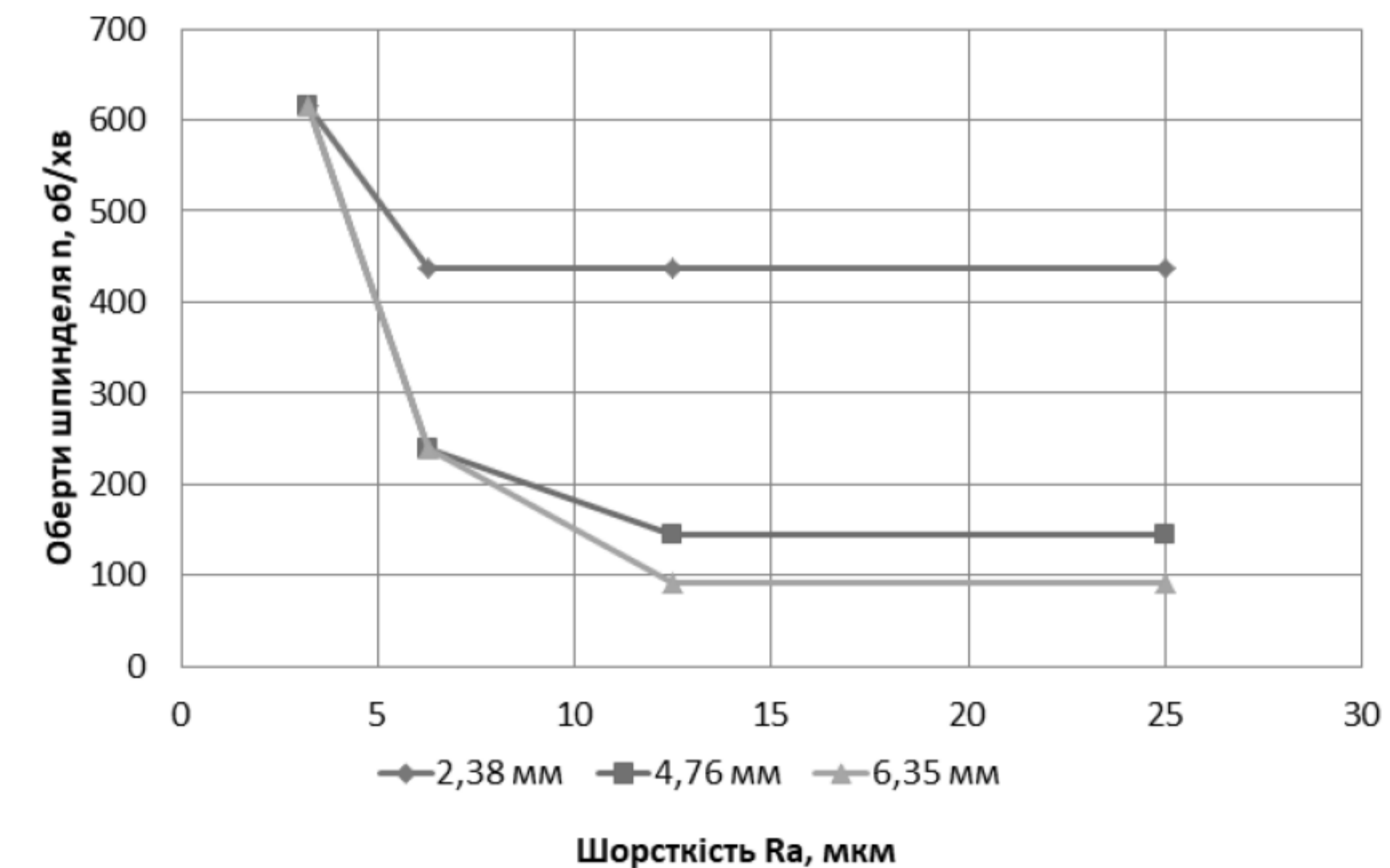
$$\ln(S) \leq \ln(S_{max})$$

$$F = \ln(n) + \ln(S) \rightarrow \max$$

Математична модель



Залежність подачі від шорсткості поверхні для пластин різної товщини



Залежність частоти обертів шпинделя від шорсткості поверхні для пластин різної товщини

ДОДАТОК Б  
(Маршрутна карта)

НТУ «ДП»	ТМБМЗ.131-ОНПМ.25.09		2070743.01140.00001
Вал			

«Затверджено»

Головний інженер ( )

« » \_\_\_\_\_ 2025 р.

# ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Виріб: Редуктор

УЗГОДЖЕНО:

Метрол. контроль \_\_\_\_\_ ( )

Вед. технолог \_\_\_\_\_ ( )

Н. контроль \_\_\_\_\_ ( )

Акт № \_\_\_\_ від «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис \_\_\_\_\_

Гол. спеціаліст \_\_\_\_\_ ( )

Нач. техбюро \_\_\_\_\_ ( )

Розробник \_\_\_\_\_ ( )

													1					
Розроб.					НТУ «ДП»			ТМБМ3.131-ОНПМ.25.09			2070743.01140.00001							
Перев.																		
Норм.																		
<b>Вал</b>																		
<b>М01</b>	Сталь 45 ДСТУ 7809:2015																	
<b>М02</b>	Код		ЕВ	МД	ЕН	Н. расх.	КВМ	Код загот.		Профіль та розміри			КД	МЗ				
	-		кг	21,19	1	3,5	0,85	штампування		Ø100×500			1	24,97				
<b>А</b>	Цех	Уч.	РМ	Опер	Код, найменування операції				Позначення документа									
<b>Б</b>	Код, найменування обладнання							СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОІД	ЕН	ОП	Кшт.	Тп.з.	Тшт.
А 03	2	6	2	005	4269, Фрезерно-центрувальна				ІОП ХХХ									
Б 04	041600, HAAS EC-400							-	18632	3	-	1	1	1	1,22			
05																		
А 06	2	7	2	010	4233, Токарна з ЧПК				ІОП ХХХ									
Б 07	041100, HAAS ST-25							-	18225	3	-	1	1	1	5,29			
08																		
А 09	2	7	2	015	4233, Токарна з ЧПК				ІОП ХХХ									
Б 10	041100, HAAS ST-25							-	18225	4	-	1	1	1	4,14			
11																		
А 12	2	8	1	020	4271, Шпонково-фрезерна				ІОП ХХХ									
Б 13	041600, HAAS VF-2							-	7233	4	-	1	1	1	7,58			
14																		
А 15	2	6	2	025	4114, Токарно-гвинторізна				ІОП ХХХ									
Б 16	041600, HAAS EC-400							-	18225	4	-	1	1	1	1,99			

														2		
Розроб.					НТУ «ДП»			ТМБМЗ.131-ОНПМ.25.09				2070743.01140.00001				
Норм.																
<b>А</b>	Цех	Уч.	РМ	Опер	Код, найменування операції				Позначення документу							
<b>Б</b>	Код, найменування обладнання				СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОІД	ЕН	ОП	Кшт.	Тп.з.	Тшт.	
А 03	3	6	1	030	5000, Термообробка				ІОП ХХХ							
Б 04	ХХХ, Піч															
05																
А 06	2	10	2	035	4131, Шліфувальна				ІОП ХХХ							
Б 07	041300, CORMAK MW 200×750				-	18873	4	-	1	1	1					8,31
08																
А 09	2	8	10	040	0125, Мийна											
Б 10	ХХХ, Мийна машина															
11																
12																
А 13	2	3	2	045	0220, Контрольна				ІОП ХХХ							
Б 14	ХХХ, Стіл ВТК				-		4	-	1	1	1					20
15																
А 16																
Б 17																
18																

ДОДАТОК В  
(Програма MathCad)

## Оптимізація режимів різання

### Вихідні дані:

- Твердість матеріалу:  $HB := 255$
- Глибина різання:  $t := 2.5 \text{ мм}$
- Обробл. діаметр:  $D := 100 \text{ мм}$
- Стійкість інструмента:  $T := 60 \text{ хв}$
- Шорсткість:  $Ra := 3.2 \text{ мкм}$
- Шлях різця:  $L := 300 \text{ мм}$
- Потужність електродвигуна:  $N_{ДВ} := 22.4 \text{ кВт}$
- ККД:  $\eta := 0.95$
- Головний та допоміжний кути в плані різця:  $\phi := 95 \quad \phi_1 := 10$
- Радіус при вершині інструменту:  $r := 0.8 \text{ мм}$
- Коефіцієнти для розрахунку швидкості різання V:  
 $C_v := 350 \quad x_v := 0.15 \quad m_v := 0.2 \quad y_v := 0.2 \quad k_v := 1.36$
- Коефіцієнти в формулі складової сили різання Pz:  
 $C_{pz} := 300 \quad x_{pz} := 1 \quad y_{pz} := 0.75 \quad n_{pz} := -0.15$
- Допустима сила за міцності слабкої ланки механізму подачі:  
 $P_x := 10000 \text{ Н}$
- Товщина ріжучої пластини:  $C_m := 4.76 \text{ мм}$
- Допустиме напруження на вигин:  $\sigma_{доп} := 200 \text{ МПа}$
- Розміри різця: висота -  $H := 25 \text{ мм}$  ширина -  $B := 25 \text{ мм}$
- Виліт різця:  $l_p := 20 \text{ мм}$
- Розрахунок моменту опору переріза різця:

$$W := \frac{BH^2}{6} \quad (\text{мм}^3)$$

**- Обмеження:**

$$f(x_1, x_2) := x_1 + x_2 \quad \text{цільова функція}$$

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1$$

Given

$$1. \quad yv \cdot x_1 + x_2 \leq \ln \left( \frac{1000 \cdot Cv \cdot kv \cdot 100^{yv}}{D \cdot \pi \cdot T^{mv} \cdot t^{xv}} \right)$$

$$2. \quad ypz \cdot x_1 + (npz + 1) \cdot x_2 \leq \ln \left[ \frac{612 \cdot (1000)^{(npz+1)} \cdot N_{дв} \cdot \eta \cdot 100^{ypz}}{C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot D^{(npz+1)} \cdot \pi^{(npz+1)}} \right]$$

$$3. \quad ypz \cdot x_1 + npz \cdot x_2 \leq \ln \left( \frac{P_x \cdot 1000^{npz} \cdot 100^{ypz}}{3.5 \cdot C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot D^{npz} \cdot \pi^{npz}} \right)$$

$$4. \quad ypz \cdot x_1 + npz \cdot x_2 \leq \ln \left( \frac{W \cdot \sigma_{доп} \cdot 1000^{npz} \cdot 100^{ypz}}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot \pi^{npz} \cdot D^{npz} \cdot l_p} \right)$$

$$5. \quad ypz \cdot x_1 \leq \ln \left[ \frac{34 \cdot C_m^{1.35} \cdot \left( \frac{\sin \left( 60 \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\sin \left( \phi \cdot \frac{\pi}{180} \right)} \right)^{0.8} \cdot 100^{ypz}}{C_{pz} \cdot t^{(x_{pz}-0.77)}} \right]$$

$$6. \quad 0.58 \cdot x_1 - 0.06 \cdot x_2 \leq \ln \left[ \frac{Ra \cdot (\pi \cdot D)^{0.06} \cdot r^{0.65} \cdot HB^{0.05} \cdot 100^{0.58}}{0.85 \cdot 1000^{0.06} \cdot t^{0.31} \cdot \phi^{0.4} \cdot \phi_1^{0.4}} \right]$$

$$7. \quad \ln(100 \cdot 0.05) \leq x_1 \leq \ln(100 \cdot 4)$$

$$8. \quad \ln(10) \leq x_2 \leq \ln(6000)$$

$$u := \text{Maximize}(f, x_1, x_2)$$

$$u = \begin{pmatrix} 2.445 \\ 6.422 \end{pmatrix}$$

$$s := \frac{e^{u_{0,0}}}{100}$$

$$n := e^{u_{1,0}}$$

**Оптимальні значення:**

Подача:  $s = 0.12 \left( \frac{\text{мм}}{\text{об}} \right)$  Частота обертання шпинделя:  $n = 615.42 \left( \frac{\text{об}}{\text{хв}} \right)$

Швидкість різання:

$$v := \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad v = 193.341 \left( \frac{\text{м}}{\text{хв}} \right)$$

ДОДАТОК Г  
(Специфікація)



ДОДАТОК Д  
(Відгук, рецензія)