Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Дослідження похибок формоутворення при шліфуванні золотників з переривчастими поверхнями»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року
магістратури групи ПМ-25Мз-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності G9 «Прикладна механіка»
_____ Богдан ХРИСТЕНКО

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент: _____
_____

Кро

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Христенко Богдан Вікторович
Сертифікат: 18DF2C9B93CEA20404000000A7043400A7B16E06
Дійсний з 16.11.2026 18:56:51 по 16.11.2027 18:56:50

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	G «Інженерія, виробництво та будівництво»
Спеціальність	G9 «Прикладна механіка»
Освітньо-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗДОБУВАЧА
Богдана Вікторовича Христенка
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження похибок формоутворення при шліфуванні золотників з переривчастими поверхнями
2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Олександр Скібінський
3. Строк подання роботи до захисту « » _____ 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: дослідження процесу шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь, аналіз причин виникнення похибок форми при обробці, аналіз методів їх зменшення та розробка рекомендацій по зменшенню або усуненню причин виникнення похибок форми на прикладі шліфування переривчастих поверхонь деталі золотник.

Завдання:

– виконати опис процесу шліфування;
– проаналізувати причини виникнення похибок форми при шліфуванні;
– виконати пошук відомих методів зменшення похибок форми;
– проаналізувати базову технологію обробки деталі золотник, виявити його переваги та недоліки, спроєктувати прогресивний технологічний процес, вибрати металорізальні верстати, затискні, допоміжні та контрольні пристрої, розрахувати припуски, режими різання та норми часу;
– запропонувати або обрати метод зменшення похибки форми при шліфуванні переривчастих поверхонь золотника.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 2	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 3	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 4	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 5	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Вересень 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Вересень 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Вересень-жовтень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Жовтень 2026	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Жовтень-листопад 2026	вик.
6	РОЗДІЛ 5	Листопад 2026	вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Листопад 2026	вик.
8	Графічна частина	Листопад-грудень 2026	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Олександр Скібінський
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2026 р.

Здобувач _____ Богдан ХРИСТЕНКО
(підпис)

Анотація

Христенко Б.В. Дослідження похибок формоутворення при шліфуванні золотників з переривчастими поверхнями: кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: спец. G9 «Прикладна механіка» / наук. кер. О. І. Скібінський; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2026. – 114 с. Матеріали презентації 7 креслень.

Метою роботи є дослідження процесу шліфування поверхонь в тому числі переривчастих, аналіз причин виникнення похибок форми та розробка рекомендацій по зменшенню похибок форми на прикладі шліфування переривчастих поверхонь деталі золотник.

В роботі виконано: опис процесу шліфування циліндричних поверхонь; розглянуто причини виникнення похибок форми таких як огранювання, циліндричність, хвилястість; виконано пошук відомих досліджень методів зменшення похибок форми при обробці зовнішніх циліндричних поверхонь шліфуванням; проаналізовано базову технологію виготовлення деталі золотник, виявлено його переваги та недоліки; розроблено прогресивний удосконалений технологічний процес; вибрані металорізальні верстати, різальні та вимірювальні інструменти, затискні, допоміжні та контрольні пристрої; розраховано припуски, режими різання та норми часу; на основі аналізу методів зменшення похибок форми при шліфуванні запропоновано методи, що забезпечують покращення точності форми; виконано необхідні економічні розрахунки.

Актуальність: підвищення точності форми поверхонь золотника, які шліфуються безцентровим способом, шляхом зменшення або усунення огранювання та некруглості при шліфуванні переривчастих поверхонь.

Практична цінність: запропонований вибір висоти центра деталі та кута скосу ножа, а також режими безцентрового шліфування дають змогу зменшити ризик огранювання й некруглості на шийках золотника. Розрахунок потужності та умов жорсткості показує, чи не перевищують режими можливості верстата, і допомагає уникнути термічного припікання поверхні.

Ключові слова: шліфування, безцентрове шліфування, огранювання, опорний ніж, похибка форми.

Annotation

Bohdan KHRYSTENKO. A study of shaping errors during the grinding of spool valves with irregular surfaces. Master's Thesis: CNTU, 2026. - 114 p. Presentation materials 7 il.

The research methodology involves studying the surface grinding process—including the grinding of interrupted surfaces—analyzing the causes of form errors, and developing recommendations to mitigate these errors, specifically in the context of grinding the interrupted surfaces of spool-type components.

The work includes: a description of the cylindrical surface grinding process; an identification of the causes of form errors, such as lobing (polygonal shape), deviations from true cylindricity, and waviness; a review of existing methods for investigating and reducing form errors during the external cylindrical grinding process; an analysis of the baseline manufacturing technology for spool components, including its advantages and disadvantages; the development of an advanced, improved manufacturing process; the selection of machine tools, cutting and measuring tools, as well as work-holding, auxiliary, and inspection fixtures; the calculation of machining allowances, cutting parameters, and time standards; the proposal of methods to improve form accuracy based on an analysis of existing error-reduction techniques; and the performance of economic calculations.

Relevance: Improving the form accuracy of spool component surfaces processed via centerless grinding by reducing or eliminating lobing and non-circularity when grinding interrupted surfaces.

Practical Value: The proposed selection of the workpiece center height and the blade bevel angle, combined with optimized centerless grinding parameters, helps reduce the risk of lobing and non-circularity on the journals (lands) of spool components. Calculations of power and rigidity conditions determine whether the operating modes exceed the machine tool's capabilities and help prevent thermal burning of the surface.

Keywords: grinding, centerless grinding, lobing, work rest blade, form error.

ЗМІСТ

ВСТУП……..... 7

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ, ВИДИ ШЛІФУВАННЯ ТА ШЛІФУВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ……..…… 8

1.1. Загальна характеристика процесу шліфування..... 8

1.2. Переваги та недоліки різних видів шліфування…… 14

1.3. Особливості процесу шліфування ……..... 17

1.4. Шліфувальний інструмент…….. 19

1.5. Правка шліфувальних кругів…….. 23

1.6. Постановка задач дослідження……..… 25

РОЗДІЛ 2. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ПОХИБОК ФОРМИ ТА МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК І ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ БЕЗЦЕНТРОВОМУ ШЛІФУВАННІ……..…… 26

2.1. Причини виникнення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні..... 26

2.2. Методи зменшення похибок форми ……..…… 27

2.3. Висновки…….…..... 45

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ЗОЛОТНИК..... 46

3.1. Службове призначення та характеристика золотника.....……..…….. 46

3.2. Розробка технології виготовлення золотника..... 48

3.3. Висновки……..... 76

РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМИ ПЕРЕРИВЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ ЗОЛОТНИКА ПРИ ВРІЗНОМУ БЕЗЦЕНТРОВОМУ ШЛІФУВАННІ…….…… 78

4.1. Вибір методу забезпечення точності форми та схема безцентрового шліфування золотника……..... 78

4.2. Розрахунок геометричної стабільності процесу та вибір налаштування….. 82

4.3. Режими шліфування та перевірка умов жорсткості й потужності……. 84

4.4. Висновки……..... 87

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ…. 89

5.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження…….. 89

5.2. Розрахунок календарно-планових нормативів……..... 90

5.3. Визначення чисельності основних робітників цеху……. 93

5.4. Аналіз варіантів технологічного процесу……..…….. 94

5.5. Розрахунок планової цехової собівартості деталі……..…… 104

5.6. Планування підсумкових техніко-економічних показників……...…... 106

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 108

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 109

ВСТУП

Золотники гідророзподільників належать до відповідальних прецизійних деталей гідравлічних систем тракторів та іншої мобільної техніки. Від точності форми, розмірів і якості їх циліндричних поверхонь залежать герметичність спряжень, величина внутрішніх витоків робочої рідини, плавність переміщення золотника та загальна надійність розподільника. Остаточну обробку таких поверхонь виконують шліфуванням, яке забезпечує високу продуктивність і стабільність розмірів у серійному виробництві. Особливістю золотників є наявність на шліфованих поверхнях канавок, пазів і отворів, що робить шліфування переривчастим.

В роботі необхідно розглянути процес шліфування. Проаналізувати причин виникнення похибок форми при шліфуванні. Виконати пошук відомих досліджень методів зменшення похибок форми при обробці зовнішніх циліндричних поверхонь шліфуванням. Виконати аналіз базової технології виготовлення деталі золотник із виявленням його переваг та недоліків. Розробити технологічний процес обробки деталі золотник, що забезпечує задані кресленням деталі параметри точності та якості поверхонь, а зовнішня циліндрична поверхня підлягає шліфуванню. На основі аналізу методів зменшення похибок форми при шліфуванні запропонувати методи для розробленої шліфувальної операції, що забезпечать покращення точності форми. Виконати необхідні економічні розрахунки.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ, ВИДИ ШЛІФУВАННЯ ТА ШЛІФУВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ

1.1. Загальна характеристика процесу шліфування

Шліфування – це метод чистової обробки поверхонь різанням. Зняття припуску відбувається абразивними зернами, що закріплені у зв'язці інструмента – шліфувального круга. Абразивні зерна в робочому шарі інструмента розташовані нерегулярно та мають довільну форму.

Шліфування забезпечує точність до 7-го квалітету та шорсткість Ra 1,25…0,32 мкм, тонке – до 6-го квалітету та Ra 0,32…0,08 мкм. Тонке шліфування виконують м'якими дрібнозернистими кругами при швидкості круга понад 40 м/с, швидкості обертання деталі до 10 м/хв і глибині різання до 5 мкм за робочий хід із посиленим охолодженням.

Під час шліфування виконується чорнова та чистова обробка, а також вихаджування. Завершальним етапом циклу шліфування, який відіграє вирішальну роль у забезпеченні високої точності та якості обробленої поверхні, є процес вихаджування. Фізична сутність цього етапу полягає в обробці заготовки за відсутності поперечної врізної подачі, коли новий припуск більше не подається, а інструмент продовжує виконувати коловий та поздовжній рух різання.

Необхідність застосування вихаджування зумовлена наявністю пружних деформацій у технологічній системі «верстат–пристосування–інструмент–деталь» (ВПІД), що виникають під дією радіальної сили різання під час основного етапу знімання матеріалу. Внаслідок цих відтисків реальна глибина різання завжди виявляється меншою за величину, задану механізмами верстата. Після відключення поперечної подачі накопичена пружна енергія елементів системи починає поступово вивільнятися, а система повертається у недеформований стан, витискаючи інструмент до заготовки. При цьому шліфувальний круг продовжує знімати мікроскопічний шар залишкового припуску, а радіальна сила різання монотонно падає практично до нуля.

Оскільки товщина недеформованої стружки, що зрізується окремим абразивним зерном, зменшується з кожним наступним обертом деталі, на циліндричній поверхні

формується згладжений мікрорельєф із мінімальними значеннями параметрів шорсткості Ra. Крім того, зниження силової та теплової напруженості на завершальних обертах запобігає виникненню локальних припіків і сприяє формуванню сприятливих залишкових напружень у поверхневому шарі.

Надмірне затягування часу вихаджування є технологічно недоцільним, оскільки після повного знімання пружного відтиску круг починає працювати в режимі сухого тертя, що призводить до інтенсивного засалювання абразиву, повторного нагрівання поверхні та появи теплових дефектів.

Зовнішні циліндричні поверхні оброблюють круглим шліфуванням та безцентрово. Кругле шліфування виконують двома способами: з поздовжньою подачею (рис. 1.1) та врізне (з поперечною подачею).

При шліфуванні з поздовжньою подачею деталь здійснює поздовжні переміщення почергово в обидва боки. Шліфувальний круг виконує поперечну подачу після кожного ходу. Поздовжня подача при попередньому шліфуванні становить 0,5…0,8, при остаточному – 0,2…0,5 висоти круга на оберт деталі; глибина різання – 0,005…0,02 мм за робочий хід. Цей спосіб є найпоширенішим для шліфування валів. Закріплення деталі відбувається двома способами: в центрах та в патроні.

При встановленні деталі в центрах (рис. 1.1. а, б, г), на торцях деталі свердлять центрові отвори. Деталь піджимається конусами передньої та задньої бабок верстата. Обертовий центр передньої або обох бабок застосовуються при чорновому або напівчистовому шліфуванні. При цьому похибка в підшипниках самого центра або люфт знижують точність обробки. При виконанні чистового або прецизійного шліфування центри лише утримують деталь, обертання їй надає хомутик, що надягається на лівий кінець вала. Хомутик зачіпляється за повідковий палець шпинделя. Точність обробки підвищується за рахунок виключення биття підшипників верстата.

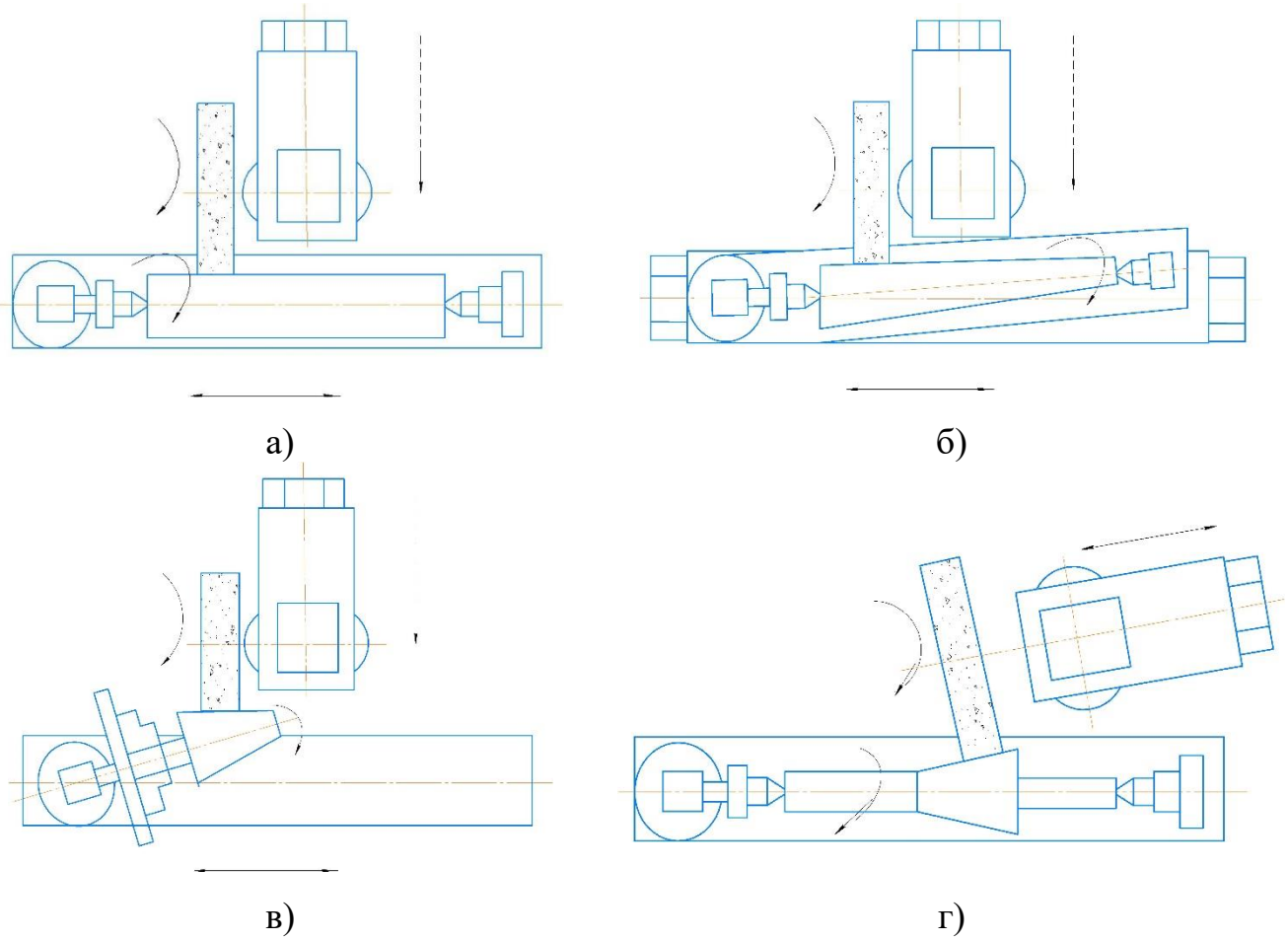


Рис. 1.1. Схеми круглошліфувальних операцій з поздовжньою подачею:
а – циліндричної деталі в центрах; б – конічної деталі в центрах верстата;
в – конічної деталі в патроні з поворотом шпиндельної бабки; г – конічної деталі з поворотом бабки шліфувального круга

В самоцентрувальному патроні (рис. 1.1 в), цанговому патроні або на магнітній планшайбі закріплюються короткі вали, втулки, диски і т. ін. Від шпинделя передньої бабки через патрон передається обертання оброблюваній деталі. Якщо деталь довга, її вільний кінець додатково підтримують люнетом.

При врізному шліфуванні (рис. 1.2) деталь жорстко затискається в центрах або патроні верстата, після чого шліфувальний круг подається радіально (перпендикулярно до осі обертання деталі) на всю ширину поверхні, що обробляється. Такий спосіб є найпродуктивнішим завдяки одночасній обробці всієї поверхні, його застосовують у масовому та багатосерійному виробництві.

Обертання шліфувального круга є головним рухом. Швидкість обертання круга 30-60 м/с. Оброблювана деталь обертається із коловою подачею навколо власної осі у

напрямку, протилежному до напрямку обертання шліфувального круга. Поперечна подача – постійне заглиблення круга в деталь до досягнення потрібного радіального розміру.

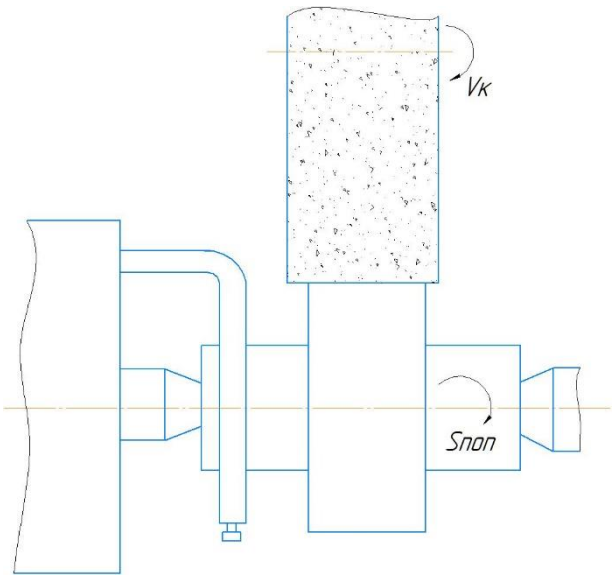
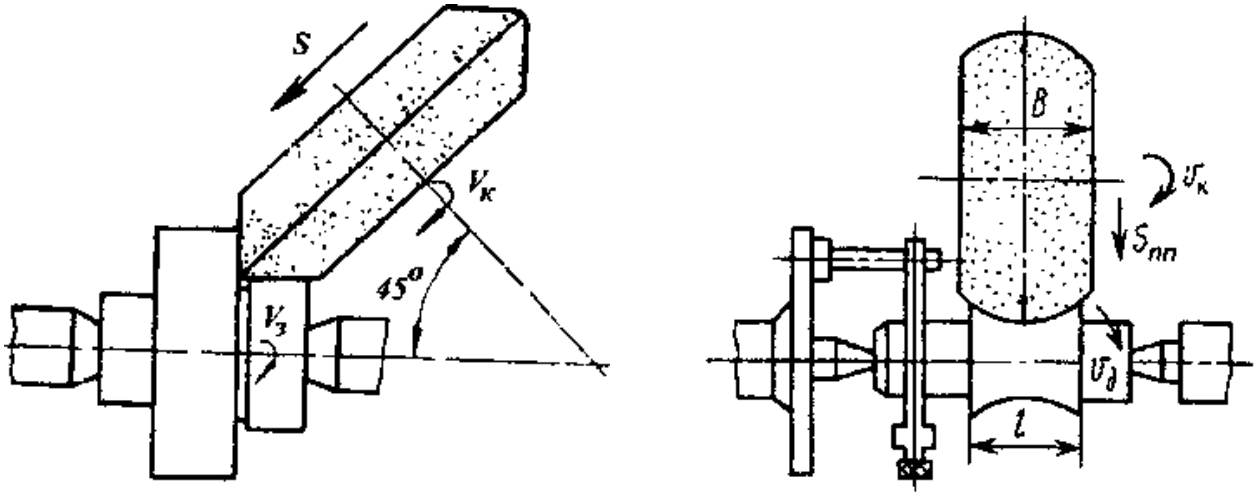


Рис. 1.2. Схема врізного круглого шліфування

Фасонними шліфувальними кругами можна отримати поверхні, що відповідають їх профілю (рис. 1.3). Для шліфування уступів і прилеглих шийок застосовують верстати з поворотною шліфувальною бабкою.



а) б)

Рис. 1.3. Схеми врізного шліфування:

а – одночасна обробка торцевої та циліндричної поверхонь; б – фасонних поверхонь

При безцентровому шліфуванні деталь 2 не закріплюють у центрах, вона лежить між шліфувальним 1 і ведучим 3 кругами на опорі у формі ножа 4 (рис. 1.4).

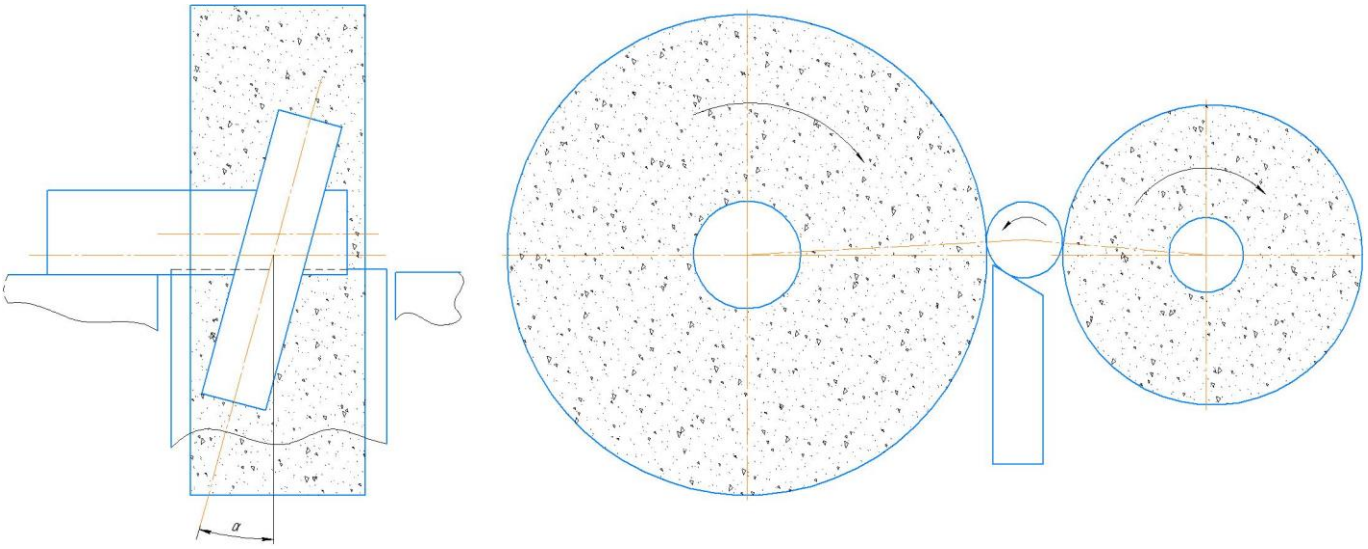


Рис. 1.4. Схема наскрізного безцентрового шліфування

Безцентровим шліфуванням оброблюють деталі без центрових отворів та деталі, що недоцільно базувати в патроні. Деталь базується своєю зовнішньою циліндричною поверхнею на опорному ножі між двома кругами та нічим не закріплюється.

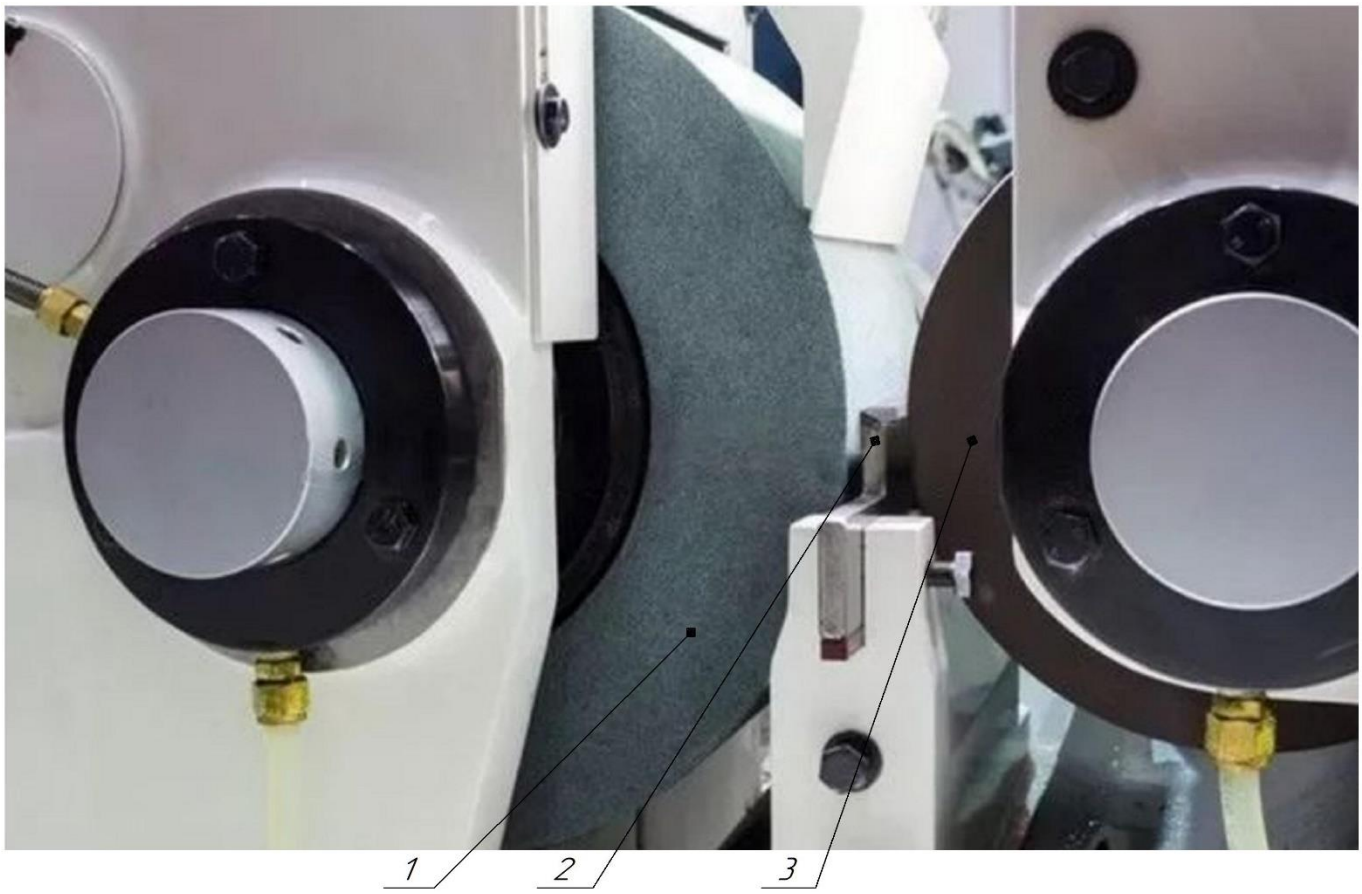


Рис. 1.5. Безцентрово-шліфувальний верстат:

1 – шліфувальний круг; 2 – опорний ніж; 3 – ведучий круг

Опорний ніж є базовою опорою для деталі під час обробки та забезпечує її точну орієнтацію та стабільність. Підтримує деталь знизу, приймає на себе радіальні та вертикальні сили різання, що виникають під час шліфування. Верхня робоча поверхня ножа виконується під кутом $\gamma = 30° - 45°$, рідше $\gamma = 15° - 30°$ - для важких деталей. Скіс робиться у бік ведучого круга, що створює розкладку сил, за якої деталь постійно притискається як до ножа, так і до ведучого круга. Товщина ножа має бути дещо меншою за діаметр заготовки. Таким чином, ніж не заважатиме контакту деталі з робочим та ведучим кругами.

Опорні ножі мають бути зносостійкими та витримувати обертання та ковзання поверхонь оброблюваної деталі по ним. Опорні ножі виготовляють із: швидкорізальних та інструментальних сталей (ХВГ, ШХ15, Р6М5); твердосплавними пластинами (ВК6, ВК8); спеціальних покриттів або кераміки.

При безцентровому шліфуванні центр деталі (рис. 1.4) розміщується вище лінії центрів кругів приблизно на $h = (0{,}25 - 0{,}5) \cdot D_{\text{дет}}$. При розміщенні центру деталі на лінії центрів кругів, деталь вийде тригранною. Якщо центр деталі розміщено занадто високо, то з’явиться ризик вихоплювання деталі з зони різання.

На поверхні ножа не повинно бути зношених канавок, викришувань чи задирок. Будь-який дефект на ножі залишить подряпини або сліди на шліфованій деталі.

Шліфувальний круг обертається з високою коловою швидкістю 30-60 м/с. Він закріплений на осі та не переміщується вздовж деталі під час обробки.

Ведучий круг виготовляється на гнучкій зв’язці, наприклад вулканіт або гума, з високим коефіцієнтом тертя. Ведучому кругу надається обертання з невеликою, 0,5-3 м/с швидкістю. Тертя ведучого круга із деталлю задає останній швидкість обертання, утримуючи її від шкідливого розгону під дією робочого круга.

Безцентрове шліфування поділяється на два види в залежності від напрямку подачі: наскрізне (напрохід), врізне.

При наскрізному (рис. 1.4) шліфуванні ведучий круг встановлюється під кутом

$$\alpha = 1° - 5°.$$

Такий нахил ведучого круга створює осьову силу, яка забезпечує поздовжнє переміщення «протягування» оброблюваних деталей по площині опорного ножа із

подачею 0,5-1,5 м/хв. Обробка виконується за 1-2 проходи. Деталі потрапляють в зону обробки послідовно. Такий вид безцентрового шліфування застосовують для обробки гладких циліндричних поверхонь без ступенів та виступів (гладкі валики, поршневі пальці, ролик підшипника, дроти).

При врізному безцентровому шліфуванні поздовжнє переміщення деталі відсутнє. Заготовка кладеться в зону обробки на опорний ніж, після чого відбувається радіальне зближення кругів. Осі кругів практично паралельні. Кут нахилу ведучого круга мінімальний і становить $\alpha = 0{,}5° - 1°$ для притискання деталі до упору. Подача здійснюється за рахунок радіального зближення ведучого або робочого круга в напрямку до деталі.

Шліфувальний круг одразу обробляє всю ширину поверхні та подається радіально (перпендикулярно до осі обертання деталі). Такий спосіб є найпродуктивнішим завдяки одночасній обробці всієї поверхні, його застосовують у масовому та багатосерійному виробництві.

Шліфувальний круг обертається зі швидкістю 30-60 м/с, ведучий – 30-50 м/хв при чорновому шліфуванні та 15-25 м/с – при чистовому. Припуск на чорнове шліфування становить 0,05-0,15 мм, на чистове – 0,005-0,02 мм.

Врізне безцентрове шліфування найчастіше застосовується для обробки деталей зі східчастим, конічним або фасонним профілем.

1.2. Переваги та недоліки різних видів шліфування

Основними перевагами безцентрового шліфування є:

- відсутні витрати часу на базування та закріплення деталі в кулачках або центрах;
- менші вимоги до деталі через відсутність необхідності у центрових отворах на її торцях;
- підвищення точності обробки за рахунок відсутності похибки співвісності центрувальних отворів;
- відсутність деформації деталі від закріплення в затискному елементі;

- відсутність прогину деталі та утворення бочкоподібності або конусоподібності за рахунок того, що деталь лежить всією своєю поверхнею на опорному ножі;

- можливість обробки маложорстких, довгих та тонких деталей, голок чи тонкостінних труб без використання люнетів;

- процес наскрізного шліфування дає змогу подавати деталі безперервним потоком через бункери та автозавантажувачі;

- висока стабільність допусків в усій партії деталей через те, що шліфувальний круг розрахований на тривалу роботу без зміни положення бабки. Отже, розмірний знос абразиву розподіляється на велику кількість деталей;

- відсутність автоколивань та прогину зменшує термічне навантаження на поверхневий шар металу, що зменшує рівень мікротріщин;

- можна використовувати круги більшого діаметра та ширини, що забезпечує більшу площу контакту, кращий відвід тепла та повільніший знос абразиву.

До недоліків безцентрового шліфування можна віднести:

- вимога точного настроювання висоти ножа, кутів нахилу ведучого круга та профілювання кругів;

- заготовка повинна мати вихідну форму, близьку до циліндричної;

- базування здійснюється одночасно по трьох лініях контакту: з робочим (шліфувальним) кругом, ведучим (регулювальним) кругом та опорним ножем (підкладкою). Така механіка викликає специфічні похибки поперечного перерізу, серед яких домінують геометричне огранювання, хвилястість та некруглість.

Обробка шліфуванням переривчастих поверхонь має свої особливості. Для круглошліфувальної обробки переривчастих поверхонь характерні такі недоліки:

- ударні навантаження та викришування круга;

- дефекти форми – «завали» країв пазів та огранювання;

- автоколивання та сильна вібрація.

При кожному переході шліфувального круга через паз, канавку або лиску відбувається серія мікроударів. Це призводить до прискореного зносу, викришування абразивних зерен та втрати форми профілю круга.

У момент, коли круг проходить над канавкою або пазом радіальна сила різання (P_y) різко падає, а після відновлення контакту – знову зростає. Стрибки віджимання деталі викликають деформації, через що на краях пазів утворюються «завали» (перешліфування країв) та відхилення від круглості.

Переривчастий контакт шліфувального круга із оброблюваною поверхнею деталі викликає сильні динамічні коливання системи «верстат-пристосування-інструмент-деталь» (ВПІД). Це залишає на обробленій поверхні сліди вібрації та суттєво погіршує шорсткість.

При врізному безцентровому шліфуванні переривчастих поверхонь, можна виділити наступні переваги:

- відсутність ударних навантажень на абразив адже круг одразу обробляє всю ширину переривчастої поверхні та подається радіально. Робочий шліфувальний круг працює у режимі стабільного безударного різання. Це зберігає його стійкість та геометричну точність;

- можливість одночасної обробки декількох шийок. Можна використовувати один шліфувальний круг (або набір кругів із проставкою), щоб за один врізний хід відшліфувати всі циліндричні шийки, розділені канавками.

На ряду з перевагами, врізне безцентрове шліфування переривчастих поверхонь має й недоліки:

- нерівномірний знос шліфувального круга. Краї канавок створюють підвищену концентрацію напружень та працюють як різці. На робочій поверхні шліфувального круга саме в зонах, де відбувається обробка країв канавок, виникає прискорене та інтенсивніше викришування абразивних зерен;

- на гострих краях канавки після шліфування можуть утворюватися невеликі задирки, що вимагає додаткової операції зняття фасок чи галтелей.

1.3. Особливості процесу шліфування

При врізному шліфуванні абразивний круг шириною b подається в радіальному напрямку з постійною швидкістю поперечної подачі v_f (мм/хв або мм/об заготовки) до заготовки діаметром d_w, яка обертається зі швидкістю v_w (рис. 1.6).

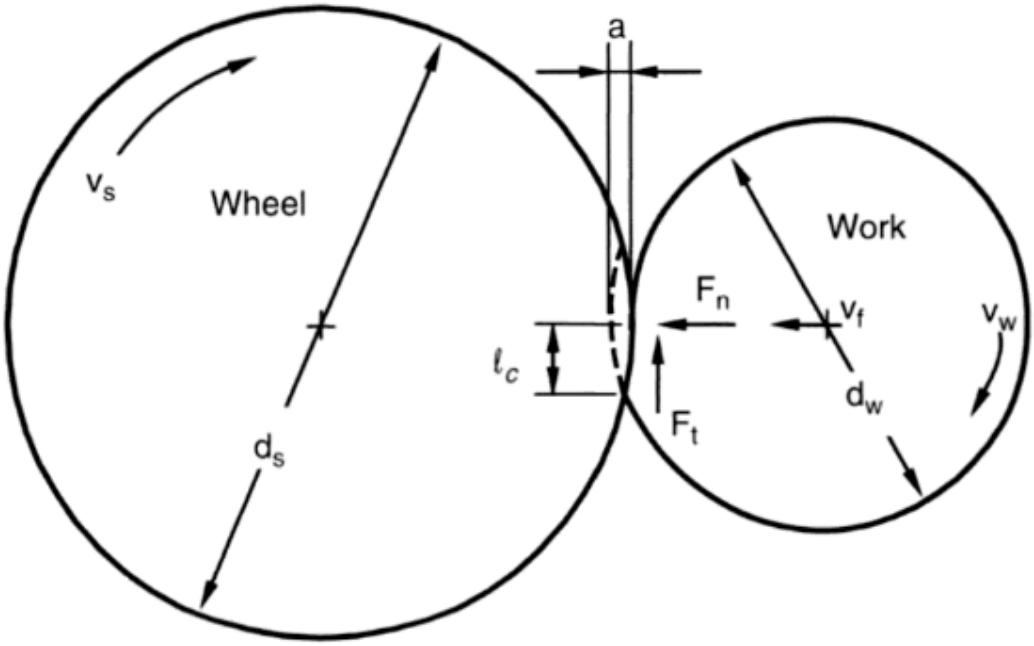


Рис. 1.6. Сили різання при врізному шліфуванні [32]

Результуюча сила різання F розкладається на три ортогональні складові: дотичну (тангенціальну), нормальну (радіальну) та осьову сили.

Дотична (тангенціальна) сила F_t (P_z) діє вздовж вектора швидкості обертання шліфувального круга v_s. Визначає потужність шліфування P_c та тепловиділення в зоні контакту.

Потужність шліфування P_c визначається за формулою:

$$P_c = F_t \cdot v_s$$

Нормальна (радіальна) сила F_n (P_y) спрямована вздовж радіуса круга та заготовки, перпендикулярно до лінії контакту. Спричиняє пружну деформацію (віджимання) технологічної системи ВПІД і безпосередньо впливає на точність геометричної форми заготовки та шорсткість поверхні.

Осьова сила F_a (P_x) спрямована вздовж осі заготовки. При врізному шліфуванні, коли ширина круга більша за довжину шліфування, $F_a \approx 0$.

На відміну від точіння чи фрезерування, при шліфуванні нормальна сила завжди більша за тангенціальну

$$\frac{F_n}{F_t} = 1{,}5 \ldots 4{,}0$$

Таке співвідношення пояснюється значною питомою вагою пластичного деформування та тертя без утворення стружки.

Тангенціальна сила F_t виражається через питому енергію шліфування u та об'ємну продуктивність знімання матеріалу Q_w.

Тангенціальна сила F_t визначається за формулою:

$$F_t = \frac{u \cdot Q_w}{v_s}$$

де Q_w – об'ємна продуктивність знімання матеріалу [32]:

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot b \cdot v_f;$$

u – питома енергію шліфування:

$$u = u_c + u_p + u_r$$

де u_c – питома енергія стружкоутворення (мікрорізання);

u_p – питома енергія пластичної деформації;

u_r – питома енергія тертя затуплених площадок зерен об деталь.

Нормальна сила F_n визначається як сума сили різання та сили тертя площадками затуплення:

$$F_n = \frac{F_t}{\mu} + F_{nt}$$

де μ – коефіцієнт тертя при стружкоутворенні;

F_{nt} – сила тертя.

Стружкоутворення здійснюється великою кількістю зерен, що довільно розташовані на поверхні шліфувального круга. Параметри зрізу окремим зерном, тобто, максимальна товщина недеформованої стружки залежать від різних чинників. Серед основних виділяють: кінематику процесу, глибину різання, довжину контакту та топографію круга. Поряд зі зрізанням відбуваються ковзання та пластичне відтиснення матеріалу.

Майже вся енергія шліфування перетворюється на тепло. Таке перетворення енергії призводить до температурних пошкоджень поверхні: припікання, відпуску, повторного гартування та залишкових напружень. Для зниження та усунення таких пошкоджень застосовують змащувально-охолоджувальні рідини (ЗОР).

Зношування круга відбувається внаслідок руйнування зерен і зв'язки. Воно призводить до зміни топографії круга та сил різання. Такі зміни негативно впливають на точність обробки, погіршуючи її.

1.4. Шліфувальний інструмент

Шліфувальний круг складається з абразивних зерен, зв'язки та пор (рис. 1.7). Властивості круга визначаються типом абразиву, розміром зерна, твердістю (ступенем зв'язування зерен), структурою та типом зв'язки. Ці характеристики входять до маркування круга. Форми, позначення та маркування зв'язаних абразивних виробів, а також вимоги до їхнього маркування регламентує ISO 525:2020 [18].

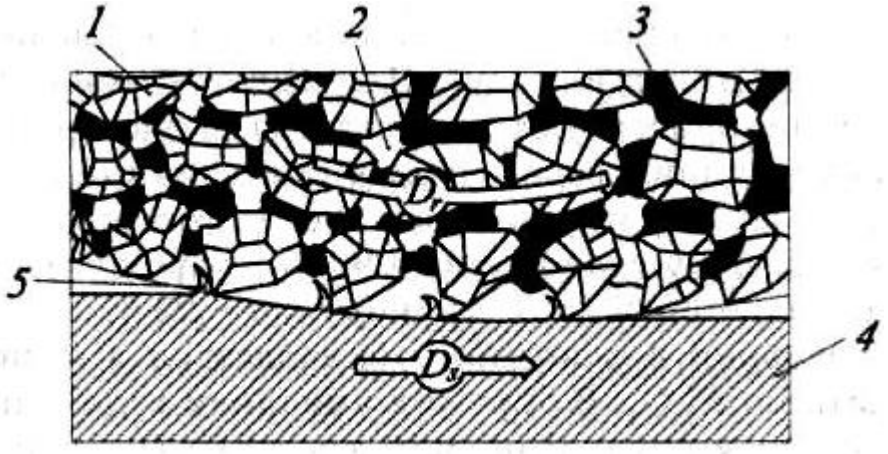


Рис. 1.7. Схема будови шліфувального круга: 1 – абразивне зерно; 2 – пора; 3 – зв'язка; 4 – заготовка; 5 – стружка

Зернистість - розмір зерна, обирають залежно від вимог до продуктивності та шорсткості. Для чорнової обробки – крупніше зерно, а для чистової обирають дрібніше. Зернистість регламентується ISO 8486-1:1996 [19] і позначається F4…F220.

Зв’язка поділяється на два види: неорганічну та органічну. До неорганічної відносять керамічну зв’язку, а до органічних зв’язок належать вулканітова та бакелітова. Керамічна зв’язка є найпоширенішою завдяки можливості регулювати пористість та структуру. Твердість круга характеризує міцність утримання зерна зв’язкою, а не твердість абразиву.

Типи та профілі кругів встановлює ISO 525:2020 [18]. В залежності від форми оброблюваної поверхні та способу шліфування обирають шліфувальний круг певного профілю (рис. 1.8): прямого, з двостороннім конічним профілем; з конічним профілем; з виточкою; кільцевий тощо.

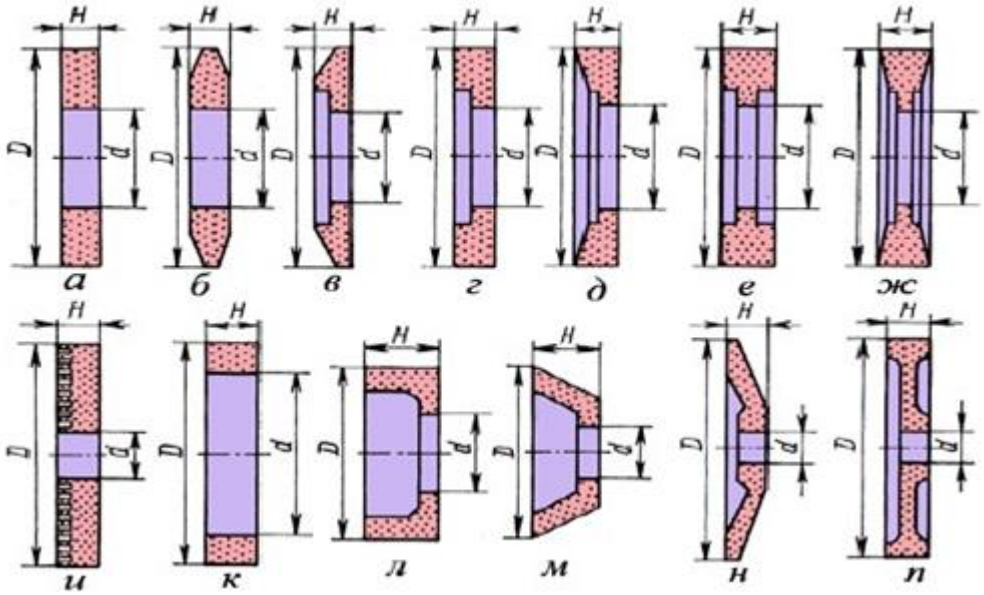


Рис. 1.8. Форми поперечних перерізів шліфувальних кругів:
а – прямий (ПП); б – з двостороннім конічним (2П); в – з конічним (ЗП);
г – з виточкою (ПВ); д – з конічною виточкою (ПВК); е – з двосторонньою виточкою (ПВД); ж – з двосторонньою конічною виточкою (ПВДК); и – спеціальний;
к – кільцевий (К); л – чашковий циліндричний (ЧЦ); м – чашковий конічний (ЧК);
н – тарілчастий (Т); п – з двосторонньою виточкою та маточиною (ПВДМ)

Габаритні параметри кругів охоплюють зовнішні діаметри від 3 до 1100 мм, ширину від 0,18 до 250 мм, а також посадочні отвори від 1 до 305 мм.

Найбільш поширеними є плоскі круги прямого профілю (ПП), які застосовують для круглого зовнішнього, внутрішнього та безцентрового шліфування, а також для плоского шліфування периферією інструмента та заточування. У випадку заточування

робочою поверхнею можуть слугувати як циліндрична, так і торцеві грані. Для обробки зубців шестерень і шліфування різьби використовують плоскі круги з двостороннім конічним профілем (2П).

Конструкція плоских кругів із виточкою (ПВ) та двосторонньою виточкою (ПВД) дозволяє розмістити в заглибленнях затискні фланці. Це забезпечує більш вільний підвід інструмента до заготовки і дозволяє поєднувати кругле шліфування з підрізуванням торця. Круги форми ПВД додатково застосовують у безцентровому шліфуванні як ведучі круги.

Циліндричні круги-чашки (ЧЦ) завдяки надійному фланцевому кріпленню до шпинделя використовують для заточування інструментів і плоского шліфування торцем. Конічні круги-чашки (ЧК) призначені для аналогічних завдань – заточування та плоского шліфування, де робота виконується торцем. Внаслідок малої площі такий торець легко піддається правці, а конічна форма самої чашки суттєво полегшує підведення інструмента до робочої зони. Для заточування гвинтових поверхонь різальних інструментів застосовують тарілчасті круги (2Т), які мають дві конічні поверхні, що значно спрощує їхню правку по робочій конічній поверхні.

Робоча поверхня круга утворена зернами, які виступають зі зв’язки на різну висоту (рис. 1.9). В процесі шліфування лише активні зерна приймають участь. Топографію круга, тобто геометричну структуру та стан його робочої поверхні, що безпосередньо контактує з оброблюваною деталлю, характеризує розподіл зерен за радіальною координатою та відстанню між активними зернами. Формування топографії виконується правкою та змінюється внаслідок зношування, коли на зернах утворюються площадки спрацювання. Неоднорідність топографії впливає на товщину зрізу окремим зерном. Окреме зерно має нерегулярну форму з округленою вершиною.

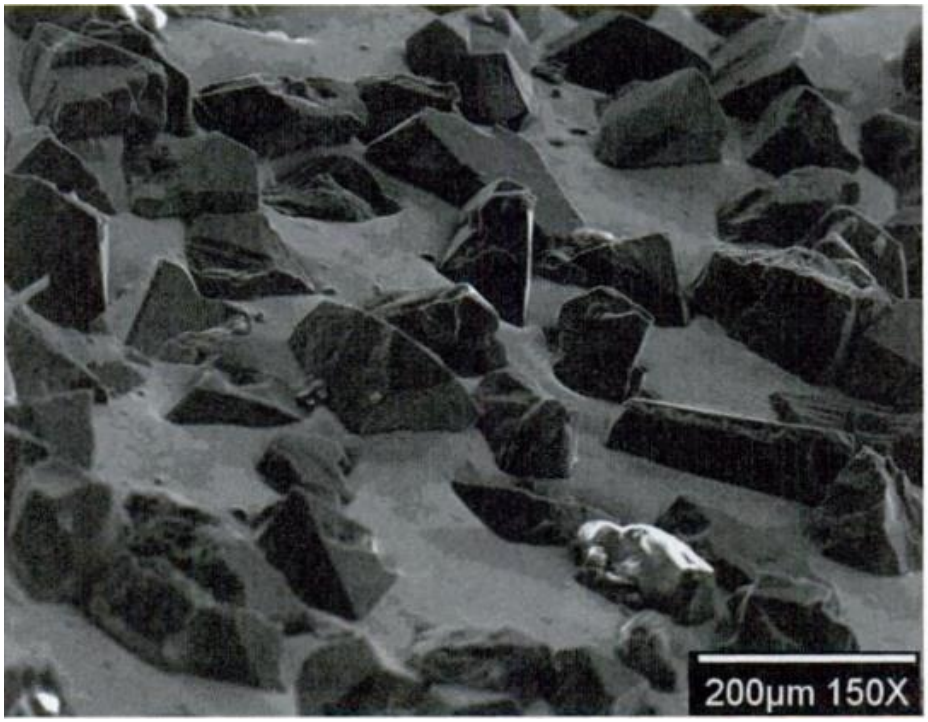


Рис. 1.9. Мікроструктура топографії круга з КНБ

Абразивні матеріали поділяють на звичайні та надтверді. До звичайних належать електрокорунд та карбід кремнію, до надтвердих – алмаз та кубічний нітрид бору.

Теплостійкість, властивості та склад абразивів визначають їх придатність для обробки конкретних матеріалів.

Порівняльну характеристику абразивних матеріалів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика абразивних матеріалів

Абразивний матеріал	Маркування / види	Основні властивості та особливості	Сфера застосування	Тепло-стійкість
Електрокорунд (Al2O3)	Нормальний 12А…16А	Чим вищий номер у маркуванні, тим менше домішок і вищі фізичні та різальні властивості матеріалу	напівчистове та чистове шліфування, заточування й доводка незагартованих сталей та кольорових металів	1700-1800°С
	Білий: 22А…25А		шліфування загартованих сталей	
	Легований (хромистий) 33А, 34А		обробка загартованих, цементованих та азотованих сталей	
	Монокорунд 43А, 44А			

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Карбід кремнію (SiC)	Чорний (КЧ) 53С…55С	Зелений карбід кремнію містить менше домішок і має вищі різальні властивості, ніж чорний	шліфування чавуну, міді, латуні, бронзи та алюмінію	1300-2050°С
	Зелений (КЗ) 63С, 64С		заточування твердосплавного інструмента	
Алмаз	Природний: А1…А8	Найтвердіший абразивний матеріал	Фінішна обробка та заточування інструмента	600-800°С
	Синтетичний АС2…АС20			
Кубічний нітрид бору (КНБ, ельбор, боразон, бельбор)	КНБ	На відміну від алмазу, хімічно інертний (нейтральний) до заліза і не вступає з ним у реакції	Обробка залізовмісних, високоміцних та легованих сталей	1300°С

1.5. Правка шліфувальних кругів

Правка забезпечує відновлення геометричної форми круга та різальної здатності його робочої поверхні. Відновлення форми круга здійснюється шляхом усунення радіального та торцевого биття та відновлення геометрії поверхні. Відновлення ріжучої здатності передбачає видалення затертої зв’язки та затупленого абразиву, щоб знову відкрити гострі краї зерен.

До шліфувальних кругів зі звичайним абразивом застосовують правку алмазними інструментами. Наприклад, однокристальними, ротаційними та алмазними дисками. Для кругів із надтвердим абразивом застосовують особливі способи правки та рихтування.

Розрізняють грубу та чисту правку. Режими правки впливають на топографію круга і, як наслідок, на шорсткість шліфованої поверхні. Груба (чорнова) правка виконується за 2-3 проходи із глибиною 0,02-0,05 мм та забезпечує відновлення

геометрії круга. Чистова правка забезпечує мінімальну шорсткість поверхні та точність розмірів. Глибина чистової правки складає 0,005-0,015 мм, швидкість обробки 0,05-0,1 м/хв. Чистова правка виконується за 1-2 проходи та фінішний прохід, вигладжування.

Інструментом для правки при круглому шліфуванні є алмазний олівець (рис. 1.10) або алмаз в оправці (рис. 1.11, а).

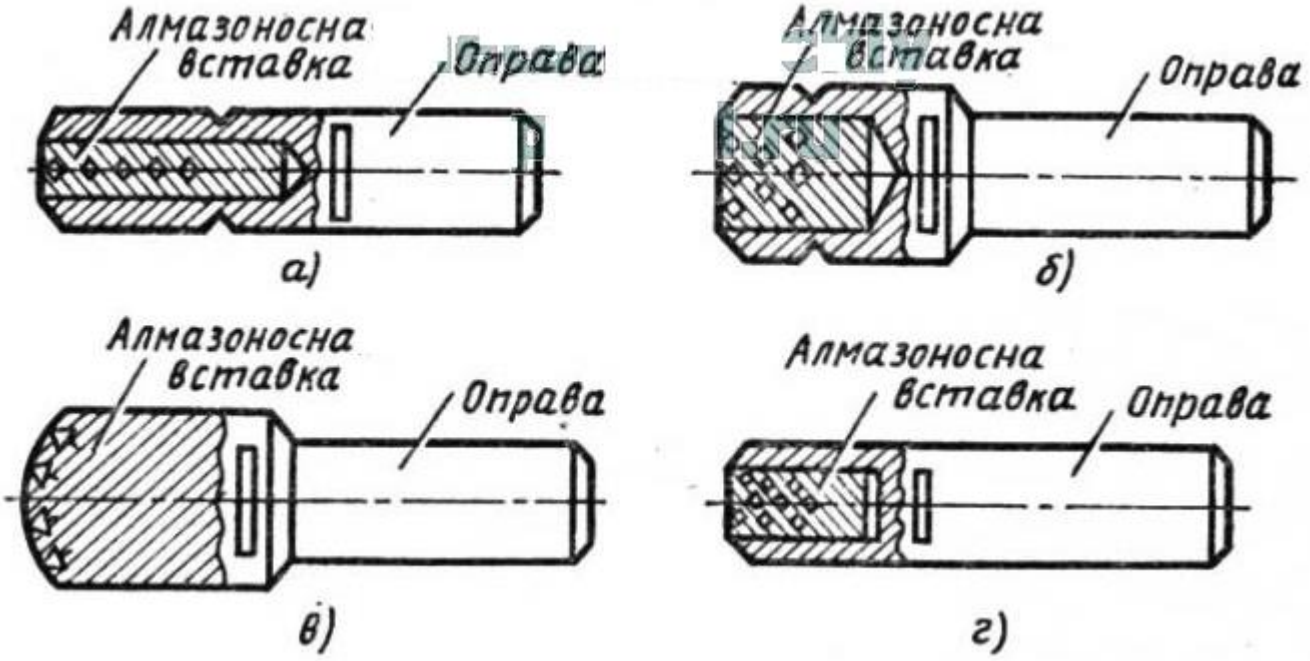
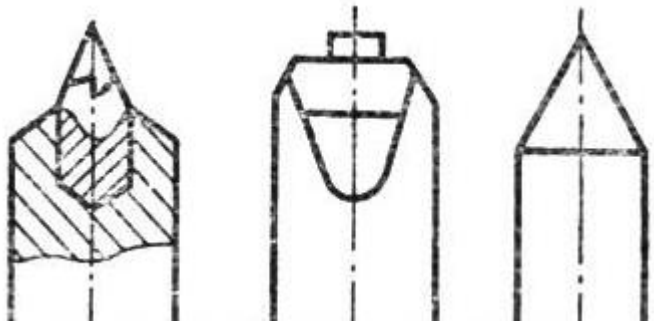


Рис. 1.10. Схеми алмазних олівців



а) б) в)

Рис. 1.11. Схеми алмазного кристального інструменту:

а – алмаз в оправці; б – алмазний різець; в – алмазна голка

1.6. Постановка задач дослідження

В роботі необхідно виконати аналіз причин виникнення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні та методів їх зменшення. Виконати аналіз базової технології виготовлення деталі золотник із виявленням його переваг та недоліків. Спроєктувати новий технологічний процес обробки золотника із застосуванням операції безцентрового шліфування його поверхонь. Для спроєктованого технологічного процесу провести вибір металорізальних верстатів, затискних, допоміжних та вимірювальних пристроїв, різальних інструментів. Виконати розрахунок припусків, режимів різання та норм часу.

Визначити методи зменшення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні при обробці переривчастих поверхонь. На основі їх аналізу запропонувати внести в спроєктований технологічний процес виготовлення деталі золотник, а саме в операцію безцентрового шліфування удосконалення, які здатні зменшити похибку форми поверхні. Виконати економічні розрахунки.

РОЗДІЛ 2. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ПОХИБОК ФОРМИ ТА МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК І ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ БЕЗЦЕНТРОВОМУ ШЛІФУВАННІ

2.1. Причини виникнення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні

На основі аналізу наукових джерел можна виділити наступні основні причини виникнення похибок формоутворення (огранювання та некруглості) при безцентровому шліфуванні: зміщення центра деталі при самобазуванні; некоректна висота установки деталі; недостатня жорсткість вузлів верстата; автоколивання (вібрації); проковзування заготовки; розмикання контакту між деталлю та кругом; знос та биття робочих елементів; збіг частоти обертання з резонансами верстата; занадто жорсткі режими обробки; обмежена стабільність стандартних ножів; часові затримки між точками контакту; термічний перегрів у зоні різання.

У процесі врізного безцентрового шліфування заготовка спирається безпосередньо на три елементи робочої зони: шліфувальний круг, ведучий круг та опорний ніж. Така схема базування по зовнішній поверхні забезпечує високу продуктивність, але створює замкнений контур зворотного зв’язку формоутворення. Наявні початкові відхилення профілю заготовки (хвилястість, овальність) при її обертанні контактують із ножем і ведучим кругом, викликаючи миттєві поперечні зміщення центра деталі та нерівномірне знімання припуску шліфувальним кругом, що формує огранювання. Автоколивання виникають через повторне знімання припуску по раніше сформованій хвилястій поверхні.

Періодичний фізичний відрив заготовки від абразивного інструмента при великих амплітудах коливань. Втрата стабільного зчеплення з ведучим кругом призводить до зупинки обертання або раптового розганяння деталі.

Перевищення гранично припустимої потужності шліфування, що викликає температурні деформації та припікання поверхні.

2.2. Методи зменшення похибок форми

На основі пошуку наукових літературних джерел, відомі методи, що дозволяють зменшити або усунути похибки форми такі як некруглість, огранювання та хвилястість можна умовно поділити на декілька напрямків:

- геометрична оптимізація;
- динамічні та часові математичні моделі формоутворення і розмикання контакту;
- з ультразвуковим черевиком;
- інтегровані системи цілісної симуляції, оптимізації та глобальної стабільності циклу;
- аналіз динамічної стабільності;
- моніторинг та діагностика процесу за допомогою сигналів акустичної емісії.

В роботі [26] запропоновано метод геометричної оптимізації, що полягає в безперервній зміні кута опорного ножа γ та висоти центру деталі h_w (рис. 2.1).

Профіль опорного ножа задається математичною функцією $y = f(x)$.

Кут контакту (рис. 2.2) визначається за формулою:

$$\gamma = tan^{-1} f'(x_0) \tag{2.1}$$

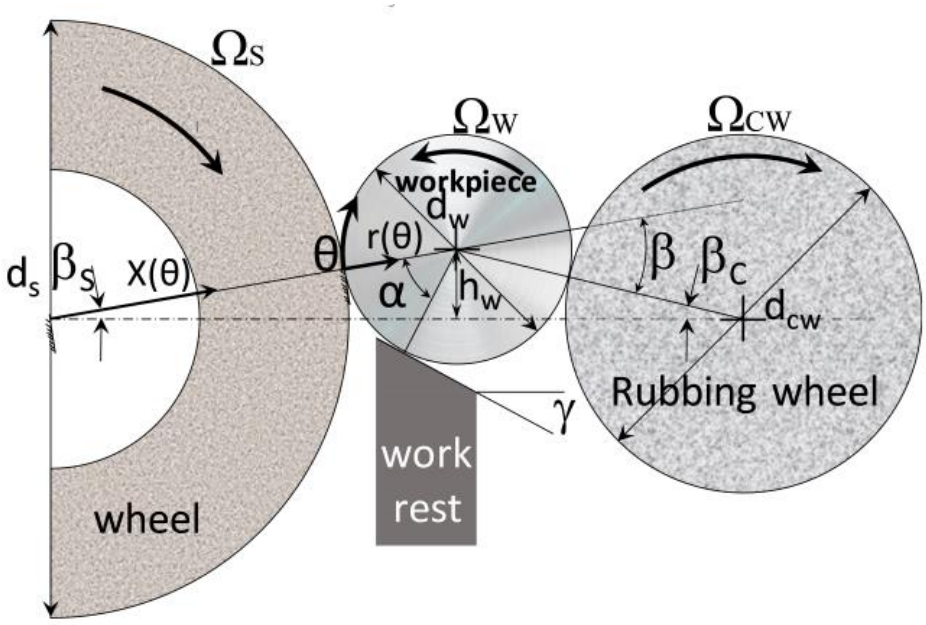


Рис. 2.1. Схема безцентрового врізного шліфування

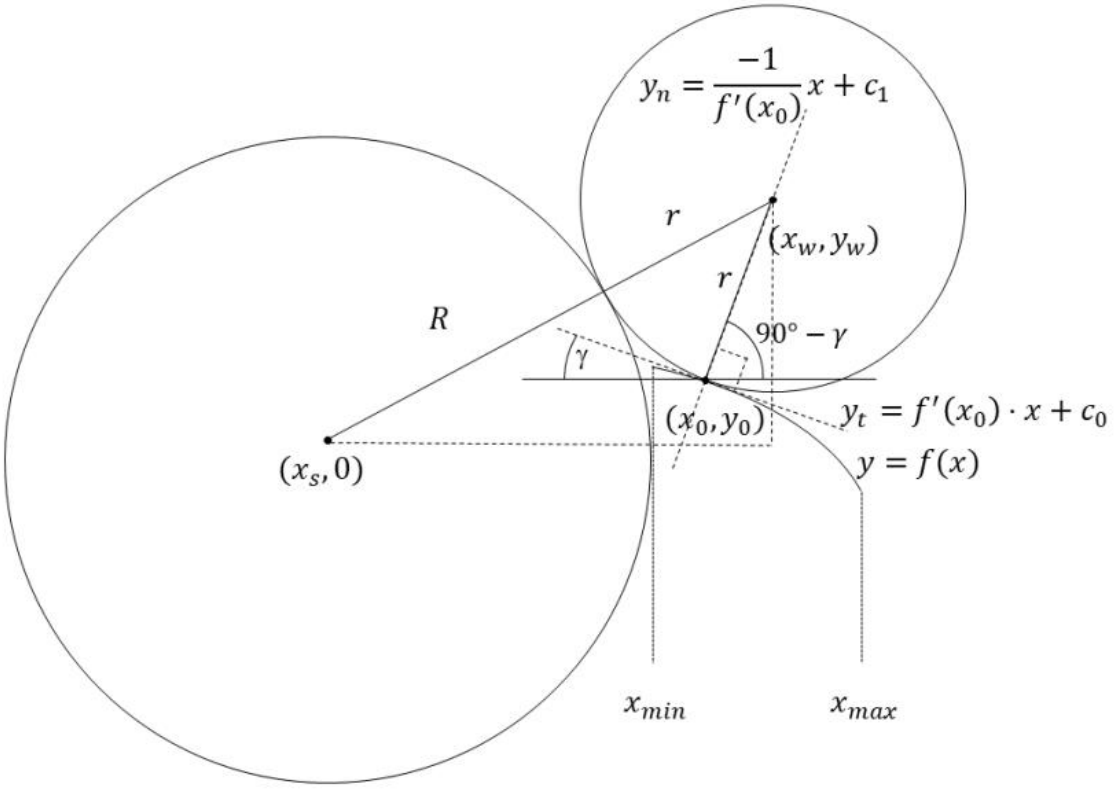
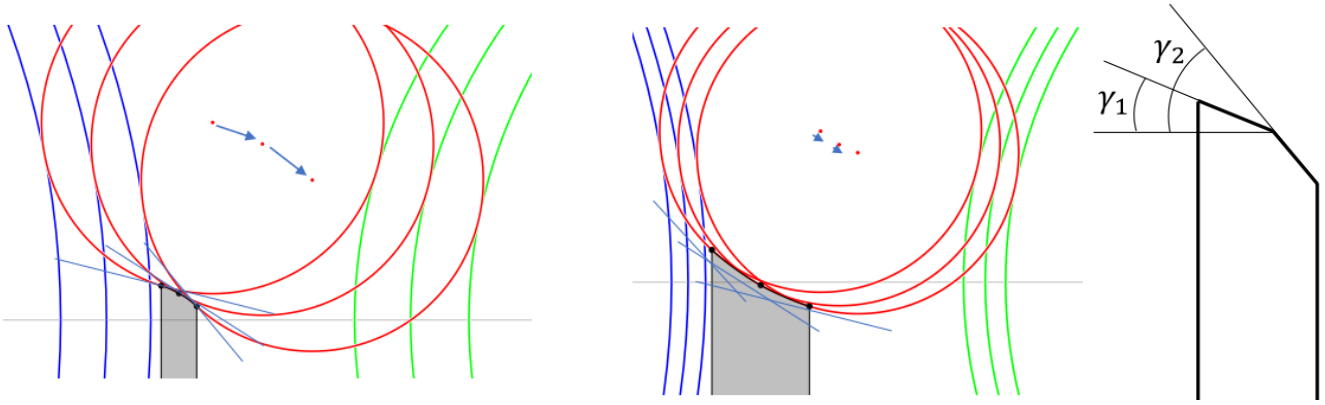


Рис. 2.2. Схема геометричних параметрів

В роботі запропоновано три конструктивні типи опорних ножів: опуклий (рис. 2.3, а), увігнутий (рис. 2.3, б), з дискретним значенням кутів (рис. 2.3, в).



а) б) в)

Рис. 2.3. Профілі опорних ножів:

а – опуклий; б – увігнутий; в – з дискретним значенням кутів

Положення деталі на площині опорного ножа постійно змінюється завдяки переміщенню осей інструментів, що реалізується засобами ЧПУ верстату.

Безпосереднє уникнення огранювання досягається не самою формою ножа, а можливістю змінювати кут опирання γ протягом циклу обробки, так званий багатостадійний підхід. Профіль деталі розділяється у P точках на окремі елементи радіальним вектором v. Перетворення початкового профілю v_i у кінцевий v_f після N стадій описується M:

$$v_f = M\left(\gamma_{1,..,}\gamma_{N,...,}h_{w1,..,}h_{wN}\right)v_i \tag{2.2}$$

Оцінка гасіння огранювання здійснюється за власними значеннями матриці M. Якщо модуль усіх власних значень менший за 1, процес затухає. Для профілю з дискретним значенням кутів будуються 2D-карти підсилення $\log(\rho(\gamma_1, \gamma_2))$, що дозволяють підбирати оптимальні комбінації кутів. В роботі [26] зазначено як варіант, $\gamma1 = 30°$ та $\gamma2 = 35°$, що забезпечує значення спектрального радіуса $\rho(M) << 1$, що викликає швидке згасання гармонік похибки.

В роботі [24] запропоновано використовувати геометричний індекс стабільності SI. Даний індекс призначений для кількісного оцінювання динаміки формаутворення при безцентровому врізному шліфуванні. Він оцінює геометричну стабільність гасіння похибок круглості заготовок.

Геометричний індекс стабільності:

$$SI = \left(1 + \frac{\sin(\alpha)\cdot\cos(i\cdot\beta) - \sin(\beta)\cdot\cos(i\cdot\alpha)}{\sin(\beta-\alpha)}\right) \tag{2.3}$$

де α, β – кути, що задають кутове розташування трьох точок контакту заготовки у шліфувальному зазорі (точка контакту зі шліфувальним кругом, ведучим кругом та опорним ножем);

i – порядок огранювання або гармоніка хвилястості, що визначає кількість граней виступів на один повний оберт заготовки.

Геометрична стабільність процесу обробки, при якій наявна похибка круглості відповідного порядку монотонно зменшується (згасає):

$$SI > 0.$$

Якщо,

$$SI < 0,$$

то амплітуда коливань зростає та інтенсивно формується огранювання.

З практичної точки зору, даний розрахунковий критерій дає можливості побудови спектральної діаграми стабільності (рис. 2.4) для широкого діапазону гармонік. Це дозволяє ще на етапі технологічної підготовки виробництва оптимізувати геометрію зазору, тобто висоту центру деталі або кут опорного ножа, та усунути критичні зони з від'ємними значеннями.

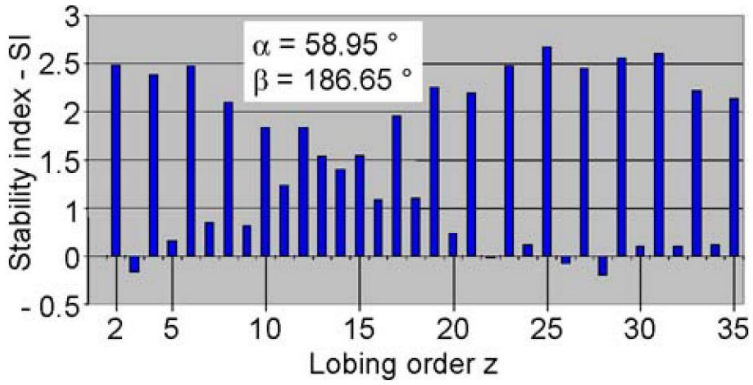


Рис. 2.4. Діаграма індексу стабільності

Робота [10] розглядає часову динамічну модель з метою розробки технології досягнення точності круглості субмікронного рівня 0,1-0,3 мкм. Модель враховує кінематику заготовки, ефекти контакту, а також пружні деформації елементів силового контуру верстата.

Жорсткість силового контуру верстату визначається жорсткістю шпинделів та підшипникових вузлів шліфувального k_g та ведучого k_c кругів (рис. 2.5).

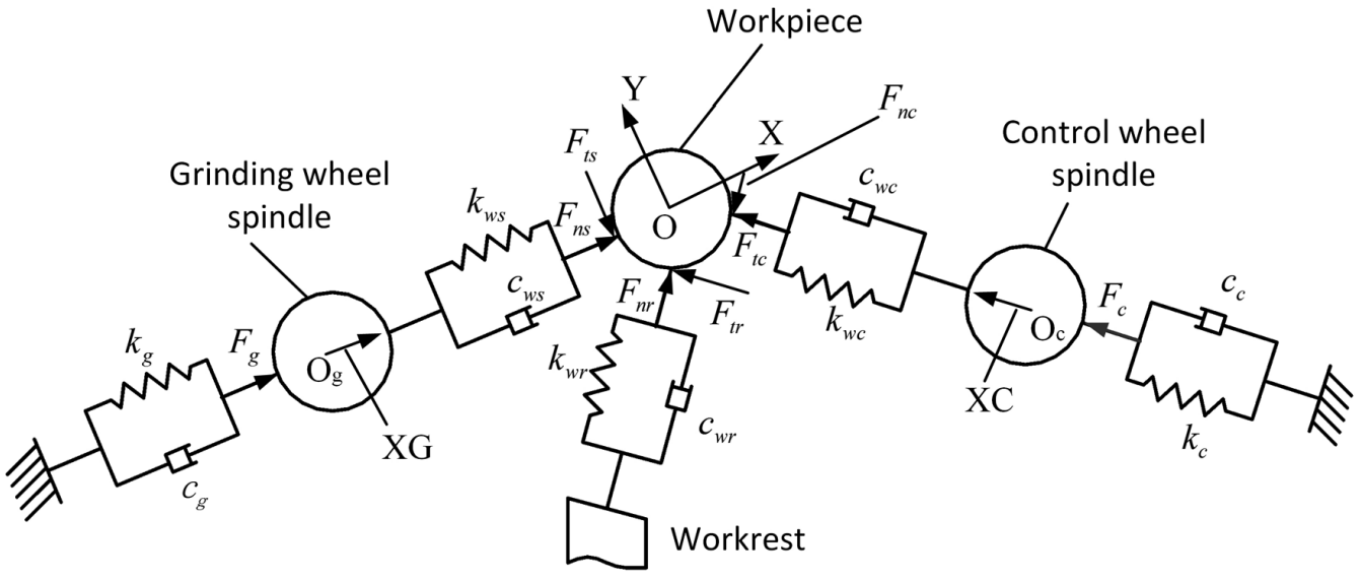


Рис. 2.5. Динамічна розрахункова модель силового контуру верстата

Для забезпечення точності формоутворення на рівні 0,1 мкм безрозмірні відношення повинні відповідати умові [10]:

$$k_g \geq (k_s \cdot a_e) \times 10^6 \quad \text{та} \quad k_c \geq (k_s \cdot a_e) \times 10^6 \tag{2.4}$$

де k_s – жорсткість шліфування:

$$k_s = \frac{b \cdot v_c \cdot u}{v_s} \tag{2.5}$$

де b – довжина ділянки деталі, що шліфується;

v_c – колова швидкість ведучого круга;

u – питома енергія шліфування;

v_s – колова швидкість шліфувального круга;

a_e – еквівалентна глибина різання:

$$a_e = \frac{f_r}{1 - K_1 + K_2} \tag{2.6}$$

де f_r – швидкість радіальної подачі заготовки;

K_1, K_2 – коефіцієнти, що пов'язують рух заготовки в контакті з опорою та ведучим колесом зі зменшенням радіуса заготовки (при зняті припуску):

$$K_1 = \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{2.7}$$

$$K_2 = \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{2.8}$$

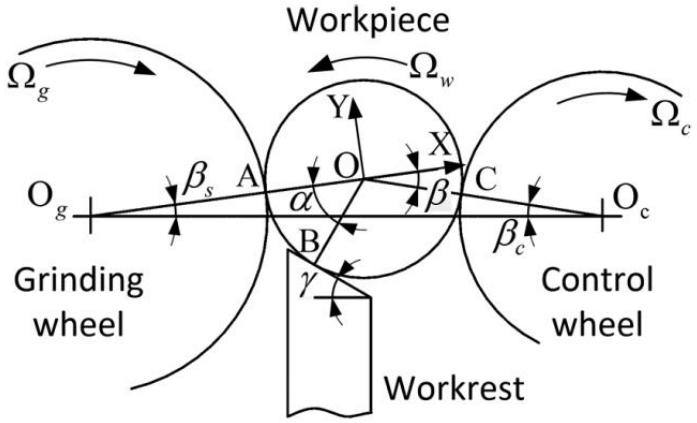
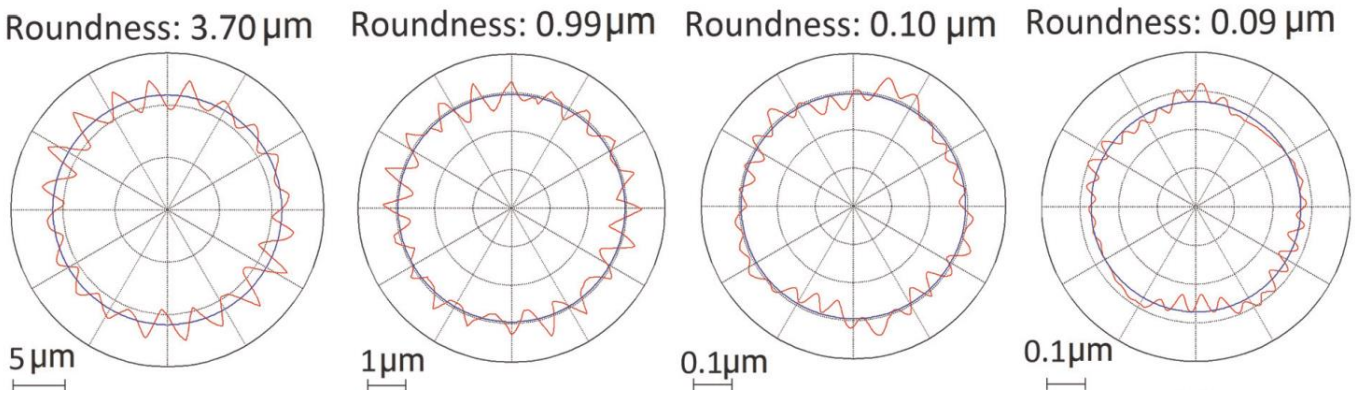


Рис. 2.6. Схема процесу безцентрового шліфування

Якщо умови 2.4 не задовольняються, і жорсткість підшипників є недостатньою, вібрації шпинделя погіршують якість обробки, а похибка круглості зростає (рис. 2.7 а, б). Похибка круглості в такому випадку рівна 3,7 мкм та 0,99 мкм [10]. Амплітуда вібрацій шпинделя зменшується при виконанні умов 2.4, що обумовлено достатньою жорсткістю підшипників, а похибка круглості досягає 0,1 мкм та 0,09 мкм (рис. 2.7 в, г).

Умови жорсткості для досягнення круглості:

$$\frac{k_s \cdot a_e}{k_g} \leq 1 \times 10^6$$
$$\frac{k_s \cdot a_e}{k_c} \leq 1 \times 10^6 \qquad (2.9)$$



а) б) в) г)

Рис. 2.7. Профіль заготовки (огранювання) при умові (2.9):

а – 10; б – 5; в – 1; г – 0,33

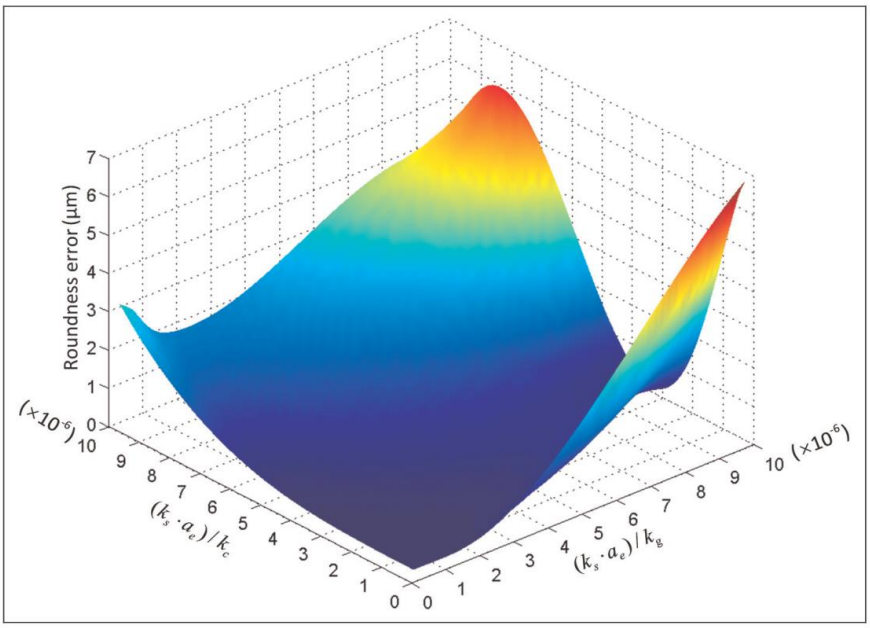


Рис. 2.8. Поверхня відгуку залежності похибки круглості від умов жорсткості (2.9)

В роботі [6] застосовано теорію розмикання контакту при безцентровому шліфуванні. У процесі врізного безцентрового шліфування заготовка спирається безпосередньо на три елементи робочої зони: шліфувальний круг, ведучий круг та опорний ніж. Така схема базування створює замкнений контур зворотного зв'язку формоутворення. При обертанні заготовки та при наявності на її базуючій поверхні хвилястості або овальності, виникають миттєві зміщення центра деталі. Це призводить до нерівномірного знімання припуску при шліфуванні.

Розмикання контакту полягає у тому, що абразивний шліфувальний круг є інструментом односторонньої дії. Він знімає матеріал при додатному перетині поверхонь, але не здатен додавати матеріал чи прикладати розтягуючі зусилля, коли заготовка відривається від його поверхні. Внаслідок цього розраховане теоретичне значення зазору перетину стає від'ємним, що призводить до фізичного розмикання (відриву) заготовки від шліфувального круга.

Математичне вираження розмикання контакту (відсікання) задається двосегментною кусково-лінійною функцією $y_{NL}(u)$:

$$y_{NL}(u) \triangleq \begin{cases} u, & \text{якщо } u \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } u < 0 \end{cases} \tag{2.10}$$

де u – теоретичне значення перетину заготовки та круга. Якщо u < 0, відрив деталі, фактична глибина різання примусово приймається рівною 0.

Стабілізація процесу формоутворення відбувається на граничному циклі коли зменшується показник зростання коливань до 0. Це відбувається зі зниженням еквівалентного коефіцієнта підсилення системи та більш жорсткішого відсікання за рахунок зростанням амплітуди хвилястості.

Амплітуда хвилястості деталі на граничному циклі розраховується за формулою:

$$|r(n)| = \left| \frac{1}{K_1 e^{-jn\alpha} - K_2 e^{-jn(\pi-\beta)} - e^{-j2\pi n}} \right| \cdot A_{IN,lim} \tag{2.11}$$

де A_{IN} –амплітуда динамічних коливань глибини різання:

$$A_{IN} = \frac{\frac{f_z}{K}}{1 + K_2 - K_1} \tag{2.12}$$

де K – фактор жорсткості шліфувальної системи.

В роботі [52] розроблена динамічна модель, яка одночасно враховує як геометричні зміщення центра заготовки від самобазування, так і динамічні вібрації силового контуру. Динамічний профіль заготовки в кожен момент часу розраховується за формулою:

$$r_W(t) = r_W(0) - \Delta_W(t) \tag{2.13}$$

де $r_W(t)$ – радіус заготовки в момент часу t;

$r_W(0)$ – початковий геометричний профіль заготовки до початку шліфування;

$\Delta_W(t)$ – сумарна глибина знятого матеріалу в радіальному напрямку (припуск).

За допомогою рівняння (2.13) можливо безперервно відстежувати зміни геометричної форми та накопичення похибки круглості на кожному часовому кроці обробки.

Запропоновано [52] розрахунок абсолютної похибки, що зводиться до мінімізації неузгодженості геометричного та силового балансу:

$$\varepsilon = |x_S(t) - [\Delta_S(t - \Delta t, 0) + \Delta_W(t - \Delta t, 0) + \\ + F_{nS}(t)\left(\frac{1}{k_W} + \frac{1}{k_S} + \frac{1}{k_A}\right) + X_W(t) + X(t)]| \tag{2.14}$$

де $x_S(t)$ – величина врізної подачі шліфувального круга;

$\Delta_S(t - \Delta t, 0)$ – знос шліфувального круга;

$\Delta_W(t - \Delta t, 0)$ – глибина припуску;

$F_{nS}(t)$ – нормальна сила шліфування;

k_W, k_S, k_A – еквівалентна жорсткість заготовки, шліфувального круга та опорного ножа відповідно;

$X_W(t)$ – динамічне вібраційне зміщення центра деталі;

$X(t)$ – геометричне зміщення центра заготовки від зміни її поверхні.

На кожному часовому кроці алгоритм варіює значення нормальної сили $F_{nS}(t)$ до досягнення мінімуму похибки ε, що гарантує високу обчислювальну точність та стійкість розв’язку.

В роботі [52] описано експеримент, що проводився для підтвердження адекватності моделі. Висота центра заготовки h = 15,6мм, початковий радіус заготовки r_{W0} = 29,5мм, радіус шліфувального круга r_S = 248,5мм, радіус ведучого круга r_R = 172,5мм, кут нахилу ножа $\beta = 30°$, кути контакту $\alpha = 56{,}66°$.

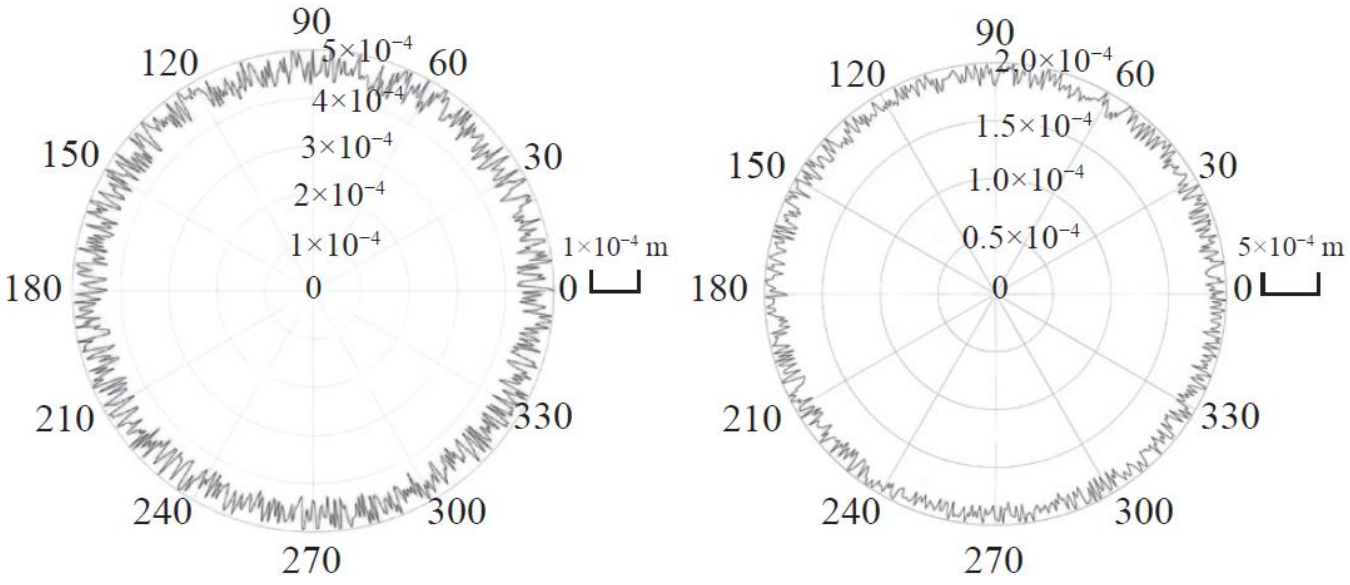
Встановлено характер зміни похибки круглості в часі:

- на початку обробки при t = 0 с початкова похибка круглості заготовки становила 64 мкм. Протягом перших 2,5 секунд спостерігалося стрімке зростання похибки круглості до пікового значення близько 160 мкм. Такий характер пояснюється скачкоподібними зміщеннями центра заготовки на ножі й ведучому крузі через наявність поверхневих мікронерівностей. В свою чергу це призводить до значної варіації товщини знімання матеріалу по колу;

- в часовому інтервалі від 2.5-7 секунд, внаслідок згладжування первинного рельєфу, раптові стрибки центра припинилися, а похибка круглості швидко знизилася;

- в завершальній фазі від 7-12,5 секунд процес увійшов у сталий режим, а похибка круглості монотонно зменшилася і досягла стабільного мінімального значення 20 мкм.

Порівняння вихідного й підсумкового профілів деталі представлено на рис. 2.9.



а) б)

Рис. 2.9. Профіль деталі:

а – до обробки; б – після оброки

Даний алгоритм дозволяє проводити точний кількісний розрахунок еволюції профілю та оцінювати досяжну точність обробки ще на етапі технологічного проектування.

В роботі [58] запропоновано компактний безцентровий блок (рис. 2.10), що оснащений ультразвуковим еліптично-коливальним черевиком. Він встановлюється на стіл плоскошліфувального верстата. Головна технологічна функція ультразвукового черевика – забезпечення стабільного й точного обертального руху заготовки за рахунок сил тертя. Вони створюються еліптичними мікроколиваннями торцевої поверхні ультразвукового перетворювача.

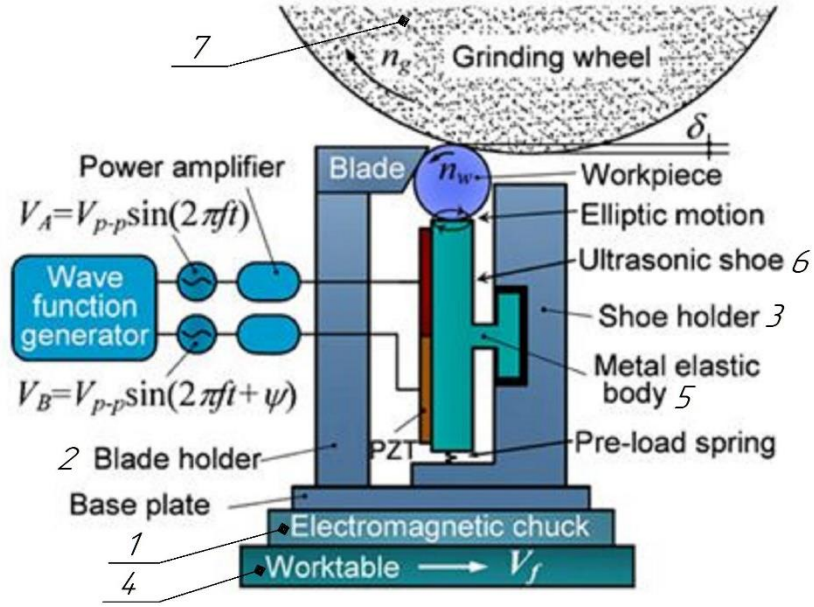


Рис. 2.10. Безцентровий блок, оснащений ультразвуковим еліптично-коливальним черевиком:

1 – електромагнітна плита; 2 – тримач опорного ножа; 3 – тримач ультразвукового черевика; 4 – основа; 5 – металевий пружний корпус; 6 – ультразвуковий черевик; 7 – шліфувальний круг

Ультразвуковий черевик складається з металевого пружного корпусу та наклеєного п’єзокерамічного елемента (PZT) із двома розділеними електродами. При подачі від генератора синусоїдальних сигналів змінної напруги 30-120 В з амплітудою, частотою f = 46,5 кГц та зсувом фаз ψ = 90° у черевику одночасно збуджуються вигинні та поздовжні ультразвукові коливання. Синтез цих коливань створює еліптичний рух мікроточок на торцевій поверхні черевика, що забезпечує стабільне обертання заготовки під дією сил тертя.

Для врахування пружної деформації верстата введено [58] безрозмірний параметр пружності обробки k:

$$k = \frac{-F + \sqrt{F^2 - 4EG}}{2E} \tag{2.15}$$

$$F = -a + Nb + 2b$$

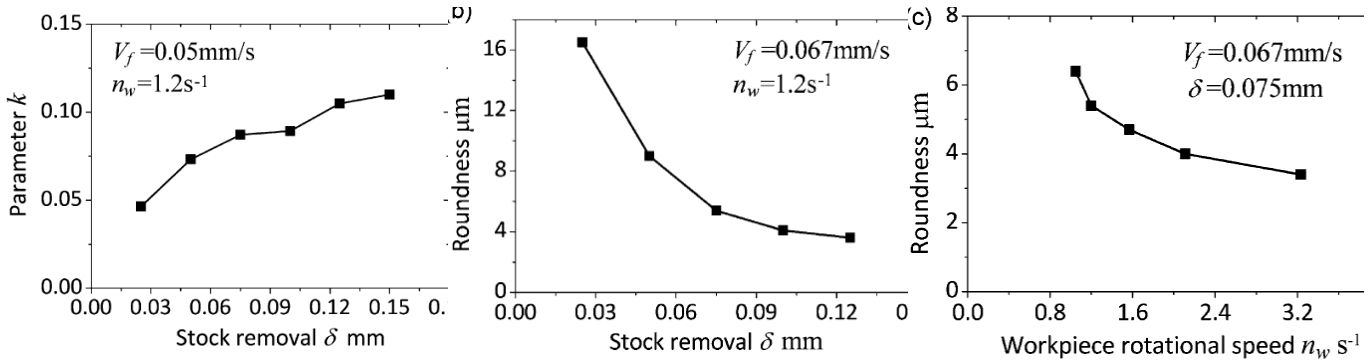
$$E = \rho_N - \rho_0 + \delta/2 + a - Nb - b$$

$$G = -b$$

Дійсний радіус деталі ρ_N після N обертів:

$$\rho_N = (a - Nb - 2b) \cdot \frac{1 - k}{k} - b \cdot \frac{k^2 - 1}{k^2} + \rho_0 - \frac{\delta}{2} \tag{2.16}$$

Проведено експериментальні дослідження [25] на плоскошліфувальному верстаті з ЧПУ моделі SGT-315RPA з використанням алмазного шліфувального круга SDC400N та заготовок із твердого сплаву ТН10 діаметром 5 мм і довжиною 13 мм. У ході випробувань обертання деталі контролювалося зміною напруги на п’єзоелементі ультразвукового черевика від 30 В до 120 В при частоті 46,5 кГц, а швидкість деталі фіксувалася за допомогою високошвидкісної цифрової камери Keyence VW-6000. За результатами експерименту встановлено, що найвища точність досягається при збільшенні швидкості обертання заготовки та виборі більшого припуску на обробку. За оптимальних режимів обробки похибку круглості твердосплавної заготовки було зменшено з початкового значення 23,95 мкм до кінцевого значення 0,84 мкм. Показник круглості покращено у 28,5 разів. Графік залежності виміряного значення k від припуску δ представлено на рис. 2.11. Зі збільшенням припуску значення k зростає від 0,045 до 0,11, а його середнє значення становить 0,084.



а) б) в)

Рис. 2.11. Графіки впливу:

а – величини припуску на параметр пружності обробки k; б – припуску на круглість; в – швидкості обертання на круглість

В роботі [14] вперше запропонована математична модель та симуляційний комплекс, який дозволяє одночасно аналізувати та усувати такі три види нестабільностей: автоколивання, огранювання, нестабільність обертання заготовки.

Автоматизація проєктування врізного шліфування при якій об'єднано геометричні, динамічні та трибологічні обмеження часового розкладання радіального дефекту заготовки описується рівнянням:

$$\delta r_w(t) = \varepsilon_g(t) + \varepsilon_K(t) + \varepsilon_D(t) \qquad (2.17)$$

де $\varepsilon_g(t)$ – геометричне переміщення деталі внаслідок проходження похибок круглості через точки контакту з опорним ножем та ведучим кругом:

$$\varepsilon_g(t) = g_b \delta r_w(t - \tau_b) - g_r \delta r_w(t - \tau_r)$$

де: g_b, g_r – геометричні коефіцієнти переміщення ножа та ведучого круга відповідно;

$\delta r_w(t - \tau_b)$, $\delta r_w(t - \tau_r)$ – похибка радіуса в точках контакту з ножем та колесом відповідно;

$\varepsilon_K(t)$ – часова варіація статичного відхилення силового контуру верстата вздовж напрямку різання:

$$\varepsilon_K(t) = \frac{\delta F_C(t)}{k_{eq}}$$

де: k_{eq} – еквівалентна жорсткість технологічної системи;

$\varepsilon_D(t)$ – динамічна вібрація системи.

Графік характеристичного рівняння процесу безцентрового шліфування $f(s)$, нулі якого визначають межі динамічної й геометричної стабільності обробки представлено на рис. 2.12.

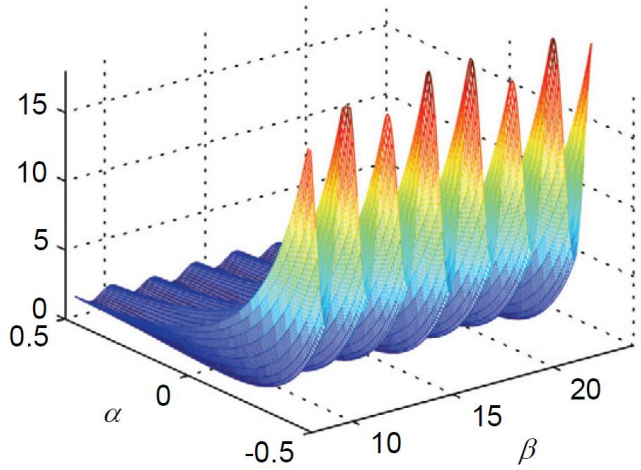


Рис. 2.12. Графік $|f(s)|^2$

На графіку (рис. 2.12) по горизонтальних осях відкладено дійсну α та уявну β частини комплексного параметра. Вертикальна вісь відображає квадрат модуля характеристичної функції $|f(s)|^2$. Оскільки за визначенням значення квадрата модуля є завжди невід'ємними, нулі комплексного рівняння f(s)=0 точно відповідають глобальним або локальним мінімумам дійсної поверхні, де ця поверхня торкається або максимально наближається до нуля. Область нестабільності ($\alpha < 0$), якщо локальні мінімум розташовані в області від'ємних значень α, процес є технологічно нестабільним. При цьому виникає виражене геометричне огранювання деталі або інтенсивний розвиток автоколивань. Якщо всі нулі характеристичної функції лежать в області додатних значень ($\alpha > 0$), це відповідає вирівнюванню профілю заготовки.

Оптимальними конфігураціями верстата є такі геометричні й кінематичні налаштування, при яких усі корені мають додатну дійсну частину з максимально

можливим абсолютним значенням α, що гарантує найшвидше гасіння похибки круглості.

За результатами проведених досліджень [14] та їх порівнянням із математичною моделлю побудовано карту стабільності (рис. 2.13), яка наочно демонструє відповідність експериментально отриманих результатів та змодельованих.

Експериментальні точки амплітуди вібрацій (зірочки) та стабільний стан (кружечки) повністю збіглися з розрахованими межами стабільних (темно-синіх) та нестабільних (червоних/блакитних) зон.

Встановлено, що розміри нестабільних областей визначаються еквівалентною жорсткістю. Використання більш гнучкого ведучого круга або коригування довжини контакту суттєво зменшує площу нестабільних зон.

Встановлено та підтверджено, що збільшення частоти обертання деталі створює стабільні зони, що суттєво прискорює гасіння похибки круглості, покращує шорсткість та запобігає термічному припіканню поверхні.

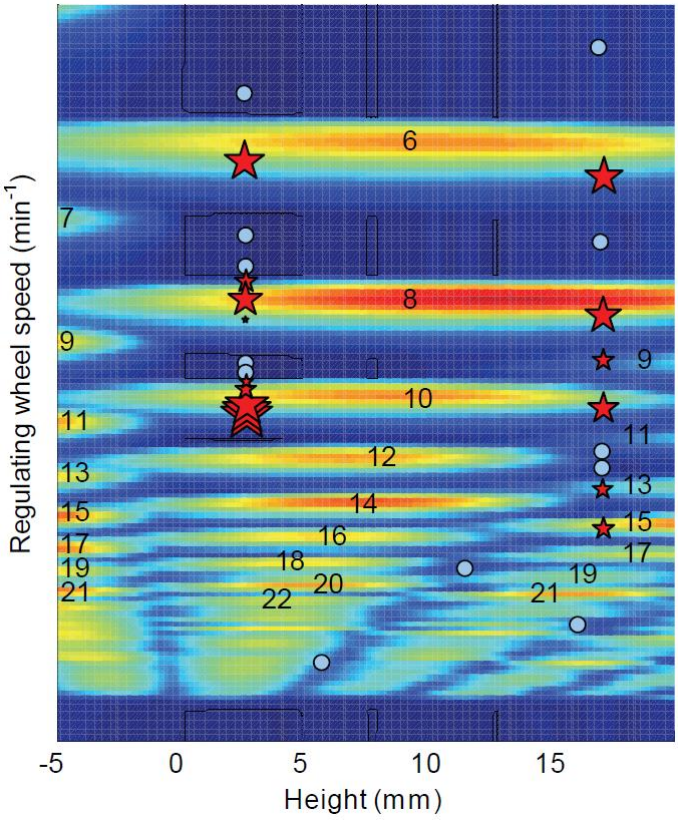


Рис. 2.13. Карта стабільності

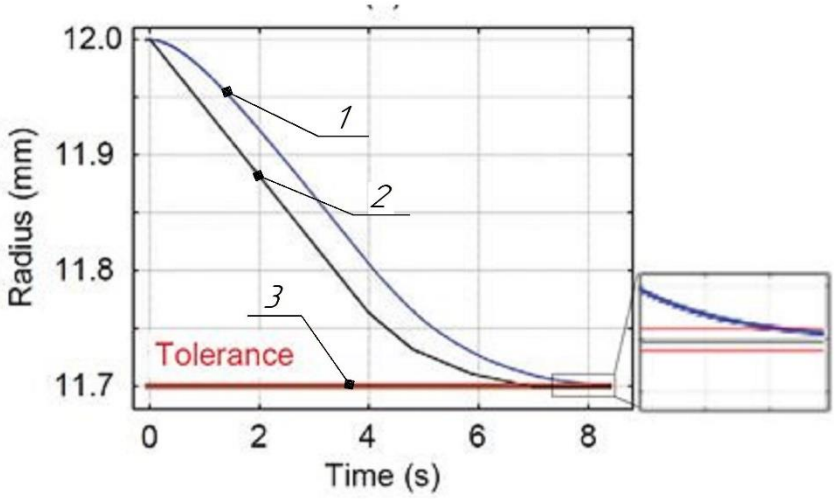


Рис.2.14. Графік зміни радіусу заготовки при шліфуванні:
1 - радіус заготовки; 2 - запрограмоване положення круга; 3 – допуск

Створена [14] математична модель та швидкісний обчислювальний алгоритм забезпечують можливість одночасного розрахунку та усунення всіх видів нестабільностей. А виправлення некруглості в стабільних конфігураціях відбувається з максимальною швидкістю. Розглянутий алгоритм автоматичного проектування шліфування забезпечує досягнення необхідного допуску деталі за мінімальний час або при мінімальному зносі абразивного круга.

В роботі [4] розглянуто граничну потужність шліфування, за якої температура у зоні контакту інструмента з деталлю досягає критичної межі термічного припікання. Термічне припікання виникає при недостатньому відведенні тепла із зони різання та призводить до виникнення внутрішніх напружень, мікротріщин та зниження твердості поверхневого шару деталі.

Гранична потужність шліфування визначається за формулою:

$$P = \frac{k_w \cdot b \cdot {d_{eq}}^{1/4} \cdot {v_w}^{1/2} \cdot {a_e}^{1/4} \cdot \theta_n}{\phi \cdot {\alpha_w}^{1/2} \cdot \varepsilon} \qquad (2.18)$$

де k_w – питома енергія різання;

b – ширина обробки;

d_{eq} – еквівалентний діаметр;

v_w – колова швидкість заготовки;

a_e – глибина різання.

Графік (рис. 2.15) демонструє порівняння потужності шліфування, граничної потужності машини та граничної потужності термічного припікання під час циклу подачі та обробки.

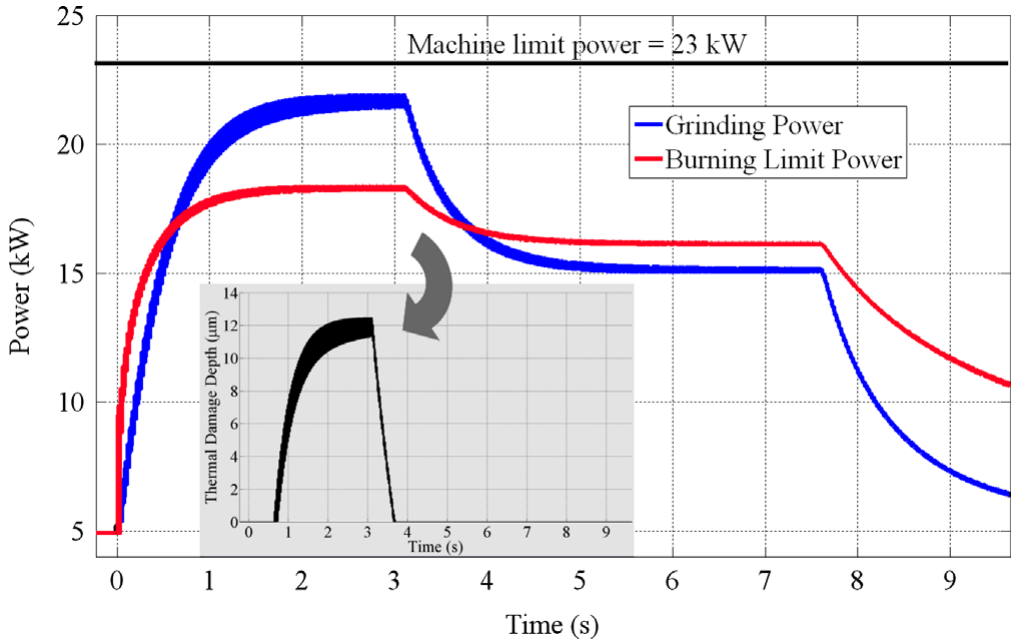


Рис. 2.15. Графік зміни потужності з часом обробки

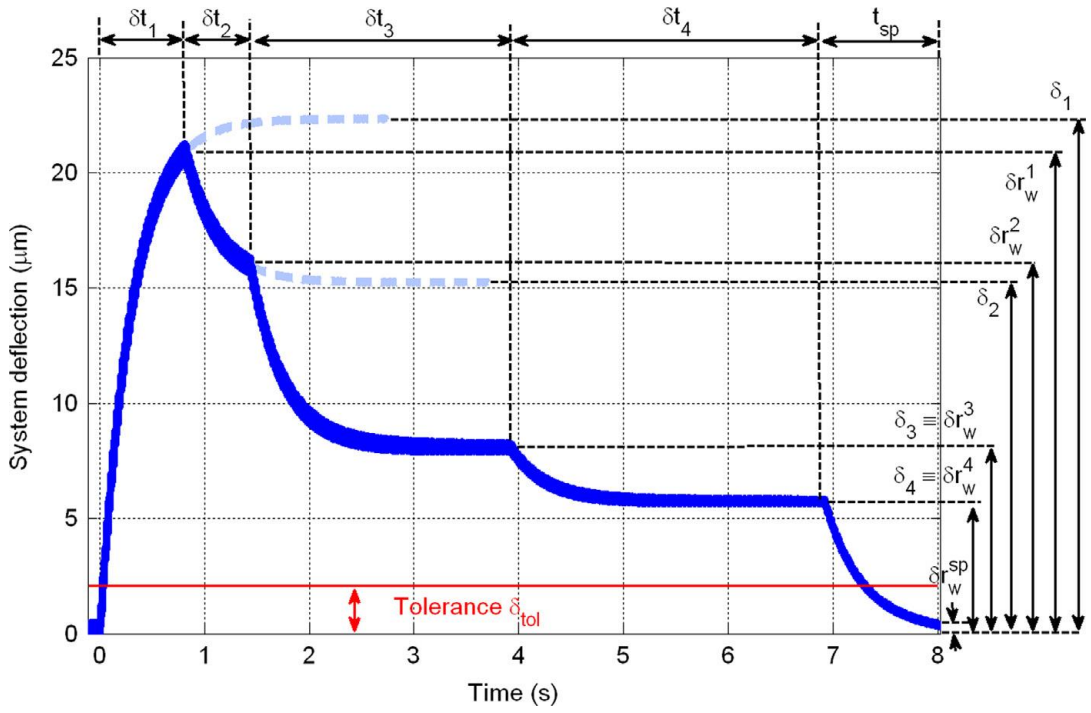


Рис. 2.16. Графік похибки округлості

З графіка (рис. 2.16) видно, що силове навантаження та пружна деформація при врізному шліфуванні різні на різних етапах обробки:

- на чорновій стадії обробки (δt_1, δt_2) через високі швидкості врізання сильний опір різанню пружно деформує вузли верстата;

- на чистовій стадії обробки (δt_3, δt_4) швидкість подачі зменшується, силове навантаження спадає, і пружна деформація системи поступово знижується;

- на етапі виходжування (t_{sp}) механічне врізання припиняється, але за рахунок накопиченої пружної деформації круг продовжує знімати мікроприпуск. Дефект радіуса спадає і опускається нижче горизонтальної лінії необхідного допуску, що забезпечує отримання точного розміру та круглості заготовки.

В роботі [44] запропоновано новий критерій динамічної стабільності A_{dyn}, який дозволяє оцінити як геометричну, так і динамічну стабільність обробки для всього спектра порядків огранювання n (від n = 1 до n = 50 і більше).

Критерій динамічної стабільності A_{dyn}:

$$A_{dyn} = \frac{k_s}{\lambda_0} \cdot [(C + \frac{\lambda_0}{\lambda_r})(1 - cos2\pi n) + Dsin2\pi n] + A \qquad (2.19)$$

де k_s – коефіцієнт жорсткості;

λ_0 - статична жорсткість верстата;

C, D – дійсна та уявна складові динамічної гнучкості верстата відповідно;

λ_r – залишкова жорсткість технологічної системи;

n – порядок огранювання або хвилястості:

$$n = \frac{\omega}{\Omega}$$

З графіка динамічної стабільності (рис. 2.17) можна зробити висновки про динамічну стабільність та похибки круглості:

- при $A_{dyn} > 0$ процес є динамічно стабільним для даного порядку хвилястості n, і похибка круглості згасає;

- при $A_{dyn} < 0$ процес є динамічно нестабільним, що призводить до прогресуючого зростання амплітуди хвилястості (огранювання або автоколивань).

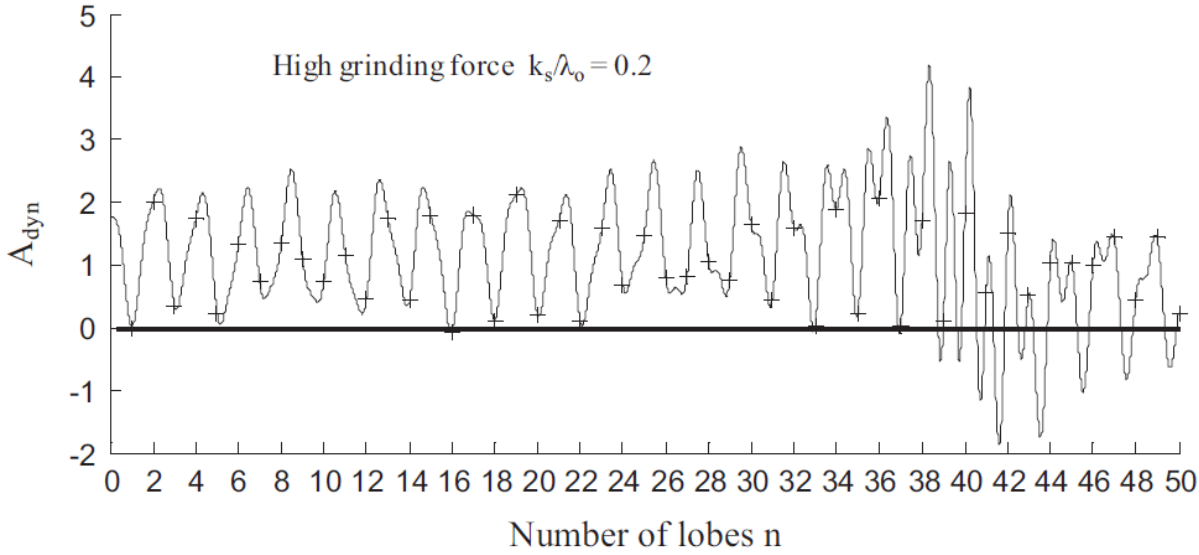


Рис. 2.17. Графік динамічної стабільності

В роботі [44] експериментально підтверджено, що: підвищення частоти обертання деталі суттєво збільшує ймовірність виникнення автоколивань; збільшення швидкості круга з 30 м/с до 60 м/с більш ніж удвічі підвищує граничну інтенсивність знімання матеріалу (з 20 мм²/с до більше ніж 40 мм²/с) без виникнення автоколивань.

В роботі [21] запропоновано інтелектуальну систему моніторингу (рис. 2.18) процесів безцентрового шліфування на основі аналізу сигналів акустичної емісії. Фізична суть методу полягає у фіксації високочастотних пружних хвиль, що випромінюються із зони різання внаслідок вивільнення енергії мікродеформацій та руйнування матеріалу при взаємодії абразивних зерен із заготовкою.

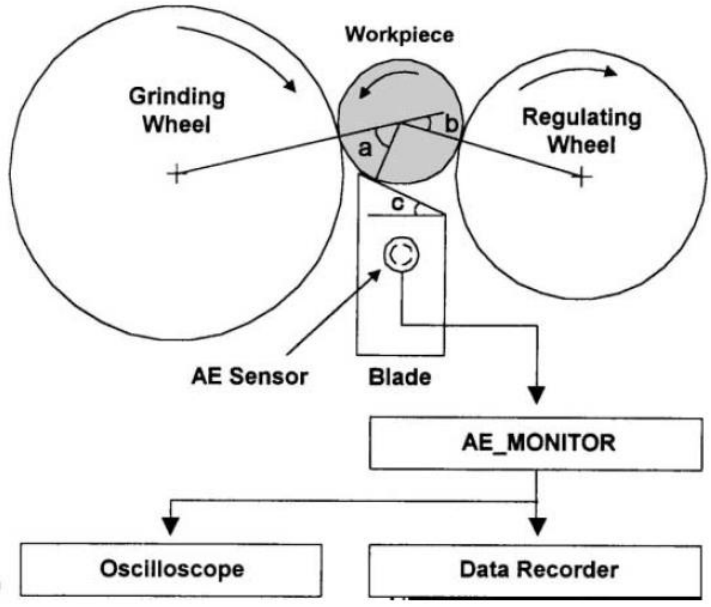


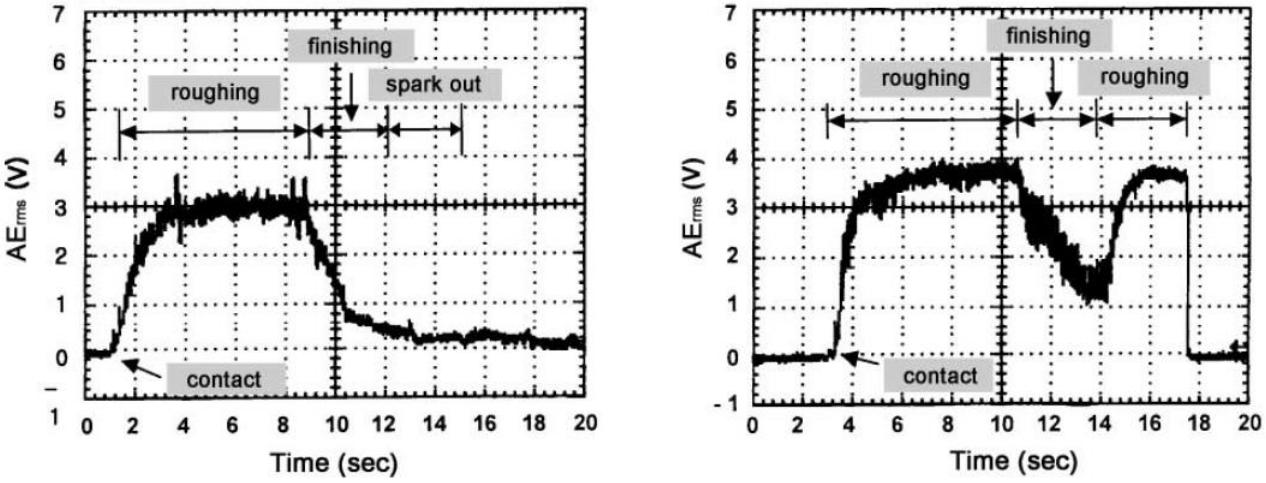
Рис. 2.18. Схема установки аналізу сигналів акустичної емісії

Середньоквадратична величина напруги акустичної емісії виражає миттєву амплітуду сирого сигналу акустичної емісії у момент часу t:

$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T}\int_0^{\Delta T} AE^2(t)\,dt} \tag{2.20}$$

де ΔT - часова константа інтегрування, 10 мс.

Експериментально встановлено [21], що при некоректному налаштуванні висоти центра заготовки спостерігається раптовий сплеск сигналу AE_{rms} (рис. 2.19 б) на етапі виходжування, що викликано підстрибуванням деталі та формуванням похибки круглості. При правильному виборі висоти розміщення центра заготовки спостерігається стрімке зростання та утримання амплітуди акустичної емісії на етапі чорнового врізного, поступове спадання на чистовому етапі та плавне зниження до нуля під час виходжування (рис. 2.19 а).



а) б)

Рис. 2.19. Графік акустичної емісії при безцентровому шліфуванні деталі:
а – встановленої правильно; б – некоректно вибраної висоти центру

2.3. Висновки

Виконано аналіз причин виникнення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні. Розглянуто відомі дослідження методів зменшення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні зовнішніх поверхонь.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ЗОЛОТНИК

3.1. Службове призначення та характеристика золотника

Золотник є основним робочим регулюючим органом гідророзподільника (рис. 3.1). Розподільник складається з корпусу з трьома секціями, у кожній з яких у прецизійному циліндричному отворі переміщується золотник. На золотнику виконано кільцеві пояски й проточки. Поясками золотник перекриває, а проточками з'єднує між собою канали корпусу: напірний, зливний і канали споживача. У клапанно-золотникових розподільниках золотник працює разом із зворотним (підйомним) клапаном, який утримує тиск у порожнині циліндра, поки золотник не відкриє канал.

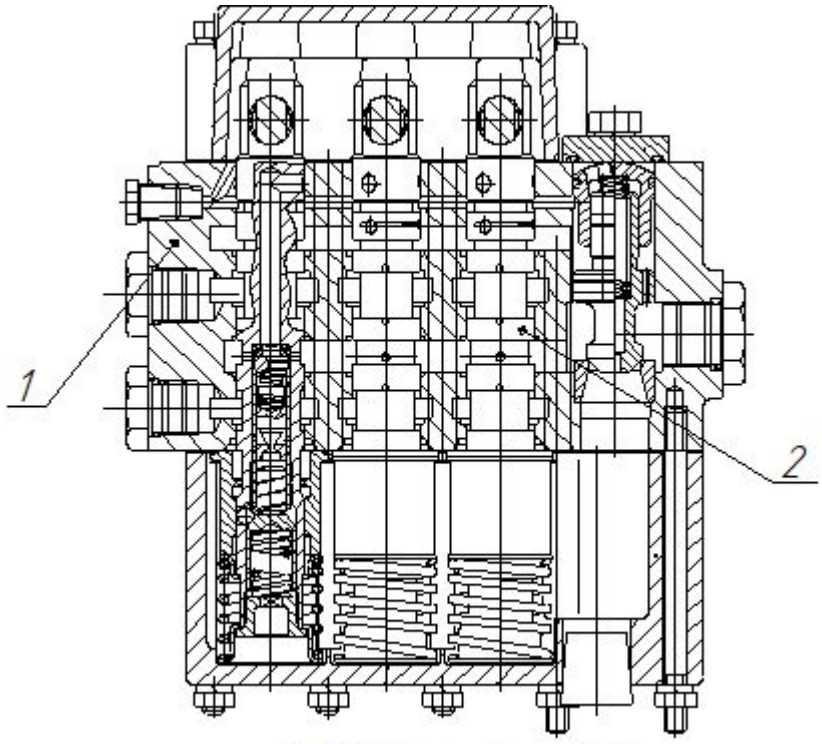


Рис. 3.1. Гідророзподільник:
1 – корпус; 2 – золотник

Гідророзподільник виконує функції: розподілу потоку робочої рідини від насоса між споживачами та змінює його напрямок; забезпечення підйому, утримування, опускання і, залежно від виконання секції, плаваючого положення робочого органу; у нейтральному положенні направляє рідину від насоса на злив з мінімальними втратами тиску й надійно запирає порожнини циліндрів; автоматично повертає

золотник у нейтральне положення після завершення робочої операції та при досягненні заданого тиску в системі, що розвантажує насос і захищає систему від перевантаження.

Золотник (рис. 3.2) є основним керуючим елементом кожної секції. Від точності його виготовлення залежать герметичність гідроприводу, плавність переміщення робочого органу, втрати рідини через внутрішні перетікання, а отже, ККД і надійність усієї гідросистеми.

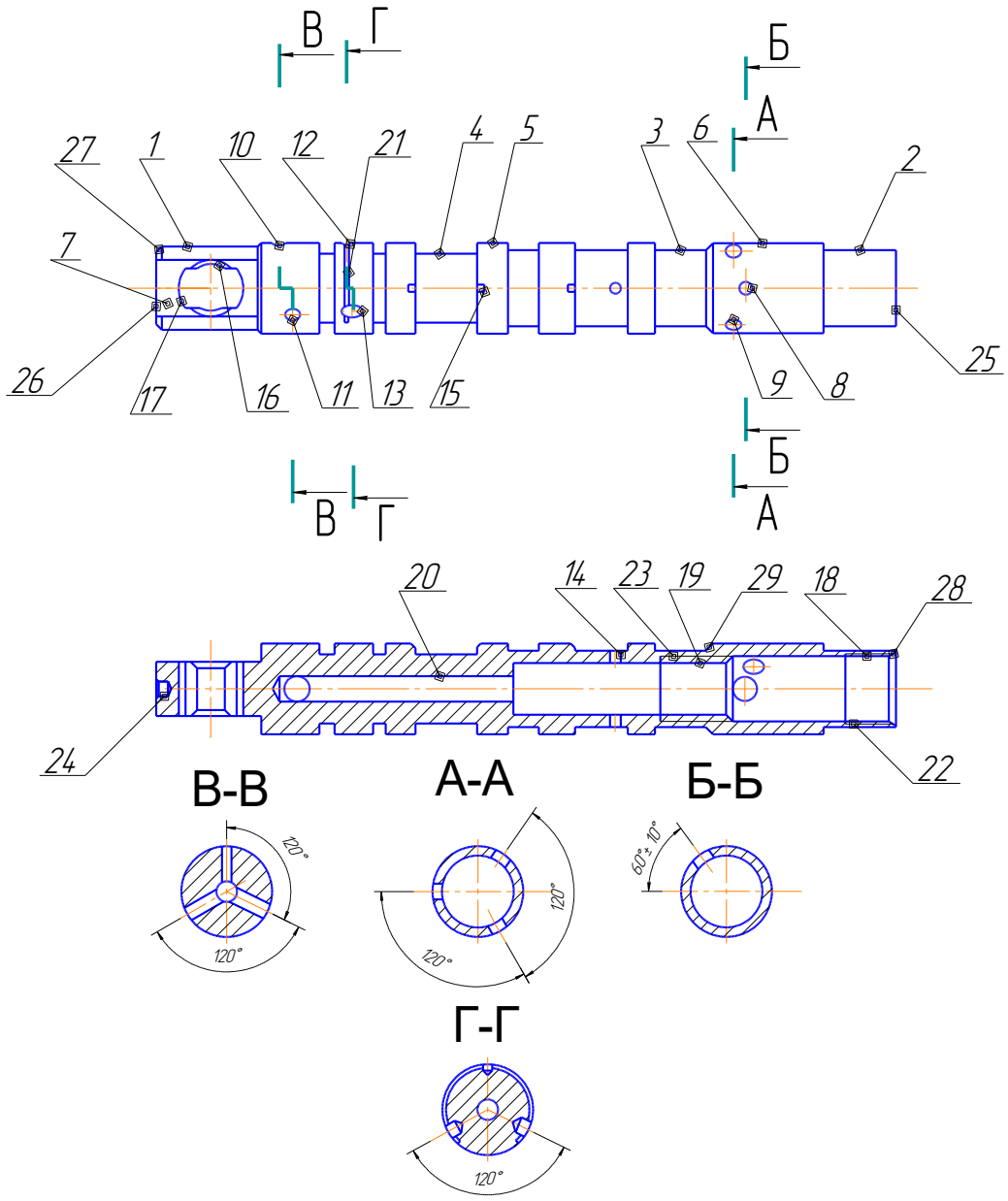


Рис. 3.2. Ескіз деталі золотник

За формою золотник являє собою порожнистий циліндричний вал ступінчастої форми з чергуванням робочих потовщень (поясків/буртиків) та звужених шийок

(проточок). Всередині золотника виконано осьовий отвір, у якому розміщуються елементи механізму автоматичного повертання та фіксації. На корпусі золотника є радіальні отвори для проходу масла до внутрішньої порожнини та керування автоматикою.

Золотник призначений для спрямування тиску від гідронасоса до відповідних порожнин виконавчих органів (гідроциліндрів або гідромоторів) та забезпечення зливу масла назад у бак. Також золотник забезпечує робочі позиції за принципом перемикання гідросистеми між 4 основними положеннями: нейтральним, підйомом, опусканням та плаваючим.

В нейтральному положенні масло від насоса перенаправляється на злив у бак, а порожнини циліндрів заперті. В положенні підйому відбувається подача масла в підпоршневу порожнину циліндра (злив із надпоршневої). В положенні примусового опускання здійснюється подача масла в надпоршневу порожнину, злив із підпоршневої. В плаваючому положенні обидві порожнини циліндра з'єднані зі зливом. Після закінчення робочого ходу циліндра, відбувається взаємодія з фіксатором та автоматичним механізмом повернення в нейтральне положення.

3.2. Розробка технології виготовлення золотника

Аналіз точності та технологічності

Точність золотника визначається вимогами до золотникової пари «золотник - корпус». Зазор у цій парі має бути мінімальним, достатнім для вільного переміщення золотника, але таким, що обмежує внутрішні перетікання рідини. Тому найвищі вимоги висуваються до зовнішньої циліндричної поверхні 5 (рис. 3.2) $\varnothing 25^{+0.068}_{-0.018}$ мм яка має шорсткість Ra0,52.

В таблиці 3.1 представлені параметри точності та шорсткості деталі золотник.

Таблиця 3.1

Параметри точності деталі золотник

Позначення поверхні	Назва поверхні	Розміри з відхиленнями, заданими від розглядаємої поверхні	Квалітет точності	Точність відносних поворотів, відстаней, розміщення поверхонь	Точність форми	Шорсткість поверхні Ra	Вагомість поверхні, як конструкторської бази
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Циліндр. зов.	$\varnothing 23{,}3_{-0{,}52}$	-	–	–	6,3	–
2	Циліндр. зов.	$\varnothing 23{,}3_{-0{,}545}$	h12	–	–	6,3	–
3	Циліндр. зов.	$\varnothing 21_{-0{,}84}$	h14	–	–	6,3	–
4	Циліндр. зов.	$\varnothing 19_{-0{,}84}$	h14	–	–	6,3	–
5	Циліндр. зов.	$\varnothing 25^{+0.068}_{-0.018}$	h11	–	○ 0,003 ⌭ 0,007	0,52	–
6	Циліндр. зов.	$\varnothing 24{,}8^{-0.055}_{-0.149}$	d10	–	–	3,2	–
7	Лиска	$15_{-0{,}52}$	±t14/2	–	–	6,3	–
8	Отвір	∅5,5±0,48	H14	–	–	6,3	–
9	Отвір	$\varnothing 6{,}5^{+0{,}22}$	H12	⌖ R0.25		6,3	–
10	Отвір	∅3,5	H14	⌖ R0.25		6,3	–
11	Отвір	∅6,5	H14	–	–	6,3	–
12	Отвір	∅3,5	H14	–	–	6,3	–
13	Отвір	∅5	H14	–	–	6,3	–
14	Отвір	∅3	H14	–	–	6,3	–
15	Паз	1,4±0,2	H14	–	–	6,3	–
16	Отвір	$\varnothing 14^{+0{,}43}$	H14	–	–	6,3	–
17	Паз	$11^{+0.1}_{-0.03}$	B11	–	–	3,2	–
18	Отвір	$\varnothing 18{,}4^{+0.27}_{+0.05}$	H12	–	–	3,2	–
19	Отвір	$\varnothing 14{,}3^{+0{,}18}$	H12	–	◎ R0.5	6,3	–
20	Отвір	$\varnothing 7^{+0{,}5}$	H14	–		6,3	–
21	Паз	0,75±0,25	H13	–	–	6,3	–
22	Різь	M20x1,5	7H	–	–		–
23	Різь	M16x1,5	6H	–	–		–
24	Центровоч. отвір	$\varnothing 4^{+0{,}12}$	H11	–	–	3,2	–
25,26	Торець	204±0,25	–	–	–	6,3	–
27	Фаска	2x45	±t14/2	–	–	6,3	–
28	Фаска	3x30	±t14/2	–	–	6,3	–
29	Фаска	2x45	±t14/2	–	–	6,3	–

Розробка технологічного процесу

В діючому технологічному процесі механічної обробки деталі золотник використані агрегатні верстати, габаритні верстати, комбіновані металорізальні інструменти. В даному технологічному процесі також використана значна кількість одиниць обладнання, що обумовлює велику кількість операцій та займає багато часу.

У новому технологічному процесі впроваджуються верстати з ЧПУ та високопродуктивний інструмент відомих зарубіжних виробників, таких як: Sandvic Coromnt, „TaeguTec" та інших. Застосування верстатів з ЧПУ оснащених контршпинделем забезпечить автоматизацію переустановки деталі та зменшить кількість металорізального обладнання. Використання обладнання з ЧПУ та якісного інструменту дасть змогу підвищити якість продукції, що виготовляється, зменшити кількість операцій механічної обробки і загалом зменшити працемісткість.

Вибір заготовки

Для виготовлення деталі золотник як вихідну заготовку обрано сортовий гарячекатаний круглий прокат діаметром 28 мм з цементованої легованої сталі 15Х. Конструктивно деталь являє собою тіло обертання з максимальним зовнішнім діаметром 25,5 мм, тому діаметр заготовки 28 мм гарантує необхідний технологічний припуск для подальшої чорнової та чистової обробки. У серійному виробництві вибір прутка є найбільш економічно доцільним, оскільки він дозволяє автоматизувати процес подачі матеріалу на токарно-фрезерних верстатах з ЧПУ за допомогою автоматичних подавачів.

Таблиця 3.2

Хімічний склад та механічні властивості матеріалу Сталь 15Х

Хімічний склад					Механічні властивості				
C	Si	Mn	Cr	Ni	$\sigma_Г$	$\sigma_В$	δ	ψ	НВ
не більше					в кг/мм^2		в %		179
0,12-0,18	0,17-0,37	0,4-0,7	0,7-1,0	–	50	70	12	45	

Вибір методів обробки поверхонь

Для поверхонь, що підлягають більш ніж одній обробці різанням або абразивним інструментом необхідно обрати більш раціональний маршрут обробки. Для цього необхідно прийняти два маршрути та порівняти їх.

В якості прикладу наведено вибір маршруту обробки найбільш точної поверхні золотника – зовнішньої циліндричної поверхні $Ø25^{+0,068}_{-0.018}$ шорсткість якої Ra 0,52мкм.

Заготовка – прокат 12-го квалітету, δ = 210 мкм.

Обираємо два маршрути обробки поверхні 5.

Перший маршрут:

1. Точіння чорнове	k12	Ra = 20 мкм	δ = 210 мкм
2. Точіння чистове	k11	Ra = 20 мкм	δ = 130 мкм
3.Шліфування чистове	k10	Ra = 0,52 мкм	δ = 86 мкм

Другий маршрут:

1. Точіння чистове	k10	Ra = 20 мкм	δ = 86 мкм
2. Точіння тонке	k7	Ra = 0,52 мкм	δ = 21 мкм

Визначаємо загальне уточнення:

$$\varepsilon_з = \frac{\delta_з}{\delta_д}$$

де $\delta_з$ – допуск на розмір заготовки;

$\delta_д$ – допуск на розміри деталі.

Визначаємо уточнення по кожному переходу:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_{i-1}}{\delta_i}$$

де δ_{i-1} – допуск на розмір поверхні для попереднього переходу;

δ_i – допуск на розмір поверхні для даного переходу.

Загальне дійсне уточнення розміру поверхні:

$$\varepsilon_д = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \ldots \varepsilon_m$$

де m – число переходів обробки поверхні деталі.

Необхідне загальне уточнення для поверхні 5:

$$\varepsilon_з = \frac{210}{86} = 2{,}441$$

Уточнення по кожному переходу для першого маршруту:

$$\varepsilon_1 = \frac{210}{210} = 1 \qquad \varepsilon_2 = \frac{210}{130} = 1{,}615 \qquad \varepsilon_3 = \frac{130}{86} = 1{,}512$$

Уточнення по кожному переходу для другого маршруту:

$$\varepsilon_1 = \frac{210}{86} = 2{,}45 \qquad \varepsilon_2 = \frac{86}{21} = 4$$

Загальне дійсне уточнення:

$$\varepsilon_{Д1} = 1 \cdot 1{,}615 \cdot 1{,}512 = 2{,}441$$

$$\varepsilon_{Д2} = 2{,}45 \cdot 4 = 9{,}76$$

Таким чином, найбільш доцільним є маршрут №1, так як $\varepsilon_{Д1}$ більш наближене до $\varepsilon_з$.

Вибір маршрутів обробки інших поверхонь зведено до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Таблиця технологічних маршрутів обробки поверхонь деталі золотник

Позначення поверхні	Допуск на поверхню по кресленню, $\delta_д$, мм	Шорсткість поверхні, Ra, мкм	Допуск на заготовку по поверхні, мм	Загальне уточнення, $\varepsilon_з$	Можливі варіанти маршрутів обробки		Допуск на метод обробки	Уточнення по кожному переходу
					№ п/п	Зміст маршруту		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,52	6,3	0,210	0,403	1	Точіння	0,52	0,403
2	0,45	6,3	0,210	0,466	1	Точіння	0,52	0,403
5	0,086	0,52	0,210	2,44	1	Точіння чорнове Точіння чистове Шліфування	0,24 0,13 0,086	1 1,615 1,542
					2	Точіння чистове Точіння тонке	0,086 0,021	2,45 4
6	0,094	3,2	0,21	2,23	1	Точіння	0,21	1
7	0,52	3,2	0,21	0,403	1	Фрезерування	0,21	1
8	0,96	6,3	0,21	0,218	1	Свердління	0,12	1,75
9	0,22	6,3	0,21	0,95	1	Свердління	0,12	1,75
10	0,3	6,3	0,21	0,7	1	Свердління	0,32	0,7
11	0,36	6,3	0,21	0,58	1	Свердління	0,36	0,58
12	0,3	6,3	0,21	0,7	1	Свердління	0,3	0,7
13	0,3	6,3	0,21	0,7	1	Свердління	0,3	0,7
14	0,3	6,3	0,21	0,7	1	Свердління	0,3	0,7

Продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	0,25	6,3	0,21	0,84	1	Фрезерування	0,25	0,84
16	0,43	6,3	0,21	0,48	1	Свердління	0,43	0,48
17	0,43	6,3	0,21	0,48	1	Прошивання		
					2	Фрезерування		
18	0,22	3,2	0,21	0,95	1	Свердління Зенкерування	0,43 0,043	0,48 10
19	0,52	6,3	0,21	0,403	1	Свердління Зенкерування	0,52 0,07	0,403 7,42
20	0,5	6,3	0,21	0,42	1	Свердління	0,3	
21	0,3	6,3	0,21	0,7	1	Фрезерування	0,12	
22,23	–	–	–	–	1	Різьбонарізання	–	–
24	0,12	–	0,21	1,75	1	Свердління	0,12	1,75
25,26	0,5	6,3	0,21	0,42	1	Точіння	0,2	1,05
27	0,12	6,3	0,21	1,75	1	Точіння	0,12	1,75
28	0,12	6,3	0,21	1,75	1	Зенкерування	0,12	1,75
29	0,12	6,3	0,21	1,75	1	Точіння	0,12	1,75

Розробка маршруту виготовлення золотника

Маршрут механічної обробки деталі золотник формується на основі комплексного аналізу обраних методів та послідовності обробки її окремих поверхонь, типу та обсягу виробництва, а також технологічних можливостей задіяного металорізального обладнання. При цьому вирішальне значення мають технічні вимоги креслення, точність взаємного розташування поверхонь, шорсткість та витримані розмірні зв’язки на всіх етапах виготовлення деталі.

Розроблений маршрут обробки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Таблиця технологічних маршрутів обробки деталі золотник

Маршрутний технологічний процес	
базовий	проєктуємий
1	2
005 Відрізна 8285 Відрізний СЛП Відрізати заготовку	005 Відрізна 8285 Відрізний СЛП Відрізати заготовку

Продовження табл. 3.4

1	2
015 Токарно-револьверна 1336 Токарно-револьверний Підрізати торець, свердлити центрувальний отвір, точити ЗЦП.	010 Токарно-фрезерна з ЧПУ HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ Установ А: підрізати торець, свердлити отвір, точити ЗЦП. Установ Б: підрізати торець, свердлити отвір.
020 Горизонтально-фрезерна 6Р82 Горизонтально-фрезерний Фрезерувати 2 лиски.	015 Токарно-фрезерна з ЧПУ HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ Точити ЗЦП, канавки, фрезерувати 2 лиски.
025 Свердлильний 2А135 Свердлильний Свердлити отвір.	020 Токарна з ЧПУ Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ Свердлити 3 отвори, зенкерувати 2 отвори, зенкувати фаску.
030 Протяжна 7А510 Протяжний Прошити отвір.	025 Токарна з ЧПУ Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ Центрувати, свердлити отвори, фрезерувати 3 пази, канавку.
035 Токарна 1А730 Токарний Точити ЗЦП, точити канавки.	030 Токарна з ЧПУ MAZAK Quick Turn Nexus 100-IIM Токарний з ЧПУ Свердлити отвір, зенкуват ифаски.
045 Автоматна 1А240П-6 Токарний напівавтомат Свердлити 3 отвори, зенкерувати 2 отвори, зенкувати фаску.	035 Прошивочна П6230 Прошивочний Прошити отвір.
055 Агрегатна 3ХА4170 Верстат агрегатний Центрувати, свердлити отвори.	040 Різьбонарізна 2056 Різьбонарізний Нарізати різьбу в двох отворах.
065 Агрегатна 3ХА4159 Верстат агрегатний Центрувати, свердлити отвори.	045 Безцентрово-шліфувальна Palmary PC-12S Безцентрово-шліфувальний Шліфувати ЗЦП.
070 Різьбонарізна 2056 Різьбонарізний Нарізати різьбу в отворі.	080 Слюсарна Зачистити заусенці
075 Різьбонарізна 2056 Різьбонарізний Нарізати різьбу в отворі	085 Контрольна Перевірити розміри
080 Круглошліфувальна 3151 Круглошліфувальний Шліфувати ЗЦП.	-
085 Фрезерна 6Р80Г Горизонтально-фрезерний Фрезерувати пази.	-

Вибір технологічних баз

Для деталі золотник на 010 операції механічної обробки чорновою базою є циліндрична поверхня заготовки Ø28 та один із торців. На операції 015 отримуємо

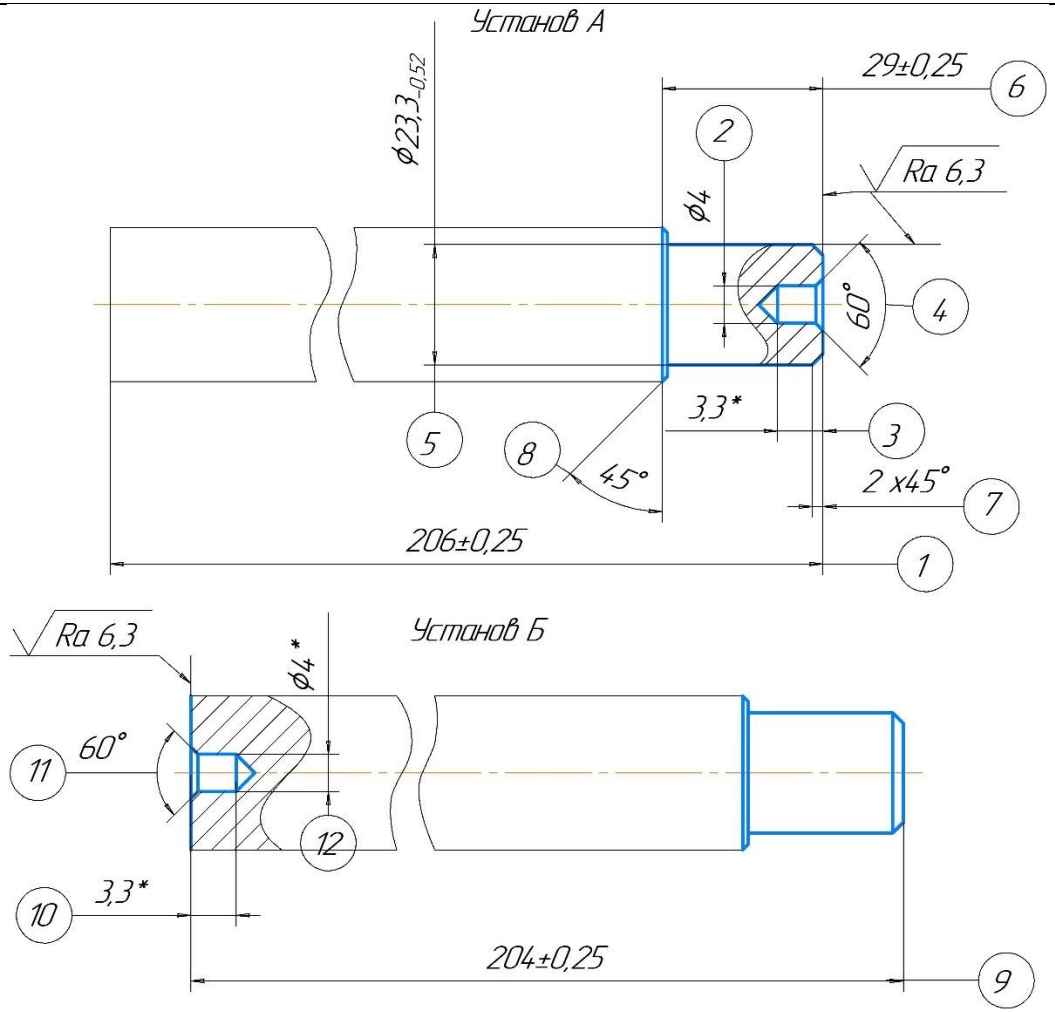
чистову базу – вісь центрів деталі, яка виявляється через оброблювані на цій операції центрові отвори. На наступних операціях механічної обробки чистова база виявляється через вісь деталі.

Розробка структури та змісту технологічних операцій, вибір обладнання для їх здійснення

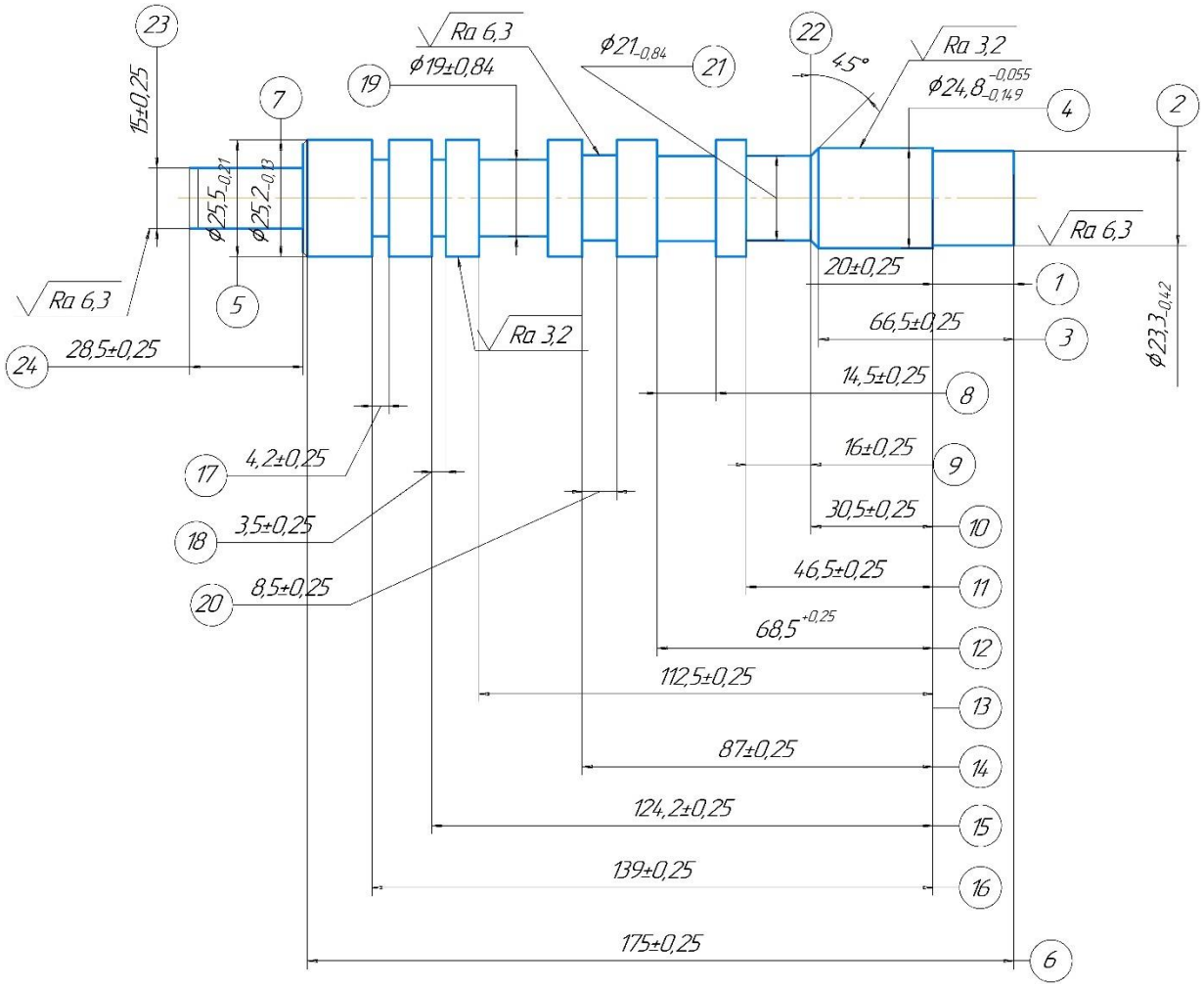
На підставі технологічного маршруту обробки деталі, маршрутів обробки окремих поверхонь та аналізу простановки розмірів, з урахуванням технічних вимог до кожної поверхні, розроблено структуру й зміст технологічних операцій. Для кожної операції вказано її номер і найменування, модель верстата, перелік переходів та послідовність виконання переходів. Також визначено розміри, що витримуються на кожному переході, і допуски на них. Переходи в межах операції згруповано так, щоб обробку якомога повніше виконувати за один установ. Це зменшує похибку базування й скорочує допоміжний час на встановлення та зняття деталі. Результати подано у вигляді таблиці 3.5, що містить номер і найменування операції, модель верстата, операційний ескіз та зміст операції.

Таблиця 3.5

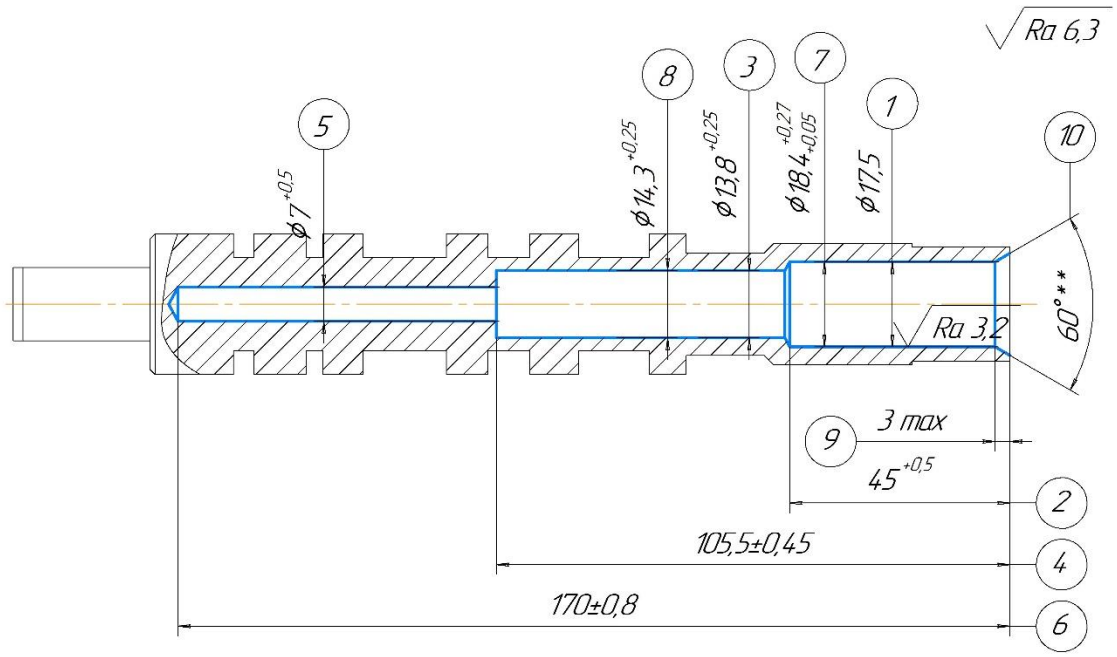
Зміст та структура технологічних операцій обробки деталі золотник

№ та назва опер.	Модель верстату	Операційний ескіз	Зміст операції
1	2	3	4
010 Токарно-фрезерна з ЧПУ	HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ		1.Встановити та закріпити заготовку. Установ А 2. Підрізати торець, витримуючи розмір 1. 3. Свердлити центрувальний отвір, витримуючи розміри 1, 2, 3, допуск 4. 4. Точити зовнішню циліндричну поверхню та фаски, витримуючи розміри 5, 6, 7, 8. 5. Автоматичний перезатиск деталі в патроні контршпинделя. Установ Б 6. Підрізати торець, витримуючи розмір 9. 7. Свердлити центрувальний отвір, витримуючи розміри 10, 11, 12. 8. Відкріпити та зняти деталь

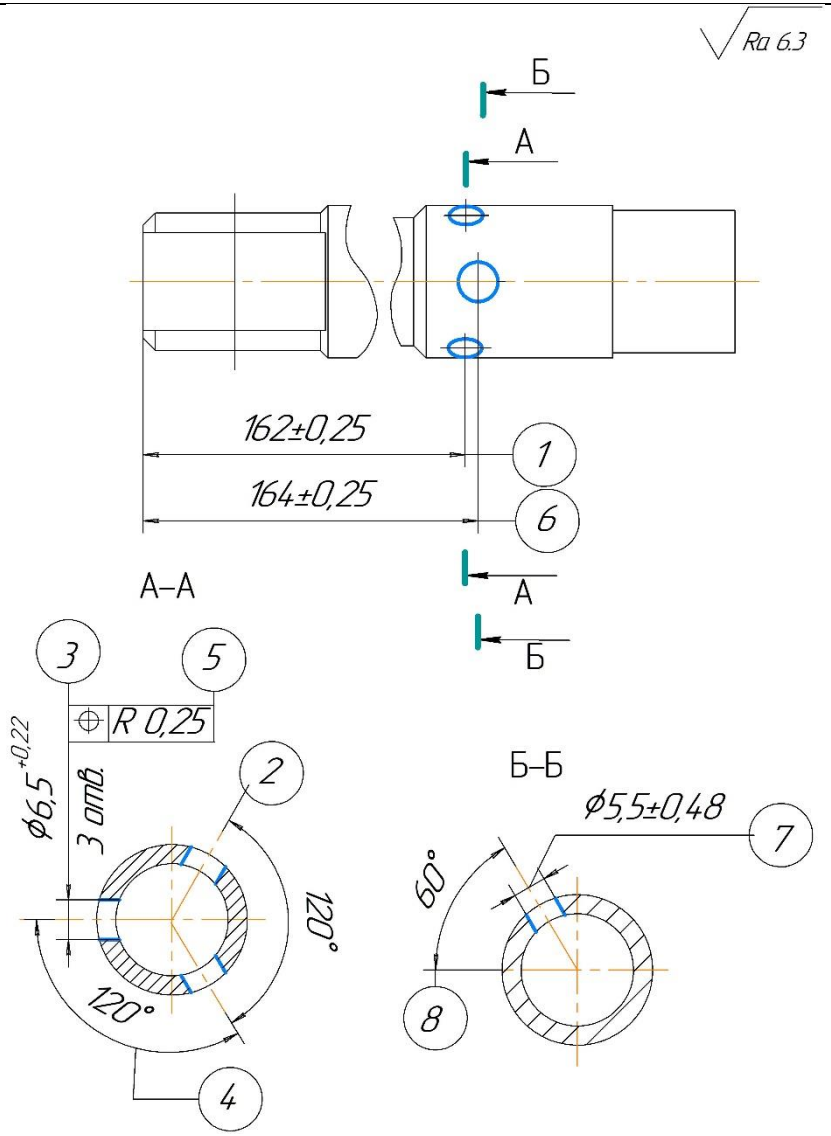
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
015 Токарно-фрезерна з ЧПУ	HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Точити зовнішню циліндричну поверхню (ЗЦП), витримуючи розміри 1, 2. 3. Точити ЗЦП, витримуючи розміри 1, 3, 4. 4. Точити ЗЦП, витримуючи розміри 3, 5, 6. 5. Точити ЗЦП, витримуючи розміри 3, 6, 7. 6. Точити канавки, витримуючи розміри 8-22. 7. Фрезерувати 2 лиски, витримуючи розміри 23, 24. 8. Відкріпити та зняти деталь.

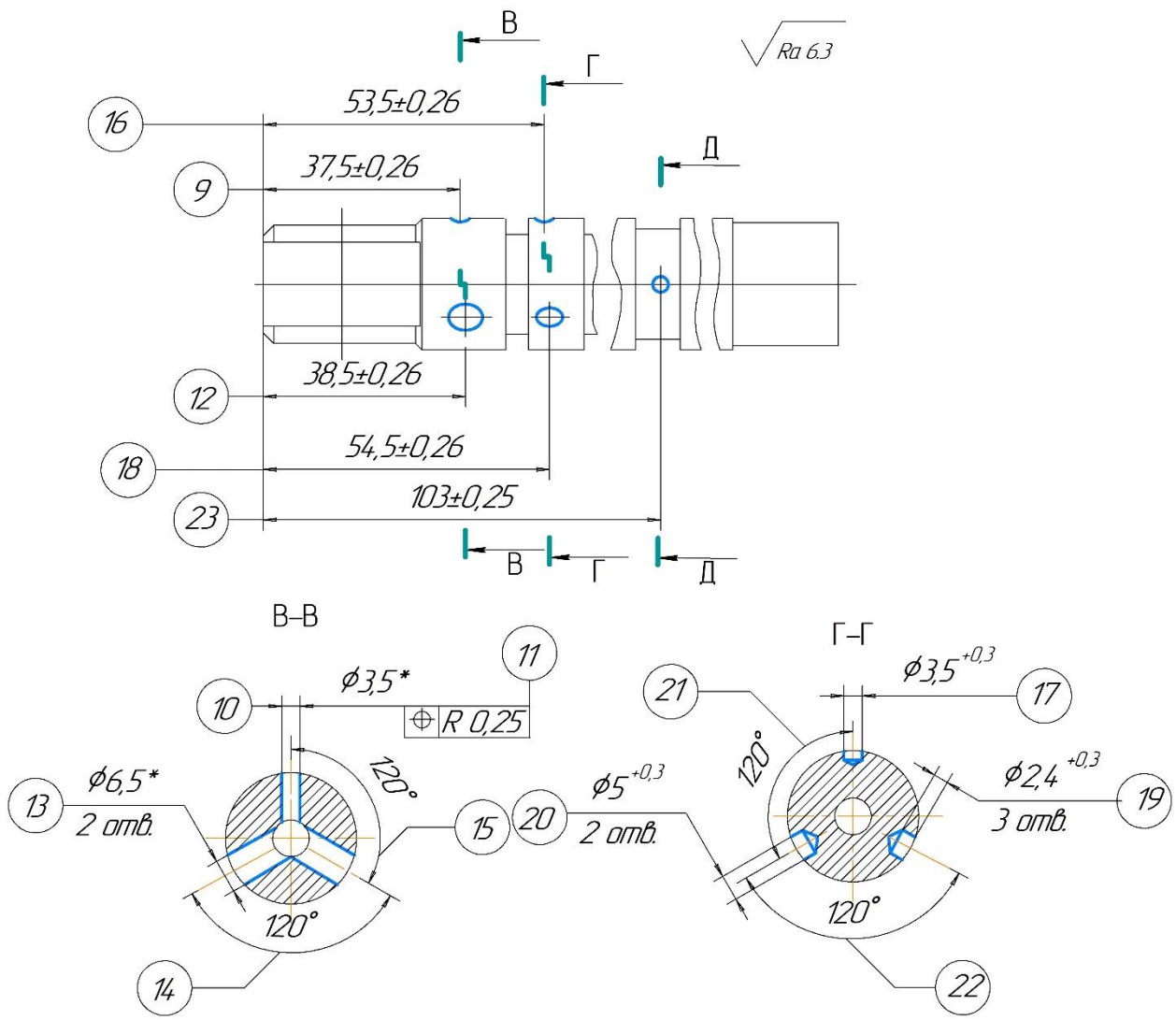
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
020 Токарна з ЧПУ	Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Свердлити отвір, витримуючи розміри 1, 2. 3. Свердлити отвір, витримуючи розміри 3, 4. 4. Свердлити отвір, витримуючи розміри 5, 6. 5. Зенкерувати отвір, витримуючи розміри 2, 7. 6. Зенкерувати отвір, витримуючи розміри 4, 8. 7. Зенкувати фаску, витримуючи розміри 9, 10. 8. Відкріпити та зняти деталь.

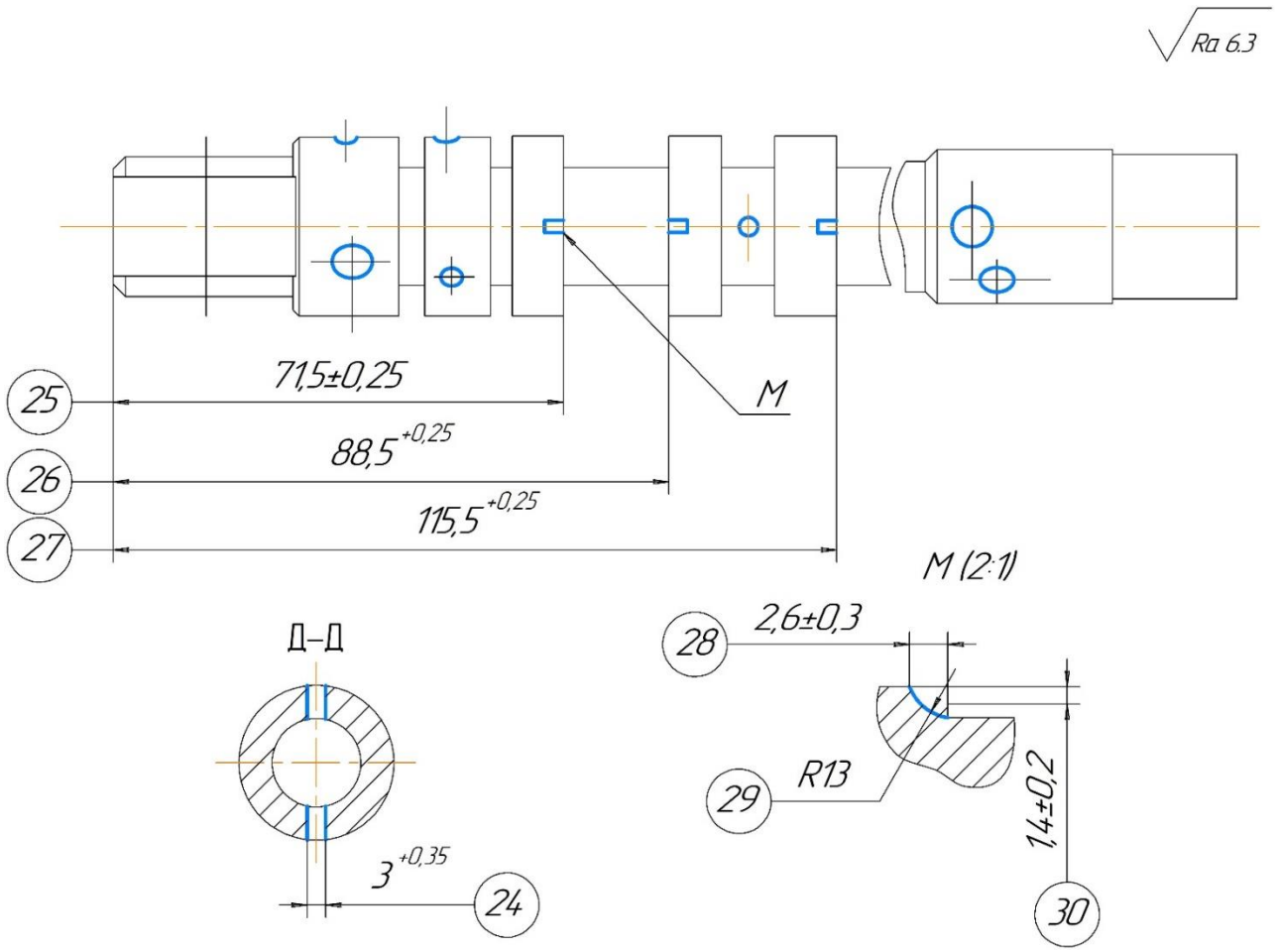
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
025 Токарна з ЧПУ	Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Центрувати 10 отворів. 3. Свердлити 3 отвори, витримуючи розміри 1, 2, 3, 4, допуск 5. 4. Свердлити отвір, витримуючи розміри 6, 7, 8.

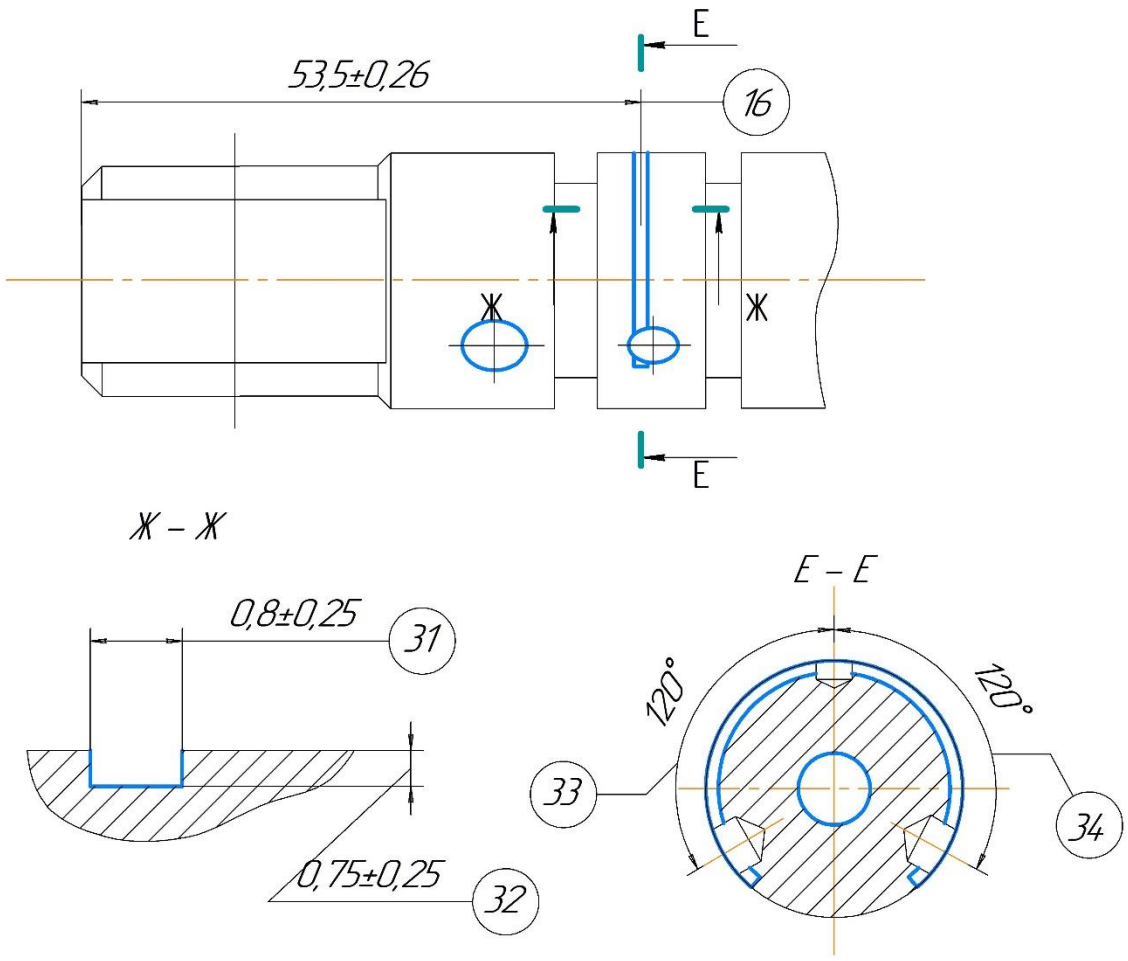
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			5. Свердлити отвір, витримуючи розміри 9, 10, допуск 11. 6. Свердлити 2 отвори, витримуючи розміри 12, 13, 14, 15. 7. Свердлити отвір, витримуючи розміри 16, 17. 8. Свердлити 2 отвори, витримуючи розміри 18, 19, 20, 21, 22.

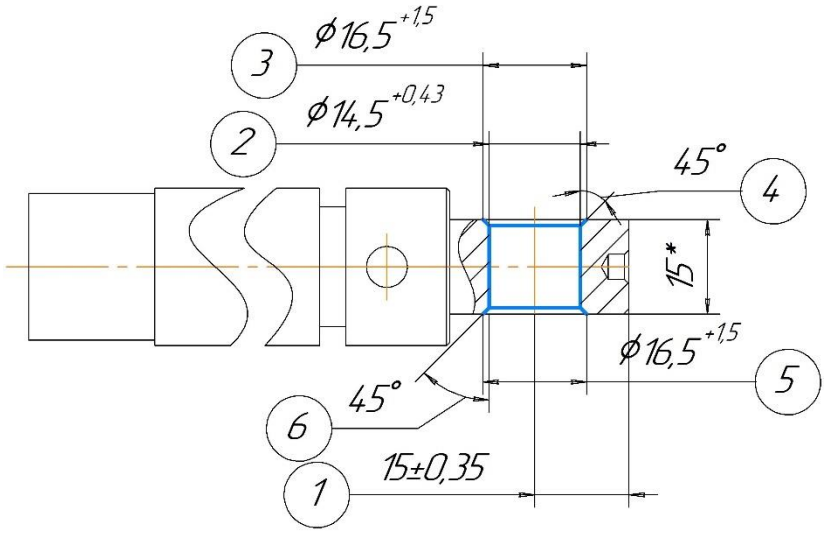
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			9. Свердлити отвір, витримуючи розміри 23, 24. 10. Фрезерувати 3 пази, витримуючи розміри 25, 26, 27, 28, 29, 30.

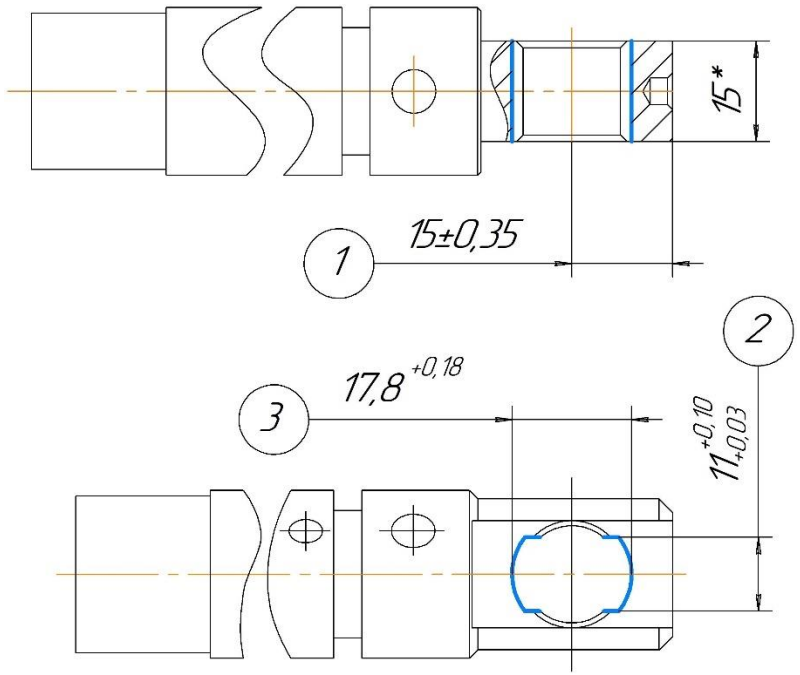
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			11. Фрезерувати дугову канавку, витримуючи розміри 16, 31, 32, 33, 34. 12. Відкріпити та зняти деталь.

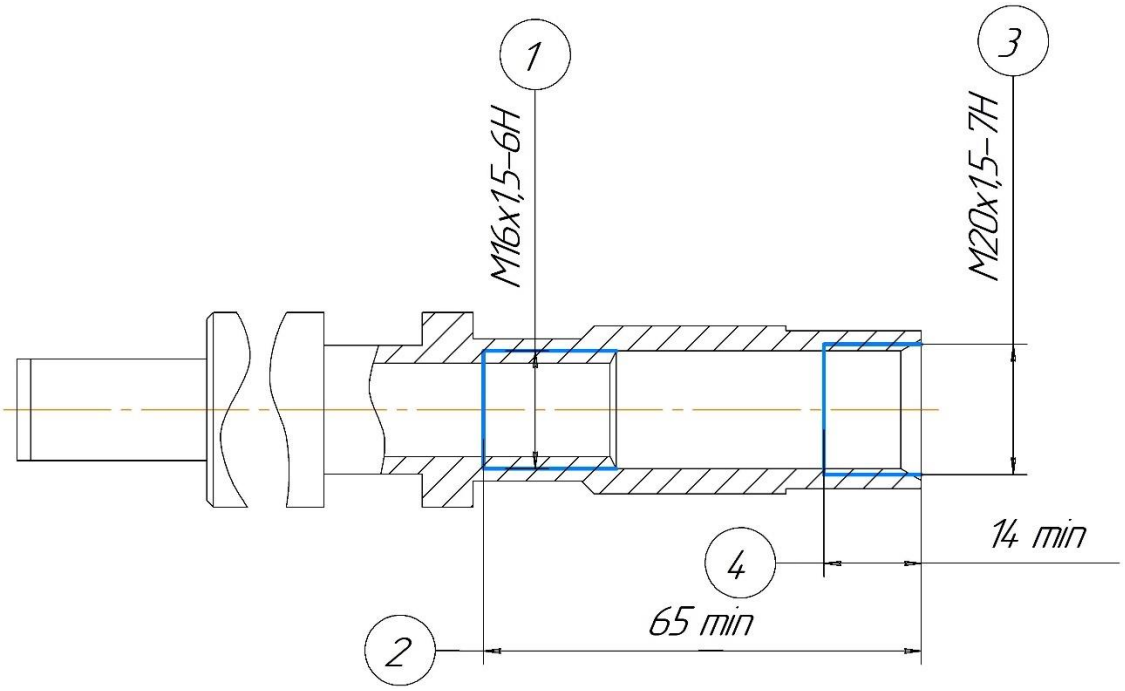
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
030 Токарна з ЧПУ	MAZAK Quick Turn Nexus 100-IIM Токарний з ЧПУ		1.Встановити та закріпити деталь. 2.Свердлити отвір, витримуючи розміри 1, 2. 3.Зенкувати фаску, витримуючи розміри 1, 3, 4. 4.Зенкувати фаску, витримуючи розміри 1, 5, 6. 5.Відкріпити та зняти деталь.

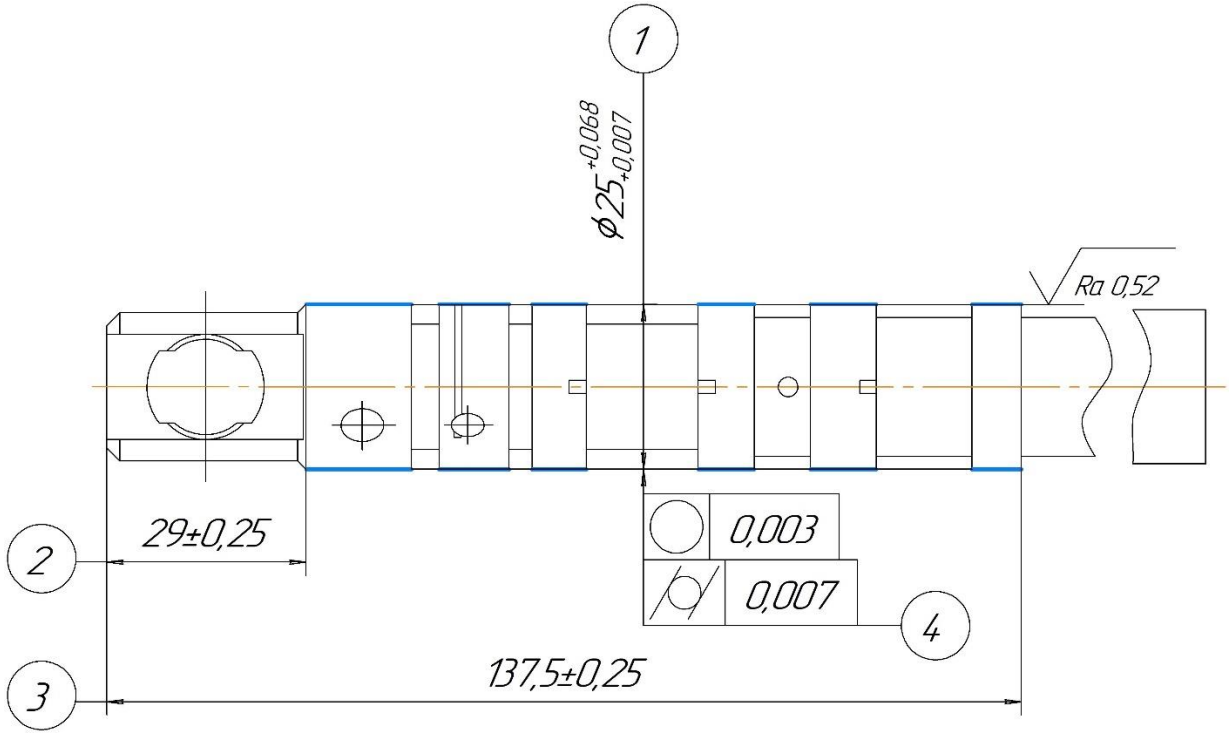
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
035 Прошивочна	П6230 Прес гідравлічний		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Прошити отвір, витримуючи розміри 1, 2, 3. 3.Відкріпити та зняти деталь.

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
040 Різьбонарізна	2056 Різьбонарізний		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Нарізати різьбу, витримуючи розміри 1, 2. 3.Нарізати різьбу, витримуючи розміри 3, 4. 4.Відкріпити та зняти деталь.

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
045 Безцентрово-шліфувальна	Palmary PC-12S Безцентрово-шліфувальний		1.Встановити та закріпити деталь. 2. Шліфувати зовнішні циліндричні поверхні, витримуючи розміри 1, 2, 3, допуски 4. 3.Відкріпити та зняти деталь.

Вибрані металорізальні верстати, їх габаритні розміри, а також технічні характеристики наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Металорізальні верстати для обробки деталі

Номер опер.	Модель та найменування верстату	Максимальний діаметр обробки (мм)	Ряд частот обертання (об/хв)	Ряд подач (мм/об)	Потужність, кВт	Габаритні розміри верстату (мм, ДхШхВ)
010, 015	HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ	305	0 – 6000	0 – 12700	11,2	3226 × 2286 × 1778
020, 025	Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ	200	45 – 4500	0,001 – 1000	7,5	1480 × 1550 × 1510
030	MAZAK Quick Turn Nexus 100-IIM Токарний з ЧПУ	280	35 – 6000		11	1700 × 1630 × 1700
035	П6230 Прес гідравлічний	-	-	-	7,5	1150 × 800 × 2550
040	2056 Різьбонарізний	280	180, 280, 450, 710	0,5…3,5	1,7	2750 × 2040 × 1510
045	Palmary PC-12S Безцентрово-шліфувальний	40	1900 10-300	4 7	5	1750 × 1050 × 1400

Вибір пристроїв для затиску деталі

Обрані затискні пристрої та їх стисла характеристика наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Затискні пристрої для деталі

Номер операції	Найменування пристрою	Вид приводу
010	Шпиндель: Патрон трьохкулачковий Контршпиндель: Патрон трьохкулачковий	Пневматичний
015	Центри	Гідравлічний
020	Патрон трьохкулачковий	Пневматичний
025	Патрон трьохкулачковий	Пневматичний
030	Патрон трьохкулачковий	Пневматичний
035	Пристрій затискний	Пневматичний
040	Патрон трьохкулачковий	Пневматичний
045	Ведучий круг Опорний ніж	Електродвигун

Вибір різальних інструментів

Різальні інструменти, які обрано для обробки деталі золотник наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Ріжучий інструмент для механічної обробки деталі золотник

№ опер.	№ пер.	Найменування інструменту	Шифр інструменту/ різальної пластини	Матеріал різальної частини
1	2	3	4	5
010	2	Різець токарний підрізний	CCLNR 2020K12 / CNMG 120408-PMC	TT8115
	3	Свердло центрувальне Ø4 мм	CoroDrill 860.1-0400-018A1-MM	GC1230
	4	Різець токарний прохідний	PCLNR 2020K12 / CNMG 120408-PMC	TT8115
	6	Різець токарний підрізний	CCLNR 2020K12 / CNMG 120408-PMC	GC4425
	7	Свердло центрувальне Ø4 мм	CoroDrill 860.1-0400-018A1-MM	GC1230
015	2-5	Різець токарний прохідний зовнішній	DCLNR 2020K12 / DNMG 150408PM	TT8125
	6	Різець канавковий	TDT 3-0.4E / TDR 2020-3	TT9080
	7	Фреза кінцева монолітна Ø10	CoroMill 490 / 490-010A12-08L	GC1130
020	2	Свердло монолітне твердосплавне Ø17,5 мм	CoroDrill 860.1-1750-053A1-PM	GC4344
	3	Свердло монолітне твердосплавне Ø13,8 мм	B211A13800HP	KC7325
	4	Свердло монолітне твердосплавне Ø7,0 мм	CoroDrill 860.1-0700-028A1-PM	GC4344
	5	Зенкер насадний Ø18,4 мм	B255A18400	Твердий сплав
	6	Зенкер Ø14,3 мм	B255A14300	Твердий сплав
	7	Зенківка конічна 60∘	2301.060.020	HSS-E
025	2	Центрувальне свердло NC Ø8	CoroDrill 861.1-0800-024A1-PM	Твердий сплав
	3	Свердло Ø6,5 мм	CoroDrill 860.1-0650-026A1-PM	GC4344
	4	Свердло Ø5,5 мм	CoroDrill 860.1-0550-022A1-PM	GC4344
	5	Свердло Ø3,5 мм	CoroDrill 860.1-0350-014A1-PM	GC4344
	6	Свердло Ø6,5 мм	CoroDrill 860.1-0650-026A1-PM	GC4344
	7	Свердло Ø3,5 мм	CoroDrill 860.1-0350-014A1-PM	GC4344
	8	Свердло Ø2,5 мм	CoroDrill 860.1-0240-010A1-PM	GC4344
	9	Свердло Ø3,0 мм	CoroDrill 860.1-0300-012A1-PM	GC4344
	10	Фреза шпонкова кінцева Ø2,6	CoroMill 316-03SM200-02600P	GC1030
	11	Фреза дискова Ø0,8 мм	CoroMill 327 / 327-0.8	Твердий сплав
030	1	Свердло Ø14,5 мм	CoroDrill 860.1-1450-044A1-PM	GC4344
	2-3	Зенківка конічна 45∘ Ø16,5	CoroMill 327 (фасочна)	Твердий сплав

Продовження таблиці 3.8

1	2	3	4	5
035	2	Прошивка 11×17,8 мм	Прошивка спеціальна	Р6М5
040	2	Мітчик М16×1,5-6Н	TDM M16x1.5 6H	HSS-E-PM
	3	Мітчик М20×1,5-7Н	TDM M20x1.5 7H	HSS-E-PM
045	2	Круг шліфувальний	Круг ПП 305×150×76 25А 60 K V	Білий електро-корунд (25А)

Вибір вимірювальних пристроїв та інструментів

Отримані в процесі механічної обробки розміри деталі контролюються пристроями, що зазначені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Вимірювальний інструмент і контрольні пристрої

№ Опер.	Номер перех.	Параметр, що контролюється	Найменування вимірювального інструменту	Стандарт на інструмент
010	2, 6, 9	206±0,25	Штангенциркуль ШЦЦ-І-250 0,05	ДСТУ EN ISO 13385-1
	3, 7	∅4 3,3	Штангенциркуль з глибиноміром ШЦ-І-250 0,05	ДСТУ ISO 13385-2
	4	$\varnothing 23{,}3_{-0{,}52}$	Мікрометр гладкий МК 25-50 0,01	ISO 361
015	2, 3, 4, 5	$\varnothing 24{,}8^{-0{,}055}_{-0{,}149}$ $\varnothing 25{,}2_{-0{,}13}$	Мікрометр гладкий МК 0-25 0,01 / МК 25-50	ISO 3611
	6	∅19±0,84 $\varnothing 21_{-0{,}84}$	Штангенциркуль ШЦ-І-200	ISO 13385-1
	7	15±0,25	Штангенциркуль ШЦ-І-150 0,05	ISO 13385-1
020	2, 3, 4, 5, 6	$\varnothing 18{,}4^{+0{,}27}_{+0{,}05}$ $\varnothing 14{,}3^{+0{,}25}$ 170±0,8	Пробка калібр гладка двостороння / Нутромір	ДСТУ ISO 10939
	7	3; 60°	Штангенглибиномір ШГ-200	ISO 13385-2
025	3, 4, 6, 8	$\varnothing 6{,}5^{+0{,}22}$ ∅5,5±0,48 ∅3,5; ∅2,4	Калібри-пробки гладкі для отворів	ISO 1938
	10, 11	2,6±0,3 0,8±0,25	Штангенциркуль ШЦ-І-150	ISO 13385-1
030	2, 3	$\varnothing 16{,}5^{+1{,}5}$	Штангенциркуль	ISO 1938
035	2	$\varnothing 17{,}8^{+0{,}18}$ $\varnothing 11^{+0{,}1}_{+0{,}03}$	Калібр-пробка профільна Штангенциркуль ШЦ-І	ISO 13385-1
040	2, 3	М16×1,5-6Н М20×1,5-7Н	Калібр-пробка різьбова робоча (ПР / НЕ)	ISO 1502
045	2	$\varnothing 25^{+0{,}068}_{+0{,}007}$	Штангенциркуль	ISO 3611

Визначення припусків та операційних розмірів

Для розрахунку використовуємо методику В. М. Кована. Припуск розраховуємо аналітичним методом на поверхню $Ø25^{+0.068}_{-0.018}$ золотника.

Маршрут обробки поверхні:

1. Точіння чорнове
2. Точіння чистове
3. Шліфування

Мінімальні припуски при послідовній обробці замкнутих поверхонь обертання визначаємо за формулою:

$$2\,z_{i\,min} = 2\,(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2}\,)$$

де Rz_{i-1} - висота нерівностей профілю на попередньому переході;

h_{i-1} - глибина дефектного шару на попередньому переході;

ρ_{i-1} - сумарне уточнення просторового відхилення для елементарної поверхні на попередньому переході (відхилення від паралельності, перпендикулярності, співвісності, симетричності, перетину осей, позиційний допуск; в деяких випадках відхилення форми);

ε_i - похибка встановлення заготовки на виконуємому переході.

Залишкове просторове відхилення обчислюється за допомогою коефіцієнтів уточнення по переходах:

- після чорнового точіння: $\rho_1 = 0{,}06 \cdot 857 = 51$ мкм

- після чистового точіння: : $\rho_2 = 0{,}04 \cdot 857 = 34$ мкм

Розрахунки мінімального припуску, максимальних розмірів та граничні значення припусків зводимо до таблиці 3.10.

Для інших поверхонь деталі золотник значення припусків та допусків знаходимо за допомогою довідкової літератури та зводимо до таблиці 3.11.

Таблиця 3.10

Розрахунок припусків і граничних розмірів за технологічними переходами на обробку зовнішньої циліндричної поверхні деталі золотник

Технологічні переходи обробки поверхні Ø $25^{+0,015}_{+0,002}$	Елементи припуску, мкм				Розрахунковий припуск $2z_{min}$, мкм	Розрахунковий мінімальний розмір, мм	Допуск на виготовлення T_d, мкм	Прийняті округленні розміри по переходах, мм		Отримані граничні припуски, мкм	
	R_z	h	p	ε				d_{min}	d_{max}	$2z_{max.}$	$2z_{min}$
Заготовка	63	60	857	–	-	27.248	210	27.25	27,46		
Точіння чорнове	63	60	51	–	1960	25.288	210	25.29	25,5	1960	1960
Точіння чистове	20	30	34	–	202	25.086	130	25.09	25,22	280	200
Шліфування	6.3	12	–	–	104.6	24.982	86	24.982	25,068	152	108

Таблиця 3.11

Припуски та допуски на поверхні деталі золотник

№ пов.	Маршрут обробки	Припуск, мм		Допуск, мм	Розмір, мм
		Табличний	Визначений		
1	2	3	4	5	6
1	Точіння	4,7	-	0,52	$\varnothing 23{,}3_{-0,52}$
2	Точіння	4,7	-	0,52	$\varnothing 23{,}3_{-0,52}$
3	Точіння	7	-	0,52	$\varnothing 21_{-0,84}$
4	Точіння	9	-	0,52	$\varnothing 19_{-0,84}$
5	Точіння чорнове Точіння чистове Шліфування	- - -	1,96 0,202 0,104	0,21 0,13 0,086	$\varnothing 25{,}5_{-0,21}$ $\varnothing 25{,}22_{-0,13}$ $\varnothing 25^{+0.068}_{-0.018}$
6	Точіння чорнове Точіння чистове	3,2	-	0,21 0,09	$\varnothing 24{,}8^{-0.055}_{-0.149}$
7	Фрезерування	6,5	-	0,52	15±0,52
8	Свердління	5,5	-	0,12	$\varnothing 5{,}5^{+0,12}$
9	Свердління	6,5	-	0,12	$\varnothing 6{,}5^{+0,12}$
10	Свердління	3,5	-	0,3	$\varnothing 3{,}5^{+0,3}$
11	Свердління	6,5	-	0,36	$\varnothing 6{,}5^{+0,36}$
12	Свердління	3,5	-	0,3	$\varnothing 3{,}5^{+0,3}$
13	Свердління	5	-	0,63	$\varnothing 5^{+0,3}$
14	Свердління	3	-	0,3	$\varnothing 3^{+0,3}$
15	Фрезерування	1,1	-	0,25	1,1±0,2
16	Свердління	14,3	-	0,43	$\varnothing 14{,}3^{+0,43}$
17	Прошивання	-	-	0,11	-

1	2	3	4	5	6
18	Свердління Зенкерування	17,5 0,45	-	0,43 0,043	$\varnothing 17{,}5^{+0{,}43}$ $\varnothing 18{,}4^{+0{,}043}$
19	Свердління Зенкерування	13,8 0,5	-	0,28 0,28	$\varnothing 13{,}8^{+0{,}28}$ $\varnothing 14{,}3^{+0{,}28}$
20	Свердління	7	-	0,3	$\varnothing 7^{+0{,}3}$
21	Фрезерування	0,8	-	0,12	$1{,}251^{+0{,}12}$
22,23	Різьбонарізання	0,5	-	-	-
24	Свердління	4	-	0,12	$\varnothing 4^{+0{,}12}$
25,26	Точіння	2	-	0,21	$2^{+0{,}21}$
27	Точіння	2	-	0,12	$2^{+0{,}12}$
28	Зенкерування	3	-	0,12	$3^{+0{,}12}$
29	Точіння	2	-	0,12	$2^{+0{,}12}$

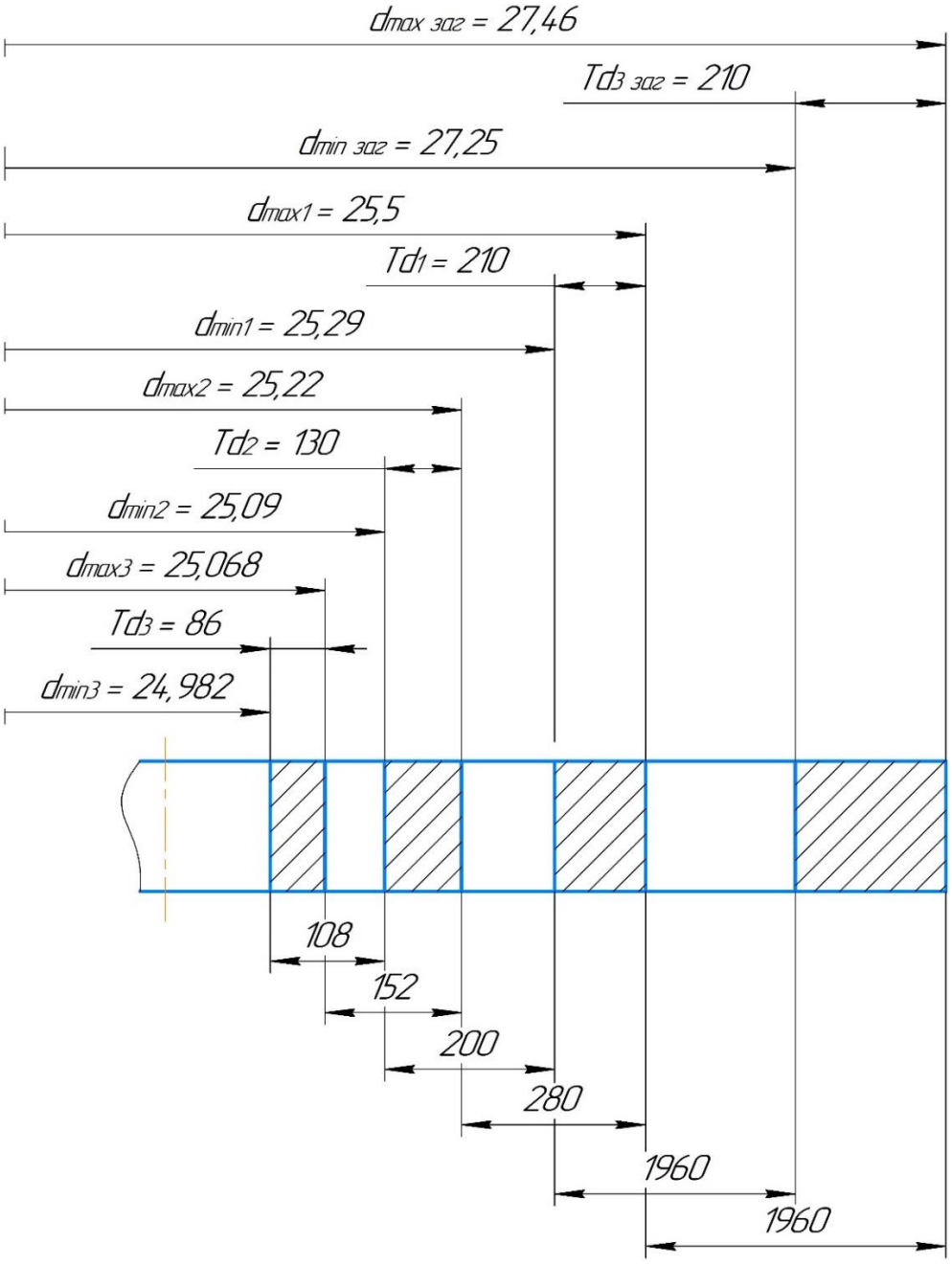


Рис. 3.3. Схема графічного розташування припусків

Визначення режимів різання

На перехід 2 операції 020 – свердління отвору Ø17,5 мм на глибину 45 мм розраховуємо режими різання. Верстат Okuma GENOS L200E-M, матеріал деталі – Сталь 15Х, σв = 700 МПа, діаметр свердління D = 17,5 мм, глибина l = 45 мм.

Глибина різання при свердлінні:

$$t = \frac{D}{2} = \frac{17{,}5}{2} = 8{,}75 \text{ мм}$$

Подача s = 0,32 мм/об - за довідником для сталі, D = 16–20 мм, з урахуванням глибини l/D = 2,6 < 3, коефіцієнт поправки 1,0.

Період стійкості свердла T = 35 хв (за довідником для D = 11–20 мм).

Швидкість різання:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot s^y} \cdot K_v$$

Коефіцієнти для сталі σв = 750 МПа, швидкорізальний інструмент: Cv = 7,0; q = 0,4; y = 0,7; m = 0,2. Загальний поправочний коефіцієнт:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{uv} \cdot K_{lv}, \quad K_{mv} = \left(\frac{750}{\sigma_в}\right)^{nv} = \left(\frac{750}{700}\right)^{0{,}9} = 1{,}064$$

де Kuv = 1,0, Klv = 1,0 (l/D < 3). Тоді Kv = 1,064.

$$V = \frac{7{,}0 \cdot 17{,}5^{0{,}4}}{35^{0{,}2} \cdot 0{,}32^{0{,}7}} \cdot 1{,}064 = 25{,}5 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 25{,}5}{3{,}14 \cdot 17{,}5} = 464 \text{ хв}^{-1}$$

Приймається n = 464 хв⁻¹ (не перевищує максимальну частоту обертання верстата 4500 хв⁻¹); дійсна швидкість різання Vд = π·D·n/1000 = 25,5 м/хв.

Крутний момент, осьова сила й потужність різання:

$$M = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p = 10 \cdot 0{,}0345 \cdot 17{,}5^2 \cdot 0{,}32^{0{,}8} \cdot 0{,}95 = 40{,}3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p = 10 \cdot 68 \cdot 17{,}5^1 \cdot 0{,}32^{0{,}7} \cdot 0{,}95 = 5090 \text{ Н}$$

$$N = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{40{,}3 \cdot 464}{9550} = 1{,}96 \text{ кВт}$$

Потужність різання слід звірити з паспортною потужністю привода шпинделя верстата. Кр = $(\sigma в/750)^{0,75}$ = 0,95.

Основний (машинний) час:

$$t_o = \frac{L}{n \cdot s},\ L = l + y = 45 + (0{,}3 \cdot 17{,}5 + 2) = 52{,}25 \text{ мм}$$

$$t_o = \frac{52{,}25}{464 \cdot 0{,}32} = 0{,}35 \text{ хв}$$

Отримані значення s = 0,32 мм/об, V = 25,5 м/хв, n = 464 $хв^{-1}$, to = 0,35 хв внесено до таблиці 3.12.

Режими різання на всі переходи операцій механічної обробки деталі золотник наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Режими різання

Номер опер.	Номер переходу	Припуск t, мм	s, мм/об	V, м/хв	n, $хв^{-1}$
1	2	3	4	5	6
010	2	1,00	0,20	246,4	2801
	3	2,00	0,08	44,2	3518
	4	2,35	0,30	199,9	2272
	6	1,00	0,20	246,4	2801
	7	2,00	0,08	44,2	3518
015	2	2,35	0,30	199,9	2272
	3	1,60	0,15	243,2	2765
	4	1,25	0,20	238,3	2709
	5	1,40	0,20	234,3	2663
	6	3,10	0,08	120,0	1516
	7	5,25	0,05	57,7	1148
020	2	8,75	0,32	25,5	464
	3	6,90	0,22	18,6	430
	4	3,50	0,08	25,0	1135
	5	0,45	0,40	25,5	441
	6	0,25	0,40	26,6	592
	7	1,80	0,15	33,3	481

Продовження таблиці 3.12

1	2	3	4	5	6
025	2	2,00	0,08	44,2	3518
	3	3,25	0,15	31,2	1529
	4	2,75	0,13	35,7	2069
	5	1,75	0,07	46,0	4185
	6	3,25	0,15	31,2	1529
	7	1,75	0,07	46,0	4185
	8	2,50	0,12	36,4	2317
	9	1,50	0,05	31,8	3370
	10	2,60	0,01	56,5	6000
	11	0,75	0,003	15,1	6000
030	2	7,25	0,28	26,0	571
	3	1,00	0,15	34,3	662
	4	1,00	0,15	34,3	662
040	2	0,5	1,50	9,0	180
	3	0,5	1,50	7,0	112
045	2	0,10	0,0015	33 м/с	31

Технічне нормування операцій

Технічне нормування операції механічної обробки – це встановлення технічно обґрунтованої норми часу на її виконання за заданих організаційно-технічних умов: прийнятого обладнання, оснастки, різального та вимірювального інструмента, режимів різання, кваліфікації виконавця й розміру партії деталей. Норма часу є основою для визначення потрібної кількості обладнання та робітників, планування завантаження верстатів, оцінювання продуктивності технологічного процесу й розрахунку собівартості виготовлення деталі.

Основний (технологічний) час to – час безпосередньої зміни розмірів, форми та властивостей поверхні заготовки. При обробці на верстатах він визначається за довжиною робочого ходу, подачею й частотою обертання.

Допоміжний час – час на дії, що забезпечують виконання основної роботи: встановлення, закріплення та зняття деталі, підведення й відведення інструмента, зміну інструмента, вимірювання. Сума основного й допоміжного часу утворює

оперативний час. Час обслуговування робочого місця охоплює технічне обслуговування (заміна затупленого інструмента, підналагодження верстата, видалення стружки) й організаційне обслуговування. Час перерв – це час на відпочинок і особисті потреби. Сума основного, допоміжного часу, часу обслуговування та перерв є штучним часом. Підготовчо-заключний час витрачається на налагодження верстата й оснастки на початку партії та їх здавання наприкінці й не залежить від кількості деталей у партії. Штучно-калькуляційний час враховує підготовчо-заключний час, віднесений до однієї деталі, і є розрахунковою нормою часу на операцію.

Визначивши та розрахувавши норми часу на операції механічної обробки деталі золотник, заносимо їх в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13

Норма часу на обробку деталі золотник

Номер операції	$t_о$, хв.	$t_д$, хв.	$t_{обсл}$, хв.	$t_{пер}$, хв.	$t_{шт}$, хв.	$t_{п-з}$, хв.	$t_{шт-к}$, хв.
010	0,7	0,50	0,03	0,03	0,81	20	0,96
015	3,2	0,49	0,06	0,08	5,06	20	5,6
020	2,02	0,49	0,12	0,15	2,3	20	3,18
025	2,19	0,15	0,12	0,15	2,31	20	2,66
030	0,19	0,2	0,02	0,03	0,41	20	0,49
035	2,7	0,19	0,04	0,06	2,95	15	3,08
040	0,36	0,33	0,03	0,03	0,75	12	0,90
045	0,58	0,15	0,1	0,1	0,8	20	0,91

3.3. Висновки

Спроєктована технологія обробки деталі золотник забезпечує задані кресленням деталі параметри точності та якості поверхонь, а зовнішня циліндрична поверхня 5 підлягає шліфуванню. Кругле шліфування було замінено на безцентрове з метою забезпечення допуску циліндричності, що пред’являється до поверхні 5.

Розроблена технологія складається з 8 операцій механічної обробки на відміну від базового, в якому 12 операцій. Раціоналізація технологічного процесу дозволила скоротити кількість металорізальних верстатів. Застарілі моделі токарних, свердлильних, фрезерних, протяжних та агрегатних верстатів замінено сучасними верстатами з ЧПУ. Застосування верстатів з контршпинделем дало змогу сконцентрувати обробку на меншій кількості обладнання, скоротити кількість операцій і підвищити продуктивність виготовлення деталі. Завдяки цьому оптимізовано час обробки. Для технологічного процесу підібрано затискні та допоміжні пристрої, різальний і вимірювальний інструмент. Також розраховано припуски, режими різання та норми часу.

На основі аналізу методів зменшення похибок форми при врізному безцентровому шліфуванні зовнішніх поверхонь (розділ 2) для зовнішньої циліндричної поверхні 5 золотника $\varnothing 25^{+0,068}_{+0,007}$ Ra 0,52 мкм обрати та застосувати розглянуті методики при проєктуванні 045 безцентрово-шліфувальної операції.

РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМИ ПЕРЕРИВЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ ЗОЛОТНИКА ПРИ ВРІЗНОМУ БЕЗЦЕНТРОВОМУ ШЛІФУВАННІ

4.1. Вибір методу забезпечення точності форми та схема безцентрового шліфування золотника

Безцентрове шліфування характеризується самобазуванням деталі на три елементи: шліфувальний круг, ведучий круг і опорний ніж. Така схема утворює замкнений контур зворотного зв'язку формоутворення у якому початкові відхилення профілю заготовки можуть згасати або посилюватися.

Похибки форми при безцентровому шліфуванні мають комплексну природу. Вони визначаються геометрією зазору (кутами α, β та висотою центра деталі), жорсткістю та динамікою технологічної системи й режимами обробки.

Геометрична стабільність процесу забезпечується вибором висоти центра деталі та кута опорного ножа. Критичні зони з від'ємним значенням індексу SI можна виявити на етапі технологічної підготовки виробництва.

Точність круглості субмікронного рівня досягається за достатньої жорсткості шпинделів і підшипникових вузлів шліфувального та ведучого кругів.

Перевищення граничної потужності шліфування призводить до термічного припікання та погіршення стану поверхневого шару, тому потужність необхідно обмежувати на всіх стадіях циклу врізання та виходжування.

Моніторинг сигналу акустичної емісії дозволяє виявити некоректну висоту центра заготовки, вона проявляється різким сплеском сигналу на етапі виходжування.

Отже, для підвищення якості обробки доцільно поєднувати розрахунковий вибір геометрії налаштування та режимів за критеріями стабільності.

Зовнішня циліндрична поверхня 5 $\varnothing 25^{+0.068}_{-0.018}$ є переривчастою і складається із шести шийок різної довжини, що розділені канавками (поверхня 4 рис. 3.2). Загальна довжина поверхні 5 складає 108,5 мм (рис. 4.1). На 10 переході 025 операції на зовнішній циліндричній поверхні 5 фрезеруються 3 пази.

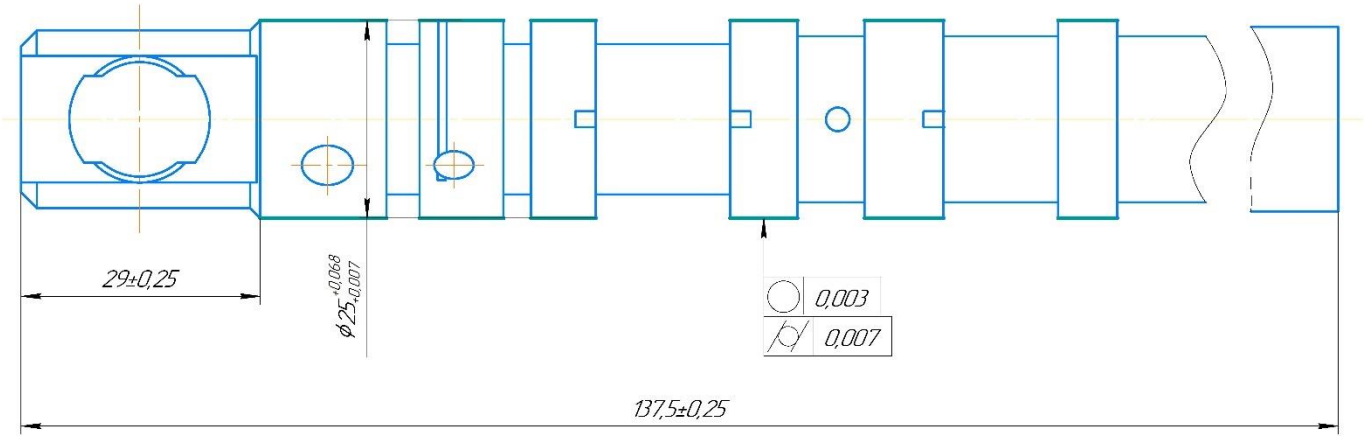


Рис. 4.1. Золотник

Пази є не на всіх шийках, а сумарна довжина пазів не перевищує 10 мм тож вони не викликають розмикання контакту круга із деталлю під час шліфування. Не спостерігається процес коли на частину оберту круг повністю виходить із контакту. Тому решта суцільних шийок на ширині 108,5 мм продовжує обертати деталь і утримувати її на ножі. Це суттєво зменшує вплив пазів порівняно з випадком, коли пази були б на всій довжині. Деталь золотник не втрачає опору й тягу в процесі шліфування.

Аналіз наукових джерел (розділ 2) показав, що похибки форми при врізному безцентровому шліфуванні (огранювання, некруглість, хвилястість) визначаються насамперед геометрією налаштування системи шліфувальний круг-ведучий круг-опорний ніж», жорсткістю й динамікою технологічної системи та режимами обробки. Для операції 045 обробки золотника як основний метод прийнято геометричну оптимізацію налаштування за індексом стабільності SI [26, 24]. Вона полягає у виборі висоти центра деталі h та кута скосу ножа, за яких усі гармоніки огранювання порядку i згасають (SI > 0). Метод обрано тому, що висоту центра та положення ножа можна змінювати на верстаті без додаткового обладнання, а розрахунок виконується ще на етапі технологічної підготовки виробництва. Також передбачено доповнення розрахунку перевіркою режимів за умовами жорсткості [10] та граничною потужністю шліфування [4].

Операція 045 – безцентрове врізне шліфування шийок золотника $\varnothing 25^{+0.068}_{-0.018}$ із шорсткістю Ra 0,52 мкм. Усі шийки, сумарна ширина яких 108,5 мм, шліфуються

одночасно шліфувальним кругом шириною 150 мм при радіальній подачі, без осьового руху деталі. Ширини круга достатньо для перекриття всіх шийок із запасом 40 мм.

045 операція виконується на безцентрово-шліфувальному верстаті Palmary PC-12S. Його основні характеристики за даними виробника наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристики верстата Palmary PC-12S

Параметр	Значення
Діапазон діаметрів деталі, мм	1…40
Шліфувальний круг (D × B × d), мм	305 × 150 × 120
Колова швидкість шліфувального круга, м/с	33
Потужність приводу шліфувального круга, кВт	5
Ведучий круг (D × B × d), мм	205 × 150 × 90
Частота обертання ведучого круга, хв$^{-1}$	10…300 (безступінчасте регулювання)
Потужність приводу ведучого круга, кВт	1,5 (серводвигун)
Нахил / поворот ведучого круга	±5° / ±5°
Опори й ножі	комплект для врізного й наскрізного шліфування, твердосплавні ножі
Маса верстата, кг	1700

Схему шліфування шийки золотника наведено на рисунку 4.2. Деталь лежить на скошеній поверхні опорного ножа *H* і контактує з шліфувальним кругом у точці *K* та з ведучим кругом у точці *B*. Центр деталі *W* розташований над лінією центрів кругів на висоті *h*. Положення точок контакту задається такими кутами: $\varphi_{ш}$ та $\varphi_{в}$ – кути, на які промені *W–K* і *W–B* відхилені від горизонталі; $\beta_н$ – кут скосу ножа, $\beta_H = 30°$; α – кут між променями *W–K* і *W–H*; β – кут між променями *W–H* і *W–B*. Кут скосу ножа 30° прийнято як найпоширеніший стандартний кут твердосплавних ножів безцентрових верстатів. Для деталі діаметром 25 мм він є доцільним, а ножі з кутом 45° застосовуються для деталей малих діаметрів.

Кути $\varphi_{ш}$ та $\varphi_{в}$ визначаються з прямокутних трикутників, утворених лінією центрів кругів, висотою *h* та відрізками, що з'єднують центр деталі з центрами кругів:

$$\varphi_{ш} = arcsin\left(\frac{h}{R_{ш} + r_{д}}\right) \quad (4.1)$$

$$\varphi_{в} = arcsin\left(\frac{h}{R_{в} + r_{д}}\right) \quad (4.2)$$

де $R_{ш}$, $R_{в}$ – радіуси шліфувального та ведучого кругів, мм. Приймаємо $R_{ш} = 152{,}5$ мм, $R_{в} = 102{,}5$ мм;

$r_{д}$ – радіус деталі, мм. Приймаємо $r_{д} = 12{,}5$ мм.

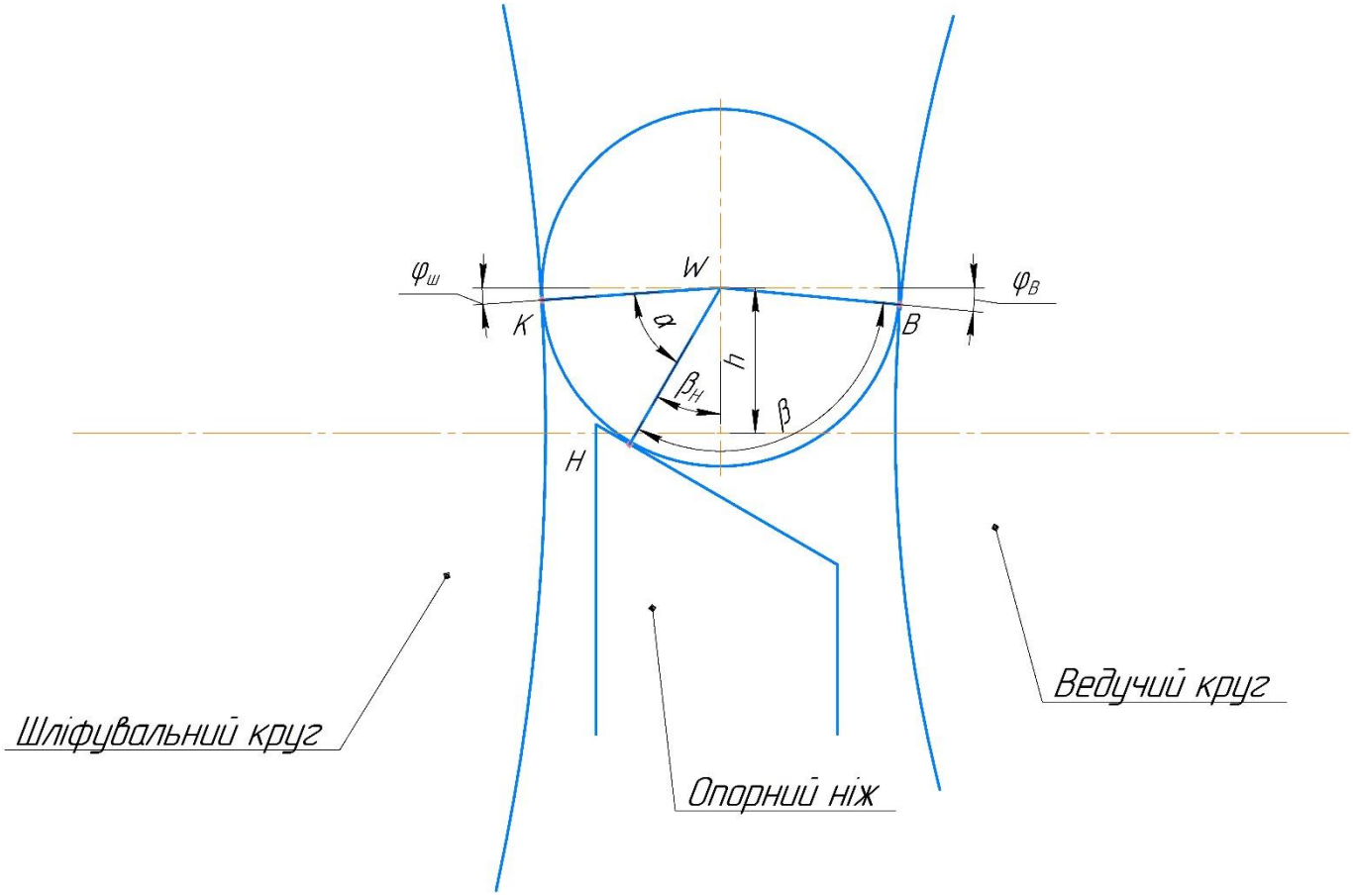


Рисунок 4.2. Схема врізного безцентрового шліфування шийок золотника

Кути α і β дорівнюють:

$$\alpha = 90° - \beta_{н} - \varphi_{ш} \quad (4.3)$$

$$\beta = 90° + \beta_{н} - \varphi_{в} \quad (4.4)$$

Сума кутів дорівнює $\alpha + \beta = 9 = 180° - \varphi_{ш} - \varphi_{в}$, що є кутом між променями *W–K* і *W–B*.

Висоту центра деталі приймаємо в межах:

$$h = (0{,}25 \ldots 0{,}5)\mathrm{d} = 6{,}25 \ldots 12{,}5 \text{ мм}$$

Остаточне значення h буде обрано за результатами розрахунку індексу SI. Для цього діапазону значення кутів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Кути налаштування на межах *i* в середині діапазону *h*

h, мм	$\varphi_{ш}$, °	$\varphi_{в}$, °	α, °	β, °	$\alpha + \beta$, °
6,25	2,17	3,12	57,83	116,88	174,71
9,38	3,26	4,68	56,74	115,32	172,07
12,50	4,34	6,24	55,66	113,76	169,42

4.2. Розрахунок геометричної стабільності процесу та вибір налаштування

Метою розрахунку є вибір висоти центра деталі *h*, за якої похибки круглості різних порядків згасають у процесі врізного шліфування. Критерієм служить геометричний індекс стабільності SI [24], що визначається за формулою (2.3). Похибка порядку *i* згасає за умови $SI > 0$, а при $SI < 0$ її амплітуда зростає й формується огранювання.

Порядок гармонік *i* = 2…30, висота центра деталі h = 6,25…12,5 мм.

Виконуємо розрахунок для *h* = 6,25 мм та *i* = 5. За формулами (4.1)–(4.4):

$$SI = 1 + \frac{0{,}8465 \cdot -0{,}7142 - 0{,}8919 \cdot 0{,}3280}{0{,}8577} = -0{,}046$$

Отже, при *h* = 6,25 мм гармоніка *i* = 5 перебуває на межі стабільності ($SI < 0$, але за абсолютним значенням близько до нуля).

Результати розрахунку для кількох значень *h* наведено в таблиці 4.3 та на рисунку 4.3.

Таблиця 4.3

Результати розрахунку індексу SI

h, мм	α, °	β, °	Кількість нестабільних гармонік	Порядки нестабільних гармонік *i*	min *SI* (*i* = 2…10)
1	2	3	4	5	6
6,25	57,83	116,88	3	5; 20; 26	-0,046
7,50	57,39	116,26	4	5; 14; 20; 26	-0,045

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
9,38	56,74	115,32	4	5; 14; 20; 26	-0,038
11,25	56,09	114,39	5	5; 14; 20; 26; 27	-0,022
12,50	55,66	113,76	5	5; 8; 14; 20; 27	-0,047

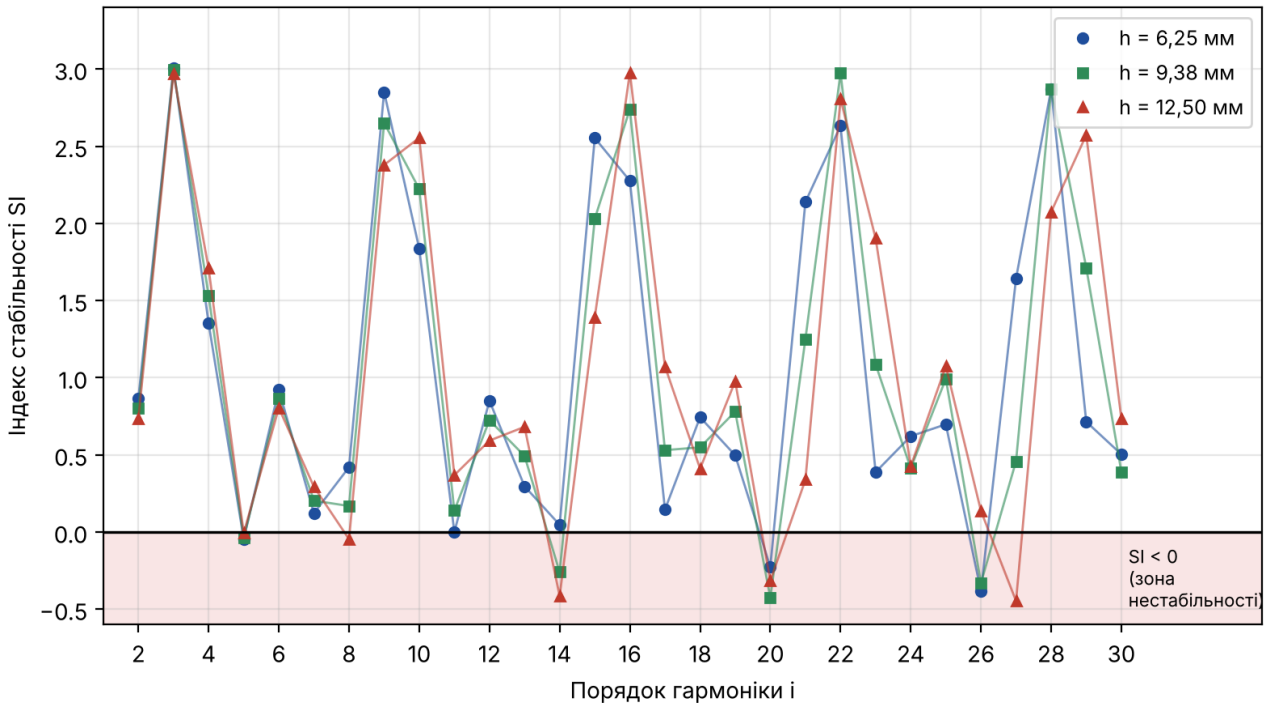


Рисунок 4.3. Діаграма індексу стабільності *SI* залежно від порядку гармоніки *i*

У всьому розглянутому діапазоні висоти центра *h* гармоніка *i* = 5 є нестабільною, причому *SI* близький до нуля (від −0,05 до −0,01), тому вона перебуває на межі стабільності. Усі інші гармоніки низьких порядків (*i* = 2…4, 6…10) при *h* до 11,75 мм мають SI > 0, тобто згасають.

Збільшення *h* збільшує кількість нестабільних гармонік: при *h* = 6,25…6,5 мм їх три (*i* = 5, 20, 26), при *h* = 6,75…10,75 мм – чотири (додається *i* = 14), при *h* ≥ 11 мм – п’ять. Починаючи з $h = 12$ мм нестабільною стає також гармоніка $i = 8$, тобто з’являється додаткова нестабільна гармоніка низького порядку.

Мінімальна кількість нестабільних гармонік досягається при нижній межі діапазону $h = 6{,}25$ мм. Це значення приймається для налаштування.

Нестабільні гармоніки $i = 20$ та 26 відповідають дрібній хвилястості з довжиною хвилі $\lambda = \pi \cdot d/i \approx 3{,}9$ мм та 3,0 мм.

Повний критерій $SI > 0$ для всіх гармонік у діапазоні $h = 0{,}25 \ldots 0{,}5 \cdot d$ при $\beta_н = 30°$ не виконується, що необхідно враховувати як обмеження прийнятого налаштування; подальше зниження похибок круглості забезпечується режимами та жорсткістю системи, що буде розглянуто.

За значеннями $\alpha = 57{,}83°$ та $\beta = 116{,}88°$ для вибраного $h = 6{,}25$ мм коефіцієнти, що пов'язують рух заготовки з переміщенням опори та ведучого круга, за формулами (2.7), (2.8) становлять:

$$K_1 = \frac{sin\beta}{sin(\alpha + \beta)} = \frac{0{,}8919}{0{,}0921} = 9{,}68$$

$$K_2 = \frac{sin\alpha}{sin(\alpha + \beta)} = \frac{0{,}8465}{0{,}0921} = 9{,}19$$

За результатами розрахунку індексу стабільності SI для гармонік $i = 2 \ldots 30$ встановлено, що в діапазоні $h = 6{,}25 \ldots 12{,}5$ мм при $\beta_н = 30°$ гармоніка $i = 5$ перебуває на межі стабільності, а кількість нестабільних гармонік зростає зі збільшенням h. Для налаштування операції шліфування приймаємо $h = 6{,}25$ мм ($\alpha = 57{,}83°$; $\beta = 116{,}88°$), кут скосу ножа $\beta_н = 30°$ та кут нахилу ведучого круга 0,5…1°.

4.3. Режими шліфування та перевірка умов жорсткості й потужності

Після вибору налаштування визначаємо режими врізного шліфування шийок золотника та перевіряємо, чи не перевищують вони допустимих значень за потужністю, термічним припіканням та жорсткістю технологічної системи. Вихідні дані наведено в таблиці 4.4.

Колову швидкість деталі приймаємо рівною коловій швидкості ведучого. Частота обертання ведучого круга й деталі:

$$n_в = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_в} = \frac{1000 \cdot 20}{3{,}14 \cdot 205} = 31 \text{хв}^{-1}$$

$$n_д = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 20}{3{,}14 \cdot 25} = 255 \text{ хв}^{-1}$$

Таблиця 4.4

Вихідні та прийняті дані для розрахунку режимів

Параметр	Значення
Діаметр шийки d, мм	25
Ширина шліфування b, мм	110
Припуск на шліфування, мм	0,1 на сторону
Матеріал	Сталь 15Х
Діаметр шліфувального круга, мм	305
Швидкість круга v_s, м/с	33
Діаметр ведучого круга, мм	205
Потужність привода круга, кВт	5
Питома енергія шліфування u, Дж/мм³	30…60
Теплопровідність λ, Вт/(м·К)	40 (мін. 35)
Коефіцієнт температуропровідності α_w, м²/с	$1{,}0\cdot10^{-5}$ ($1{,}2\cdot10^{-5}$)
Частка енергії, що йде в заготовку ε	0,7 (0,85)
Критична температура θn, К	800 (600)

Частота обертання ведучого круга лежить у межах регулювання верстата (10…300 хв$^{-1}$).

Об’ємну продуктивність знімання і потужність шліфування визначаємо за формулами:

$$Q_w = \pi \cdot d \cdot b \cdot v_f$$

$$P = u \cdot Q_w$$

де v_f – швидкість радіальної подачі, мм/с. Швидкість подачі на чорновій стадії обрано з умови, щоб потужність при верхньому значенні $u = 60$Дж/мм³ не перевищувала 0,7 потужності привода круга, тобто 3,5 кВт. Звідси $Qw \leq 58$ мм³/с, $vf \leq 0{,}4$ мм/хв. На чистовій стадії подачу зменшено до 0,15 мм/хв для забезпечення шорсткості Ra 0,52 мкм. Цикл завершується виходжуванням тривалістю 10с. Параметри циклу наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Цикл врізного шліфування

Стадія	Припуск, мм	v_f, мм/хв	Подача на оберт, мкм	a_e, мкм	t, с
Чорнове	0,06	0,40	1,57	3,08	9
Чистове	0,04	0,15	0,59	1,15	16
Виходжування	–	0	–	–	10

Тривалість циклу $t\text{ц} = 35\text{с} = 0{,}58\text{хв}$.

Еквівалентну глибину різання визначаємо за формулою (2.6), прийнявши за fr подачу на оберт деталі $fr = v_f/n_\text{д}$.

$$a_e = \frac{f_r}{1 - K_1 + K_2} = \frac{f_r}{0{,}51}$$

Жорсткість шліфування за формулою (2.5):

$$k_s = \frac{b \cdot v_c \cdot u}{v_s}$$

Умову жорсткості (2.9) записуємо у вигляді $k_s \cdot a_e/k_g \le 5 \cdot 10^{-6}$, де величини подано в одиницях СІ (Н, м). Згідно з даними джерела [10] (рис. 2.7), відношення $5{\cdot}10^{-6}$ відповідає похибці круглості близько 1 мкм, а 10^{-5} – близько 3,7 мкм, тобто прийнята вимога забезпечує запас до допуску 3 мкм. Звідси мінімально потрібна жорсткість шпиндельних вузлів:

$$k_g \ge \frac{k_s \cdot a_e}{5 \cdot 10^{-6}} \qquad (4.5)$$

Виконуємо перевірку за потужністю та термічним припіканням. Гранична за припіканням потужність шліфування визначається за формулою (2.18), де k_w – теплопровідність заготовки λ, а еквівалентний діаметр дорівнює:

$$d_{eq} = \frac{d_s \cdot d_w}{d_s + d_w} = \frac{305 \cdot 25}{305 + 25} = 23{,}1\text{ мм}$$

$$P_{lim} = \frac{\lambda \cdot b \cdot d^{1/4} \cdot v^{1/2} \cdot a^{1/4} \cdot \theta_n}{\varphi \cdot \alpha^{1/2} \cdot \varepsilon}$$

Результати наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Результати перевірки

Стадія	Q_w, мм³/с	P, кВт (u = 30…60)	P_{lim}, кВт	k_s, Н/м	Мін. k_g, Н/м
Чорнове	57,6	1,73…3,46	15,0 (7,4)	$3{,}3\cdot10^7$…$6{,}7\cdot10^7$	$2{,}1\cdot10^7$…$4{,}1\cdot10^7$
Чистове	21,6	0,65…1,30	11,7 (5,8)	$3{,}3\cdot10^7$…$6{,}7\cdot10^7$	$7{,}7\cdot10^6$…$1{,}5\cdot10^7$

Потужність шліфування на чорновій стадії при $u = 60$ Дж/мм³ становить 3,46 кВт, що не перевищує потужність привода круга 5 кВт (запас становить близько 30 %); на чистовій стадії – 1,30 кВт.

Гранична за припіканням потужність перевищує фактичну потужність шліфування в обох стадіях навіть для песимістичних значень параметрів матеріалу (чорнова: 7,4 кВт проти 3,46 кВт; чистова: 5,8 кВт проти 1,30 кВт). Отже, при прийнятих режимах небезпека припікання за цією моделлю відсутня.

Для виконання умови жорсткості (4.5) шпиндельні вузли шліфувального та ведучого кругів повинні мати жорсткість не менше $4{,}1\cdot10^7$ Н/м.

Отже, для врізного шліфування шийок Ø25 золотника на верстаті Palmary PC-12S приймаємо швидкість шліфувального круга 33 м/с, колову швидкість деталі 20 м/хв, радіальні подачі 0,4 мм/хв (чорнове) та 0,15 мм/хв (чистове) з виходжуванням 10с. Основний час операції становить 0,58 хв. Розрахунок показав відсутність перевищення потужності привода та межі термічного припікання. Значення питомої енергії та теплофізичних параметрів прийнято в діапазонах, тому їх слід уточнити експериментально при введенні операції механічної обробки у виробничий процес.

4.4. Висновки

На основі аналізу методів зменшення похибок форми (розділ 2) для операції безцентрового врізного шліфування шийок золотника Ø25 мм обрано геометричну оптимізацію налаштування за індексом стабільності *SI* з доповненням перевіркою режимів за жорсткістю та потужністю шліфування. Операція безцентрового

шліфування виконується на верстаті Palmary PC-12S. Усі шийки сумарною шириною 108,5 мм шліфуються одночасно кругом шириною 150 мм.

Розроблено схему шліфування та отримано залежності для розрахунку кутів. Вимога точності, що задана до оброблюваної поверхні – допуск круглості 0,003 мм.

Розрахунок індексу SI для гармонік $i = 2 \dots 30$ у діапазоні висоти центра деталі $h = 6{,}25 \dots 12{,}5$ мм показав, що при $\beta_н = 30°$ повністю стабільного налаштування немає: гармоніка $i = 5$ перебуває на межі стабільності, а кількість нестабільних гармонік зростає зі збільшенням h. Мінімальну кількість нестабільних гармонік (три: i = 5, 20, 26) забезпечує $h = 6{,}25$ мм, для якого $\alpha = 57{,}83°$, $\beta = 116{,}88°$. Кут нахилу ведучого круга для врізного шліфування прийнято 0,5…1°. Індекс SI є геометричним критерієм і не визначає величину круглості, тому досягнення допуску 0,003 мм підтверджується лише вимірюванням обробленої деталі.

Перевірка за потужністю показала, що потужність шліфування на чорновій стадії при верхній оцінці питомої енергії 60 Дж/мм³ становить 3,46 кВт, тобто не перевищує потужність привода круга. Гранична за припіканням потужність перевищує фактичну на обох стадіях. Мінімально потрібна жорсткість шпиндельних вузлів за умовою (4.5) становить близько $4 \cdot 10^7$ Н/м.

Наявність на шліфованих поверхнях поперечного паза довжиною 9 мм (близько 8% ширини шліфування) та дугової канавки спричиняє переривчастість процесу. Оскільки решта 92% ширини залишається суцільною й утримує деталь на ножі та ведучому крузі, очікуваний вплив на круглість невеликий. Задирки та крихкі кромки необхідно усунути перед шліфуванням. Краї шийок 5 створюють підвищену концентрацію напружень та працюють як різці. На робочій поверхні шліфувального круга саме в зонах, де відбувається обробка країв шийок може виникати прискорене та інтенсивніше викришування абразивних зерен.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

5.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць, зайнятих у виготовленні даних деталей, розраховуємо у такій послідовності.

Кількість робочих місць на операціях проектного техпроцесу деталі «золотник» визначаємо за формулою:

$$q_{p(i)} = \frac{N_з \cdot t_{шт(i)}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot k_в}, \quad (5.1)$$

де $t_{шт(i)}$ - штучний час і-ої операції, хв.;

$F_{дрм}$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання, годин;

$k_в$ - нормативний коефіцієнт виконання норм часу ($k_в$ = 1,0-1,1 [1, с. 4]).

На операції 005 техпроцесу обробки деталі:

$$q_{p(010)} = \frac{30000 \cdot 0,81}{3890 \cdot 60 \cdot 1,0} = 0,104$$

Аналогічно виконані розрахунки по інших операціях техпроцесів зведемо до табл. 5.1.

Коефіцієнт завантаження обладнання по кожній детале-операції:

$$\eta_{з(i)} = \frac{q_{p(i)}}{q_{пр(i)}} \quad (5.2)$$

$$\eta_{з(010)} = \frac{0,104}{1} = 0,104$$

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць на усіх операціях технологічного процесу виготовлення деталі:

$$\overline{\eta}_з = \frac{\sum_{i=1}^{m} q_{p(i)}}{\sum_{i=1}^{m} q_{пр(i)}} = \frac{1,978}{8} = 0,25 \quad (5.3)$$

де $q_{пр(i)}$ - прийнята (ціла) кількість робочих місць;

m - кількість операцій технологічного процесу.

Таблиця 5.1

Розрахунок завантаження обладнання

№ опер.	Найменування операції	$t_{шт}$, хв.	Кількість обладнання		$\eta_з$	$\overline{\eta}_з$
			$q_р$	$q_{пр}$		
010	Токарно-фрезерна з ЧПУ	0,81	0,104	1	0,104	0,25
015	Токарно-фрезерна з ЧПУ	5,06	0,650	1	0,650	
020	Токарна з ЧПУ	2,30	0,296	1	0,296	
025	Токарна з ЧПУ	2,31	0,297	1	0,297	
030	Токарна з ЧПУ	0,41	0,053	1	0,053	
035	Прошивочна	2,95	0,379	1	0,379	
040	Різьбонарізна	0,75	0,096	1	0,096	
045	Безцентрово-шліфувальна	0,80	0,103	1	0,103	
	Всього	15,39	1,978	8	1,978	

Середній коефіцієнт завантаження по цеху $\overline{\eta}_з$ =0,25, що відповідає великосерійному типу виробництва (ВС) [1, дод. 1].

5.2. Розрахунок календарно-планових нормативів

До календарно-планових нормативів серійного виробництва належать: розмір партії деталей; кількість запусків партії деталей; періодичність (ритм) запуску-випуску партії деталей; тривалість операційних та технологічного циклів обробки деталі; розмір циклового запасу деталей.

Розмір партії деталей розраховуємо у два етапи: спочатку визначимо розрахунковий розмір партії, а потім цю величину скорегуємо з урахуванням виробничих умов.

Для визначення розрахункового розміру партії деталей $n_р$ скористаємося другим методом [1, с. 5], який застосовується у тому разі, коли в технологічному процесі відсутні трудомісткі за переналагоджуванням операції (тобто підготовчо-заключний час не перевищує 30 хв.). Щоб не допускати частих переналагоджувань обладнання, час виготовлення партії деталей на найбільш продуктивній операції не повинен бути меншим, ніж половина зміни. Тобто:

$$n_p = \frac{0,5 \cdot F_{зм}}{t_{шт}^{\min}}, \qquad (5.4)$$

де $F_{зм}$ – дійсний фонд часу зміни (440 хв.)

$t_{шт}^{\min}$ – штучний час найбільш продуктивної операції:

$$n_p = \frac{0,5 \cdot 440}{0,41} = 537 \text{ шт.}$$

Для спрощення планування та обліку, партія деталей повинна укладатися в річну програму запуску ціле число разів. Тому, після визначення розрахункової кількості партій протягом року за формулою:

$$A_p = \frac{N_з}{n_p} = \frac{30000}{537} \approx 56, \quad (5.5)$$

визначимо фактичну кількість партій ($A_ф$) шляхом підбору найближчого до $A_р$ цілого значення з уніфікованого ряду: 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 52, 104, 250, і скорегуємо, відповідно до отриманого значення $A_ф$, розмір партії деталей:

$$A_ф = 52.$$

$$n_{пр} = \frac{30000}{52} = 577 \text{ шт.} \quad (5.6)$$

Періодичність (ритм) запуску-випуску партій деталей:

$$R_з = \frac{253}{52} = 4,9 \text{ роб. дні} \quad (5.7)$$

де $T_р$ - кількість робочих днів протягом року.

Тривалість багатоопераційного виробничого циклу виготовлення партії деталей залежить від тривалості операційних циклів, способу їхнього сполучення у часі (прийнятого виду руху партії деталей) та часу межопераційних перерв.

Тривалість операційного циклу:

$$T_{o(i)} = \frac{n_{пр} \cdot t_{к-д(i)}}{S \cdot F_{зм.д}}, \quad (5.8)$$

де $п_{пр}$ - остаточно прийнятий розмір партії деталей, шт.;

$t_{к-д(i)}$ – калькуляційно-дійсний час на даній детале-операції, хв.

$$t_{к-д(i)} = \frac{t_{шт(i)}}{k_в \cdot p_{т(i)} \cdot q_{пр(i)}} + \frac{t_{п-з(i)}}{n_{пр}}, \quad (5.9)$$

де $k_в$ - коефіцієнт виконання норм на даній операції;

$p_{т(і)}$ - технологічна партія деталей (кількість деталей, що одночасно оброблюються в багатопозиційному пристосуванні), шт.

$q_{пр(і)}$ - кількість робочих місць, які працюють на даній операції паралельно.

Наприклад, для першої операції техпроцесу:

$$t_{к-д(010)} = \frac{0,81}{1,0 \cdot 1 \cdot 1} + \frac{20}{577} = 0,845 \text{ хв.}$$

$$T_{о(010)} = \frac{577 \cdot 0,845}{2 \cdot 440} = 0,55 \text{ дн.}$$

Результати розрахунків $t_{к-д(і)}$ і $T_{о(і)}$ зведемо до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Розрахунок тривалості циклу

№ опер.	Найменування операції	$t_{шт}$, хв.	$t_{п-з}$, хв.	$t_{к-д}$, хв.	$T_о$, днів	$t_{мо}$, днів
010	Токарно-фрезерна з ЧПУ	0,81	20	0,845	0,55	0,45
015	Токарно-фрезерна з ЧПУ	5,06	20	5,095	3,34	0,45
020	Токарна з ЧПУ	2,30	20	2,335	1,53	0,45
025	Токарна з ЧПУ	2,31	20	2,345	1,54	0,45
030	Токарна з ЧПУ	0,41	20	0,445	0,29	0,45
035	Прошивочна	2,95	15	2,976	1,95	0,45
040	Різьбонарізна	0,75	12	0,771	0,51	0,45
045	Безцентрово-шліфувальна	0,80	20	0,835	0,55	0,45
	Всього	15,39	-	15,645	10,26	3,60

Для даної партії деталей може бути обраний послідовний рух, який рекомендується приймати при груповому розташуванні обладнання, невеликій масі деталей та тривалості операційних циклів, що в середньому не перевищують два дні.

Тривалість виробничого циклу визначаємо за формулою:

$$T_п = \sum_{i=1}^{m} T_{о_i} + \sum_{i=1}^{m} t_{мо} = 10,26 + 3,60 = 10,86 \text{ днів}, \quad (5.10)$$

де $t_{мо}$ - час міжопераційної перерви, днів.

$$t_{мо} = \frac{(0,25...0,8) \cdot \sum_{i=1}^{m} T_{o_i}}{m} = \frac{0,35 \cdot 10,26}{8} = 0,45 \text{ дні}, \quad (5.11)$$

Середній розмір циклового запасу деталей визначається за формулою:

$$З_ц = \frac{n_{пр} \cdot T_ц}{R_з} = \frac{577 \cdot 10,86}{4,9} = 1279 \text{ шт.}, \quad (5.12)$$

де $T_ц$ - тривалість виробничого циклу виготовлення партії деталей, дн.

5.3. Визначення чисельності основних робітників цеху

До основних належать робітники, безпосередньо зайняті виконанням технологічних операцій. Їх чисельність у серійному виробництві визначається за формулою:

$$R_o = \frac{T_p}{F_{др}}, \quad (5.13)$$

де $T_р$ - трудомісткість річної виробничої програми, нормо-годин.

$$T_p = N_з \cdot \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{шт_i}}{60} \cdot K_{дов} \cdot (1 + 0,01 \cdot d), \quad (5.14)$$

де $К_{дов}$ - коефіцієнт довантаження обладнання до нормативного ($\eta_{зн}$) для даного типу виробництва [1, дод. Д1]:

$$K_{дов} = \frac{\eta_{зн}}{\overline{\eta}} = \frac{0,8}{0,25} = 3,2 \quad (5.15)$$

d - процент додаткових робіт, непередбачених технологічним процесом (виправлення браку, доробка, комплектація тощо), d=15...20% [1, с. 8];

$F_{др}$ - дійсний річний фонд часу роботи одного робітника, год. (залежить від номінального фонду часу поточного року $F_н$, зменшеного на процент невиходів на роботу з поважних причин $С_н$ (8...10%)):

$$F_{др} = F_н \cdot (1 - 0,01 \cdot C_н) = 2000 \cdot (1 - 0,01 \cdot 8) = 1840 \text{ год.}, \quad (5.16)$$

$$T_{р.пр} = 30000 \cdot \frac{15,39}{60} \cdot 3,2 \cdot (1 + 0,01 \cdot 20) = 29549,0 \text{ нормо-год.}$$

$$R_{о.пр} = \frac{29549}{1840} = 16 \text{ осіб.}$$

Порівняємо розраховані показники з відповідними показниками базового варіанту техпроцесу:

$$T_{р.пр} = 30000 \cdot \frac{18,182}{60} \cdot 3,2 \cdot (1 + 0,01 \cdot 20) = 34909,4 \text{ нормо-год.}$$

$$R_{о.пр} = \frac{34909,4}{1840} = 19 \text{ осіб.}$$

5.4. Аналіз варіантів технологічного процесу

Для визначення доцільності впровадження запропонованого варіанту техпроцесу механічної обробки деталі «золотник», проведемо його економічний аналіз шляхом визначення та порівняння технологічної собівартості виготовлення деталі по кожному з альтернативних варіантів:

$$C_{тех} = V \cdot N_з + P, \quad (5.17)$$

де V – змінні витрати у технологічній собівартості, величина яких змінюється пропорційно зміні обсягу випуску продукції, грн/рік.

Р – постійні витрати, величина яких не змінюється або змінюється неістотно в залежності від зміни річного випуску продукції грн/рік.

При цьому, аналізувати та порівнювати доцільно лише ті операції та статті витрат, які відрізняються у базовому та проєктному техпроцесах (табл. 5.3). На різьбонарізних операція і в базовому, і в проєктному варіантах використовується верстати 2056. Проте час обробки на них деталі у базовому варіанті більше, ніж у проєктному. Тому будемо враховувати його лише в базовому варіанті на операціях 070-075 ($t_{шт}$ = 0,603×2 – 0,75 = 0,46 хв.).

Таблиця 5.3

Характеристика змін при обробці деталі «золотник»

Номер опер.	Базовий варіант		Номер опер.	Проектний варіант	
	Модель обладнання	$t_{шт}$, хв.		Модель обладнання	$t_{шт}$, хв.
015	Токарно-револьверний 1336	1,263	010-015	HAAS ST-10Y Токарно-фрезерний з ЧПУ	5,87
020	Горизонтально-фрезерний 6Р82	0,715	020-025	Okuma Genos L200E-M Токарний з ЧПУ	4,61
025	Свердлильний 2А135	0,69	030	MAZAK Quick Turn Nexus 100-IIM Токарний з ЧПУ	0,41
030	Протяжний 7А510	2,74	035	П6230 Прес гідравлічний	2,96

035	Токарний 1А730	6,4	045	Palmary PC-12S Безцентрово-шліфувальний	0,80
045	Токарний напівавто-мат 1А240П-6	2,5			
055-065	Агрегатний 3ХА4170	1,818			
070-075	Різьбонарізний 2056	0,46			
080	Круглошліфувальний	0,85			
085	Горизонтально-фрезерний 6Р80Г	0,719			
	Всього	18,155		Всього	14,65

5.4.1. Розрахунок змінних витрат

За поелементним методом розрахунку змінні витрати визначаються за формулою:

$$V = M_o + З_{одв} + E_c + B_p + B_{мд} + B_{ін.ун} + B_{пр.ун} + B_{ам.у} + B_{еп}, \quad (5.18)$$

де M_o – вартість основних матеріалів (не розраховуються, оскільки не змінюються в порівнюваних варіантах), грн;

$З_{одв}$ – заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з урахуванням єдиного соціального внеску, грн;

E_c – витрати на електроенергію силову, грн;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн;

$B_{мд}$ – витрати на матеріали допоміжні, грн;

$B_{ін.ун}$ – витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту, грн;

$B_{ам.у}$ – витрати на амортизацію універсального обладнання, грн;

$B_{еп}$ – витрати на експлуатацію приміщень, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з урахуванням єдиного соціального внеску:

$$З_{одв} = C_{г(і)} \cdot \frac{t_{шт(і)}}{60} \cdot K_{дс}, \quad (5.19)$$

де $C_{г(і)}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду і-тої операції техпроцесу, грн./год.;

$t_{шт(і)}$ - штучний час і-тої операції, хв.;

$К_{дс} = 1,342$ – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату та відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок ЄСВ).

Розрахунок витрат на заробітну плату зведемо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Розрахунок витрат на заробітну плату

Базовий варіант					Проектний варіант		
Номер операції	Роз-ряд	$C_{г(і)}$, грн/год	$t_{шт}$, хв.	$З_{одв.баз}$, грн	Номер операції	$t_{шт}$, хв.	$З_{одв.баз}$, грн
025,070, 075	2	93,753	1,15	2,412	-	-	-
015,020,030,035, 050,065,085	3	115,062	13,655	35,147	035,040	3,70	9,524
045,080	4	127,847	3,35	9,581	010-030,045	10,95	31,316
Всього	-	-	18,155	47,140	Всього	14,65	40,840

Наступні статті витрат пов'язано з утриманням та експлуатацією обладнання. Його характеристики зведено до табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Характеристика обладнання

Модель обладнання	Габаритні розміри: довжина × ширина, м	Потужість електро-двигунів верстата, кВт	Група ремонтної складності механічної/електричної частини, УРО	Площа в плані $S_{од}$, м^2	Ціна, тис. грн.
Базовий варіант					
1336	2,28×1,00	6,0	18/15	2,28	521,4
6Р82	2,31×1,95	7,5	18/14	4,50	146,8
2А135	1,23×0,82	5,0	8/5,5	1,01	102,0
7А510	4,57×1,35	14,0	22/6	6,17	342,5
1А730	2,62×1,39	14,0	10/7,5	3,64	209,1
1А240П6	4,05×1,60	17,0	40/35,5	6,48	622,2
3ХА4170, 3ХА4159	3,20×2,10	15,0	32/28	6,72	730,3
2056	2,75×2,04	1,7	24/11	5,61	420,8
3151	2,78×1,71	7,0	8/7	4,75	445,4
6Р80Г	1,65×1,57	3,0	7/3	2,59	160,65
Проектний варіант					
HAAS ST-10Y	3,23×2,29	11,2	18/11	7,40	3545,5
Okuma Genos L200E-M	1,48×1,55	7,5	12/9	2,29	3292,3
MAZAK Quick Turn Nexus 100-IIM	1,70×1,63	11,0	12/10	2,77	3852,2
П6320	1,15×0,80	7,5	6/3	0,92	130,2
Palmary PC-12S	1,75×1,05	5,0	8,5/5	1,84	1132,5

Витрати на електроенергію силову:

$$E_c = \frac{N_в \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_д}{\eta_в \cdot \eta_м} \cdot \frac{t_{шт}}{60} \cdot Ц_{ел}, \qquad (5.20)$$

де $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів, K_o=0,65...0,8;

$К_N$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймається у розмірі 0,4…0,5 – для шліфувальних верстатів; 0,5…0,6 – для токарних і свердлильних верстатів; 0,6…0,7 – для фрезерних і протягувальних верстатів; 0,7…0,8 – для токарних напівавтоматів, агрегатних та багатопозиційних верстатів);

$К_д$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом, $К_д$=0,3...0,5;

$\eta_в$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі, $\eta_в$=0,92…0,96;

$\eta_м$ – ККД електродвигунів, $\eta_м$=0,86…0,9;

$Ц_{ел}$ – ціна 1 кВт-год електроенергії без ПДВ, грн.

Наприклад, для операцій 010 проєктного техпроцесу:

$$E_{с.пр(010)} = \frac{11,2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,95 \cdot 0,88} \cdot \frac{5,85}{60} \cdot 10,13 = 2,788 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Розрахунок витрат на електроенергію

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$N_в$, кВт	$К_N$	$t_{шт}$, хв.	$Е_{с.баз}$, грн	Обладн.	$N_в$, кВт	$К_N$	$t_{шт}$, хв.	$Е_{с.пр}$, грн.
1336	6,0	0,6	1,263	0,275	HAAS	11,2	0,7	5,87	2,788
6Р82	7,5	0,7	0,715	0,227	Okuma	7,5	0,6	4,61	1,257
2А135	5,0	0,6	0,69	0,125	MAZAK	11,0	0,6	0,41	0,164
7А510	14,0	0,5	2,74	1,162	П6320	7,5	0,5	2,96	0,673
1А730	14,0	0,6	6,4	3,257	Palmary	5,0	0,5	0,80	0,121
1А240П6	17,0	0,8	2,5	2,060					
3ХА4170	15,0	0,8	1,818	1,322					
2056	1,7	0,7	0,46	0,033					
3151	7,0	0,5	0,85	0,180					
6Р80Г	3,0	0,7	0,719	0,091					
Всього	-	-	18,155	11,239	Всього	-	-	14,65	5,282

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_р = \frac{W_м \cdot R_м + W_е \cdot R_е}{F_{дрм}} \cdot \frac{t_{шт}}{60}, \quad (5.21)$$

де $W_м$, $W_е$ – витрати на всі види ремонту та обслуговування за ремонтний цикл, які припадають на одиницю ремонтної складності, відповідно механічної та електричної частини обладнання, грн.;

$R_м$, $R_е$ – категорія ремонтної складності відповідно механічної та електричної частин обладнання, УРО;

$F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.

$$B_{р.пр(010)} = \frac{980 \cdot 18 + 850 \cdot 11}{3890} \cdot \frac{5,87}{60} = 0,679 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Розрахунок витрат на ремонт обладнання

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$W_м$, УРО	$W_е$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{р.баз}$, грн.	Обладн.	$W_м$, УРО	$W_е$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{р.пр}$, грн.
1336	18	15	1,263	0,164	HAAS	18	11	5,87	0,679
6Р82	18	14	0,715	0,090	Okuma	12	9	4,61	0,383
2А135	8	5,5	0,69	0,037	MAZAK	12	10	0,41	0,036
7А510	22	6	2,74	0,313	П6320	6	3	2,96	0,107
1А730	10	7,5	6,4	0,444	Palmary	8,5	5	0,80	0,043
1А240П6	40	35,5	2,5	0,743					
3ХА4170	32	28	1,818	0,430					
2056	24	11	0,46	0,065					
3151	8	7	0,85	0,050					
6Р80Г	7	3	0,719	0,029					
Всього	-	-	18,155	2,365	Всього	-	-	14,65	1,248

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мд} = \frac{M_{гв} \cdot R_м \cdot t_{шт}}{100 \cdot 60} \cdot K_в \,, \qquad (5.22)$$

де $M_{гв}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали, коп.;

$K_в$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для СС $K_в$ = 1,0).

$$B_{мд.пр(010)} = \frac{79,5 \cdot 18 \cdot 5,87}{100 \cdot 60} \cdot 1,1 = 1,543 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.8

Таблиця 5.8

Розрахунок витрат на допоміжні матеріали

Базовий варіант				Проектний варіант			
Обладн.	$W_м$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{мд.баз}$, грн.	Обладн.	$W_м$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{мд.пр}$, грн.
1336	18	1,263	0,332	HAAS	18	5,87	1,543
6Р82	18	0,715	0,188	Okuma	12	4,61	0,808
2А135	8	0,69	0,081	MAZAK	12	0,41	0,072

7А510	22	2,74	0,880	П6320	6	2,96	0,259
1А730	10	6,4	0,934	Palmary	8,5	0,80	0,099
1А240П6	40	2,5	1,460				
3ХА4170	32	1,818	0,849				
2056	24	0,46	0,161				
3151	8	0,85	0,099				
6Р80Г	7	0,719	0,073				
Всього	-	18,155	5,058	Всього	-	14,65	2,781

Витрати на амортизацію універсального обладнання:

$$B_{ам} = \frac{Ф_{бал} \cdot Н_а \cdot t_{шт}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot 100 \cdot \eta_{зн}}, \quad (5.23)$$

де $Ф_{бал}$ – балансова вартість одиниці обладнання, грн.

$$Ф_{бал} = Ц_{опт} \cdot К_{тмф}, \quad (5.24)$$

де $Ц_{опт}$ – оптова ціна обладнання, грн.;

$К_{тмф}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на транспортування обладнання (0,05...0,1), його монтаж (0,04...0,06), улаштування фундаменту (0,02...0,08);

$Н_а$ – норма амортизації на реновацію, %.

$$Ф_{бал.HAAS\ ST-10Y} = 3545500 \cdot 1,11 = 3935505 \text{ грн},$$

$$B_{ам.пр(010)} = \frac{3935505 \cdot 20 \cdot 5,87}{3890 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 0,8} = 24,719 \text{ грн}.$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Розрахунок витрат на амортизацію обладнання

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$Ц_{опт}$, тис. грн	$Ф_{бал}$, тис. грн	$t_{шт}$, хв.	$В_{ам.баз}$, грн.	Обладн.	$Ц_{опт}$, тис. грн	$Ф_{бал}$, тис. грн	$t_{шт}$, хв.	$В_{ам.пр}$, грн.
1336	521,4	620,466	1,263	0,839	HAAS	3545,5	3935,505	5,87	24,719
6Р82	146,8	174,692	0,715	0,134	Okuma	3292,3	3654,453	4,61	18,026
2А135	102,0	121,38	0,69	0,090	MAZAK	3852,2	4275,942	0,41	1,876
7А510	342,5	407,575	2,74	1,195	П6320	130,2	144,522	2,96	0,458
1А730	209,1	248,829	6,4	1,704	Palmary	1132,5	1257,075	0,80	1,076
1А240П6	622,2	740,418	2,5	1,981					
2056	420,8	500,752	0,46	0,246					
3151	445,4	530,026	0,85	0,482					
6Р80Г	160,65	191,174	0,719	0,147					
Всього	-	3535,312	18,155	6,817	Всього	-	13267,5	14,65	46,154

Витрати на експлуатацію приміщення:

$$B_{еп} = \frac{S_{од} \cdot k_f \cdot C}{F_{дрм} \cdot \eta_{зн}} \cdot \frac{t_{шт}}{60}, \quad (5.25)$$

де $S_{од}$ – площа в плані, яку займає одиниця обладнання, м^2 ;

k_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (проходи, проїзди, транспортно-складскі приміщення) [1, табл. 4].

С – річні витрати, пов'язані з експлуатацією 1м^2 виробничого приміщення, грн.

$$B_{еп.пр(010)} = \frac{18,49 \cdot 780}{3890 \cdot 0,8} \cdot \frac{5,87}{60} = 0,453 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.10.

Таблиця 5.10

Розрахунок витрат на утримання приміщення

Базовий варіант						Проектний варіант					
Обладн.	$S_{од}$, м^2	k_f	$S_{од} \times k_f$ м^2	$t_{шт}$, хв.	$B_{еп.баз}$, грн.	Обладн.	$S_{од}$, м^2	k_f	$S_{од} \times k_f$, м^2	$t_{шт}$, хв.	$B_{еп.пр}$, грн.
1336	2,28	3,5	7,98	1,263	0,042	HAAS	7,40	2,5	18,49	5,87	0,453
6Р82	4,50	3,0	13,51	0,715	0,040	Okuma	2,29	3,5	8,03	4,61	0,155
2А135	1,01	4,0	4,03	0,69	0,012	MAZAK	2,77	3,5	9,70	0,41	0,017
7А510	6,17	2,0	12,34	2,74	0,141	П6320	0,92	4,0	3,68	2,96	0,045
1А730	3,64	3,5	12,75	6,4	0,341	Palmary	1,84	4,0	7,35	0,80	0,025
1А240П6	6,48	2,5	16,20	2,5	0,169						
3ХА4170	6,72	2,5	16,80	1,818	0,128						
2056	5,61	3,0	16,83	0,46	0,032						
3151	4,75	3,0	14,26	0,85	0,051						
6Р80Г	2,59	3,5	9,07	0,719	0,027						
Всього	-	-	123,77	18,155	1,333	Всього	-	-	47,25	14,65	0,725

5.4.2. Розрахунок постійних витрат

За поелементним методом розрахунку постійні витрати включають:

$$P = B_{нал} + B_{сп.осн} + B_{ам.сп} + B_{пр}, \quad (5.26)$$

де $B_{нал}$ – витрати на налагодження обладнання, грн;

$B_{сп.осн}$ – витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн (у порівнюваних варіантах відсутні), грн;

$B_{ам.сп}$ – витрати на амортизацію спеціального обладнання (два агрегатні верстати використовуються в базовому варіанті), грн;

$B_{пр}$ – витрати на створення програмного забезпечення верстату з ЧПУ (в проєктному варіанті ПЗ для всіх верстатів з ЧПУ входить до їхньої вартості), грн.

Витрати на налагодження обладнання:

$$B_{нал} = C_{гн} \cdot \frac{t_{п-з}}{60} \cdot K_{дс} \cdot A, \quad (5.27)$$

де $С_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика відповідного розряду грн./год.;

$t_{п-з}$ – підготовчо-заключний час даної операції, хв.;

А – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень за рік.

$$B_{нал.баз} = \frac{170,464 \cdot (10 \cdot 3 + 14) + 144,892 \cdot (12 \cdot 3 + 15 \cdot 3 + 20 + 16)}{60} \cdot 1,342 \cdot 52 = 28440,22 \text{ грн.}$$

$$B_{нал.пр} = \frac{144,892 \cdot (15 + 12) + 170,464 \cdot 20 \cdot 6}{60} \cdot 1,342 \cdot 52 = 28341,33 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію спеціального обладнання:

$$B_{ам.сп} = \frac{Ф_{бал} \cdot Н_{а}}{100}, \quad (5.28)$$

де $Ф_{бал}$ – балансова вартість обладнання, грн.

$$B_{ам.сп.б} = \frac{730300 \cdot 1,19 \cdot 20}{100} = \frac{869057 \cdot 20}{100} = 173811,4 \text{ грн.}$$

5.4.3. Розрахунок технологічної собівартості

Усі виконані розрахунки змінних та постійних витрат, а також розрахунок технологічної собівартості зведемо до табл. 5.11.

Таблиця 5.11

Розрахунок технологічної собівартості

№ з/п	Статті витрат	Витрати, грн.	
		Базовий	Проект
1.	Змінні витрати V		
1.1	Заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	47,140	40,840
1.2	Електроенергія силова	11,239	5,282
1.3	Ремонт обладнання	2,365	1,248
1.4	Матеріали допоміжні	5,058	2,781
1.5	Амортизація універсального обладнання	6,817	46,154
1.6	Експлуатація приміщень	1,333	0,725
	Всього змінних витрат	73,952	97,030
2.	Постійні витрати Р		
2.1	Налагодження обладнання	28440,22	28341,33
2.2	Амортизація спеціального обладнання	173811,4	-
	Всього постійних витрат	202251,6	28341,33
	Технологічна собівартість річного випуску деталей	2420812	2939241

Технологічна собівартість:

$$C_{тех.баз} = 73,952 \cdot 30000 + 202251,6 = 2420812 \text{ грн.}$$

$$C_{тех.пр} = 97,030 \cdot 30000 + 28341,33 = 2939241 \text{ грн.}$$

За критерієм мінімуму технологічної собівартості більш ефективним для заданої програми запуску деталей «золотник» $N_з$=30000 шт. є базовий варіант технологічного процесу механічної обробки даної деталі.

Для розмежування області ефективного використання того чи іншого варіанту технологічного процесу розрахуємо критичну програму випуску деталей $N_{кр}$, за якої варіанти, що порівнюються, будуть рівноцінними, тобто $C_{тех.баз}$=$C_{тех.пр}$:

$$N_{кр} = \frac{P_{пр} - P_{баз}}{V_{баз} - V_{пр}} = \frac{28341,33 - 202251,6}{73,952 - 97,030} = 7536 \text{ шт.} \quad (5.29)$$

Висновок: за програми запуску деталі «золотник», яка не перевищує 7536 шт. доцільнішим є застосовування проєктного варіанту технологічного процесу її механічної обробки, а за програми запуску-випуску даної деталі, яка більше значення $N_{кр}$, у тому числі для заданої програми $N_з$=30000 шт., ефективнішим з економічної точки зору є базовий варіант технологічного процесу механічної обробки золотника.

5.4.4. Розрахунок показників економічної ефективності проектного варіанту технологічного процесу

Річний економічний ефект від застосування обраного варіанту технологічного процесу:

$$E_р = \left(C_{тех.баз} + E_н \cdot K_{баз}\right) - \left(C_{тех.пр} + E_н \cdot K_{пр}\right), \quad (5.30)$$

де $E_н$ – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень;

$K_{баз}$, $K_{пр}$ – відповідно капітальні вкладення базового і проектного варіантів техпроцесу, грн.

Капітальні вкладення по кожному варіанту складаються із вкладень в обладнання $Ф_{бал}$ (табл. 5.8), оснащення $B_{осн}$, а також у приміщення, яке це обладнання займає $K_{буд}$, скореговані на коефіцієнт завантаження обладнання тих детале-операцій, які відрізняються у порівнюваних варіантах:

$$K = \left(Ф_{бал} + B_{осн} + K_{буд}\right) \cdot \eta_{з_i}, \quad (5.31)$$

Капітальні вкладення в будівлі розраховуємо за формулою:

$$K_{буд} = S_{од} \cdot K_f \cdot q_{пр} \cdot h \cdot Ц_{буд}, \quad (5.32)$$

де h - висота приміщення цеху, м;

$Ц_{буд}$ – ціна 1м^2 виробничої площі висотою 8-10 м, грн./м^3.

$$K_{буд.баз} = 156,34 \cdot 8 \cdot 5500 = 6878960 \text{ грн.}$$

$$K_{буд.пр} = 55,89 \cdot 8 \cdot 5500 = 2459160 \text{ грн.}$$

Балансова вартість обладнання (табл. 5.9):

$$Ф_{бал.баз} = 3535312 \text{ грн.}$$

$$Ф_{бал.пр} = 13267500 \text{ грн.}$$

$$K_{баз} = (6878960 + 3535312) \cdot 0,25 = 2603586 \text{ грн.}$$

$$K_{пр} = (2459160 + 13267500) \cdot 0,269 = 4230472 \text{ грн.}$$

$$E_р = (2939241 + 0,16 \cdot 4230472) - (2420812 + 0,16 \cdot 2603568) = -778734 \text{ грн.}$$

Впровадження запропонованого технологічного процесу впливає на збільшення технологічної собівартості виготовлення деталі та потребує значних капітальних вкладенньв на придбання нового обладнання, що викликало від‘ємне значення економічного ефекту. Проте в базовому варіанті для розрахунку узято середні ціни верстатів, які були у використанні, оскільки їхні нові зразки наразі не випускаються. Придбання підприємством на вторинному ринку такого фізично та морально зношеного обладнання мало б свої негативні наслідки, а саме: збільшення потреби в робочій сили, а отжевитрат на заробітну плату, а також витрат на його утримання і ремонт, зростання браку виготовлюваної продукції, необхідність їх скорішої заміни через неможливість подальшої експлуатації таке інше. Таким чином, впровадження проєктного варіанту техпроцесу було б правильним рішенням для підприємства.

Зниження трудомісткості виготовлення деталі при впровадженні проектного варіанту техпроцесу (у відсотках) розраховуємо за формулою:

$$\Delta T_р = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{шт(i)}^{баз}}{\sum_{i=1}^{m} t_{шт(i)}^{пр}} \cdot 100 - 100 = \frac{18,182}{15,39} \cdot 100 - 100 = 18,1\%, \quad (5.33)$$

5.5. Розрахунок планової цехової собівартості деталі

Цехова собівартість виготовлення деталей визначається як сума калькуляційних статей витрат:

$$C_{цех} = M_o + З_{од} + B_c + B_{ін} + B_o + B_ц\,, \tag{5.34}$$

де M_o - вартість основних матеріалів, грн.:

$З_{од}$ - основна та додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, грн.;

B_c - відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок), грн.;

$B_{ін}$ - витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн.;

B_o - витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$B_ц$ - цехові витрати, грн.

Вартість основних матеріалів:

$$M_o = a_р \cdot Ц_м \cdot K_{тр} - a_в \cdot Ц_в\,, \tag{5.35}$$

де $a_р$ - норма витрат матеріалу на деталь (сталь 15Х), кг;

$Ц_м$ - ціна матеріалу, грн./кг.;

$K_{тр}$ - коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, витрати на зберігання матеріалів (приймається у розмірі 1,05...1,08);

$a_в$ - маса відходів, кг.;

$Ц_в$ - ціна відходів, грн./кг.

$$M_o = 1,004 \cdot 78,00 \cdot 1,05 - (1,004 - 0,403) \cdot 12,60 = 74,655 \text{ грн.};$$

Заробітна плата основна й додаткова виробничих робітників:

$$З_{од} = P_в \left(1 + K_д\right), \tag{5.36}$$

де $P_в$ - відрядний розцінок на деталь (основна зарплата), що визначається, як сума операційних розцінок $P_{оп(і)}$:

$$P_в = \sum_1^m P_{оп_i} = \sum_1^m \frac{e^в_{год_i} \cdot t_{шт-к_i}}{60}\,, \tag{5.37}$$

де $e^в_{год_i}$ - годинна тарифна ставка відрядника відповідного розряду роботи і-ої операції технологічного процесу, грн./год.;

$t_{шт-кі}$ - штучно-калькуляційний час і-ої операції технологічного процесу, хв.:

$п_{пр}$ – розмір партії деталей, шт.

На першій операції техпроцесу обробки деталі:

$$P_{оп(010)} = 127,847 \cdot \frac{0,845}{60} = 1,8005 \text{ грн./шт.}$$

Розрахунок відрядної розцінки на деталь зведемо до табл. 5.12.

Таблиця 5.12

Розрахунок відрядної розцінки на деталь

№ оп.	Найменування операції	$t_{шт-к}$, хв.	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн./год.	Розцінка на деталь, грн.
010	Токарно-фрезерна з ЧПУ	0,845	4	127,847	1,8005
015	Токарно-фрезерна з ЧПУ	5,095	4	127,847	10,8563
020	Токарна з ЧПУ	2,335	4	127,847	4,9754
025	Токарна з ЧПУ	2,345	4	127,847	4,9967
030	Токарна з ЧПУ	0,445	4	127,847	0,9482
035	Прошивочна	2,976	3	115,062	5,7071
040	Різьбонарізна	0,771	3	115,062	1,4785
045	Безцентрово-шліфувальна	0,835	4	127,847	1,7792
	Всього	15,645	–	–	32,542

$$З_{од} = 32,542 \cdot (1 + 0,1) = 35,796 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні потреби виробничих робітників:

$$В_с = З_{од} \cdot \frac{К_с}{100}, \quad (5.38)$$

де $К_с$ - відсоток єдиного соціального внеску.

$$В_с = 35,796 \cdot \frac{22}{100} = 7,875 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію спеціального оснащення, що припадають на одну деталь, складають 40-55 грн. на одну нормо-годину трудомісткості виготовлення деталі (менше значення відповідає ДС, більше – ВС).

$$В_{осн} = 55 \cdot \frac{15,39}{60} = 14,108 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання і експлуатацію обладнання:

$$В_о = З_о \cdot \frac{П_{во}}{100}, \quad (5.39)$$

де $П_{во}$ - процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання;

$З_о$ - основна заробітна плата за виготовлення деталі, грн.

$$B_o = 32,542 \cdot \frac{320}{100} = 173,557 \text{ грн.}$$

Загальноцехові витрати в собівартості деталі:

$$B_ц = З_o \cdot \frac{П_ц}{100}, \quad (5.40)$$

де $П_ц$ – процент цехових витрат.

$$B_ц = 32,542 \cdot \frac{240}{100} = 135,592 \text{ грн.}$$

Калькуляцію цехової собівартості деталей зведено до табл. 5.13.

Таблиця 5.13

Калькуляція цехової собівартості виготовлення деталі

№ з/п	Найменування статей	Витрати, грн.
1.	Матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів	74,655
2.	Основна заробітна плата виробничих робітників	32,542
3.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	3,254
4.	Відрахування у соціальні фонди	7,875
5.	Експлуатація спеціального оснащення	14,108
6.	Витрати на утримання і експлуатацію обладнання	173,557
7.	Цехові витрати	135,592
8.	Всього цехова собівартість $С_ц$	441,583

5.6. Планування підсумкових техніко-економічних показників

Крім показників, розрахованих у попередніх розділах дипломної роботи, слід додатково визначити такі:

- виробіток продукції на одного робітника:

$$B_п = \frac{T_р}{R_o} = \frac{29549}{16} = 1847 \text{ нормо-год./ос.}, \quad (5.41)$$

де $Т_р$ – трудомісткість річної виробничої програми цеху, нормо-год.;

R_o – чисельність основних робітників цеху, осіб.

- зарплатомісткість продукції:

$$З_{зп} = \frac{З_{од}}{С_ц} \cdot 100, \quad (5.42)$$

де $З_{од}$ – основна й додаткова заробітна плата у собівартості деталі, грн.;

$С_ц$ - цехова собівартість деталі, грн.

$$З_{зп} = \frac{35,796}{441,583} \cdot 100 = 8,1\%$$

- матеріаломісткість продукції:

$$З_{мп} = \frac{М_о}{С_ц} \cdot 100 \,, \qquad (5.43)$$

де $М_о$ – матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів у собівартості деталі, грн.

$$З_{мп} = \frac{74,655}{441,583} \cdot 100 = 16,9\%$$

- собівартість товарної продукції цеху:

$$С_{тп} = С_ц \cdot N_з \cdot К_{дов} \qquad (5.44)$$

де $N_з$ - річна програма запуску деталей, шт./рік.

$$С_{тп} = 441,589 \cdot 30000 \cdot 3,2 = 42392544 \text{ грн.}$$

Підсумкові техніко-економічні показники роботи цеху зведемо до табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Техніко-економічні показники цеху

№ з/п	Показник	Величина
1.	Програма запуску деталі ($N_з$), шт./рік	30000
2.	Трудомісткість виробничої програми ($Т_р$), нормо-год.	29549
3.	Цехова собівартість деталі, грн.	441,583
4.	Собівартість товарної продукції цеху ($С_{тп}$), тис. грн./рік	42392544
5.	Чисельність основних робітників, осіб	16
6.	Виробіток продукції на одного робітника, нормо-год.	1847
7.	Матеріаломісткість продукції, %	16,9
8.	Зарплатомісткість продукції, %	8,1
9.	Річний економічний ефект від впровадження проектного варіанту техпроцесу, грн.	-
10.	Зниження трудомісткості виготовлення деталі, %	18,1
11.	Економія чисельності основних робітників, осіб	3

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на тему: «Дослідження похибок формоутворення при шліфуванні золотників з переривчастими поверхнями» виконано дослідження процесу шліфування зовнішніх циліндричних поверхонь та зосереджено увагу на виникненні похибок форми.

Проаналізовано причин виникнення похибок форми (круглість, огранювання) при врізному безцентровому шліфуванні. Розглянуто відомі дослідження методів зменшення похибок форми при обробці зовнішніх циліндричних поверхонь.

Виконано аналіз базової технології виготовлення деталі золотник із виявленням його переваг та недоліків. Спроєктовано технологічний процес обробки деталі золотник, що забезпечує задані кресленням деталі параметри точності та якості поверхонь, а зовнішня циліндрична поверхня підлягає шліфуванню. Кругле шліфування було замінено на безцентрове з метою забезпечення допусків круглості та циліндричності, що пред’являються до поверхні 5. На основі аналізу методів зменшення похибок форми для операції безцентрового шліфування шийок золотника, що мають переривчасту поверхню, запропоновано обрати геометричну оптимізацію налаштування за індексом стабільності *SI* з доповненням перевіркою режимів за жорсткістю та потужністю шліфування. Запропоновані кроки дозволили визначити оптимальні геометричні параметри процесу врізного шліфування. Виконана перевірка дозволила підтвердити, що вибрані режими шліфування не перевищують потужність привода круга та не створюють небезпеки термічного припікання. Виконано необхідні економічні розрахунки.

Всі прийняті технічні рішення підтверджено відповідними розрахунками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Економічні та організаційно-планові розрахунки при проектуванні цеху механічної обробки. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування»./Укл. Журило І.В., Романюк Л.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 35 с.
2. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи : освітньо-професійна програма «Прикладна механіка», рівень вищої освіти другий (магістерський) : спец. 131 Прикладна механіка, галузь знань 13 Механічна інженерія / [уклад. : І. І. Павленко, В. А. Мажара, К. К. Щербина, О. І. Скібінський] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т., каф. машинобуд., механтроніки і робототехніки. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. - 42 с.
3. Alonso J. Practical aspects of centerless Grinding (plunge). Università degli Studi di Udine, 2011.
4. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J. I., Gallego I., Muguerza Perello I., Krajnik P. Stability analysis and optimization algorithms for the set-up of infeed centerless grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 84. Pp. 17–32.
5. Barrenetxea D., Sanchez J. A., Mendikute A. Practical application of new simulation methods for the elimination of chatter in centerless grinding. Tecnalia Science Portal.
6. Bianchi G., Leonesio M., Safarzadeh H. A double input describing function approach for stability analysis in centerless grinding under interrupted cut. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 108, Issues 1–2. Pp. 439–453.
7. Bueno R., Zatarain M., Aguinagalde J. M., Le Maître F. Geometric and Dynamic Stability in Centerless Grinding. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 1990. Vol. 39, No. 1. P. 395–398.
8. Chalyj V., Moroz S., Ptachenchuk V., Zablotskyj V., Prystupa S. Investigation of Waveforms of Roller Bearing’s Working Surfaces on Centerless Grinding Operations. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSM 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. Pp. 364–375.

9. Chen X., Wang Y., Zhang L. Experimental Study on Grinding of Inner Raceway of Tapered Roller Bearing. Micromachines. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 175.
10. Cui Q., Ding H., Cheng K. An analytical investigation on the workpiece roundness generation and its perfection strategies in centreless grinding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2015. Vol. 229, Issue 3. Pp. 409–420.
11. Dhinakarraj C. K., Vasanthkumar P., Rajesh Kumar R. Fuzzy Logic Approach for Enhancing the Performance of Grinding Process. Journal of Advanced Engineering Research. 2016. Vol. 3, Issue 2. Pp. 103–111.
12. Durgumahanti U. P., Singh A. K., Rao P. V. Combined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. Vol. 50. P. 969–979.
13. Fujiwara T., Matsubara A. In-process measuring method for the size and roundness of workpieces in cylindrical grinding. Semantic Scholar.
14. Gallego I., Bueno R. Intelligent Centerless Grinding: Global Solution for Process Instabilities and Optimal Cycle Design. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2007. Vol. 56, Issue 1. Pp. 415–418.
15. Garitaonandia I., Albizuri J., Hernandez J. M. Model and experimental verification of static rounding stability in centerless grinding. Manufacturing Technology and Machine Tool. 2024. Vol. 50, No. 7. P. 9.
16. Giorio L., Viitala R., Brusa E. Roundness error analysis and vibration impact on workpiece quality in cylindrical grinding. Measurement. 2024. Vol. 230.
17. Hashimoto F., Gallego I., Oliveira J. F. G., Barrenetxea D., Takahashi M., Sakakibara K., Stålfelt H.-O., Staadt G., Ogawa K., Stiles K. Advances in centerless grinding technology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61, Issue 2. Pp. 747–770.
18. ISO 525:2020. Bonded abrasive products – Shape types, designation and marking. Geneva : ISO, 2020. 21 p.
19. ISO 8486-1:1996. Bonded abrasives – Determination and designation of grain size distribution – Part 1: Macrogrits F4 to F220. Geneva : ISO, 1996. 12 p.

20. Karpuschewski B., Kundrak J. Advances in modeling of fixed-abrasive processes. Chalmers Research, 2021.
21. Kim H. S., Kim H. E., Lee C. S., Park Y. C., Kim S. C. An acoustic emission monitoring system for centerless grinding processes. Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 111, Issues 1–3. Pp. 256–261.
22. Kim H. Y., Kim S. R., Ahn J. H., Kim S. H. Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission. Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 111, Issues 1–3. Pp. 273–278.
23. Klocke F. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 444 p.
24. Klocke F., Friedrich D., Linke B., Nachmani Z. Basics for In-Process Roundness Error Improvement by a Functional Workrest Blade. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2004. Vol. 53, Issue 1. Pp. 275–280.
25. Leonesio M., Bianchi G. Multistage centerless grinding setup via discrete mapping. Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 80. Pp. 775–788.
26. Leonesio M., Wojcicki J., Bianchi G. Geometrical Optimization of Centerless Grinding Process via a Profiled Workrest Blade. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSM 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. Pp. 364–375.
27. Li H., Zhao B., Wang X. Surface roughness model of ultrasonic vibration-assisted grinding of ceramic matrix composites. Journal of Advanced Manufacturing Science. 2022. Vol. 32, No. 4. P. 45–52.
28. Linke B. Centerless Grinding. CIRP Encyclopedia of Production Engineering / ed. by L. Laperrière, G. Reinhart. Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. P. 165–172.
29. Liu X., Zhang Y., Wang J. Prediction Model of Dynamic Error for Ultra-Precision Vertical Grinding Machine. Machines. 2026. Vol. 10, No. 2. P. 29.
30. Liu Z., Yang C., Sun Y. Development and Power Calculation of a Grinding Wheel Design for Interrupted Grinding. EPJ Web of Conferences. 2021. Vol. 254.
31. Lu L., Zhao X., Chen M. Research on Fusion Predictive Control Method of Size and Roundness in Grinding Process. Semantic Scholar, 2023.

32. Malkin S. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives. Industrial Press Inc., 2008 - 372 p.
33. Meschke F., Riemer O. Grinding and fine finishing of future automotive powertrain components. Chalmers Research, 2021.
34. Monici R. D., Bianchi E. C., Aguiar P. R. Analysis of the influence of sparkout time on grinding using acoustic emission and electric power signals. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2006. Vol. 28, No. 4. P. 450–456.
35. Nguyen T. H., Le X. H. Multi-objective optimization of the cylindrical grinding process of SCM440 steel using preference selection index method. Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 67, No. 3. P. 145–153.
36. Oliveira J. F. G., Silva E. J., Guo C. Blind Bores, Keyways and Thin Sleeves: Internal Grinding Solutions. CNC57 Technical Articles, 2022.
37. Oliveira J. F. G., Silva E. J., Guo C. Industrial challenges in grinding technology. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58, No. 2. P. 663–680.
38. Oliveira J. F. G., Silva E. J., Guo C. Review of advanced sensor system applications in grinding operations. Sensors. 2025. Vol. 25, No. 3. P. 124.
39. Osawa J., Oliveira J. F. G. Practical aspects of centerless grinding process optimization. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018. Vol. 124. P. 45–56.
40. Patel K., Kumar P., Sharma S. An Analysis of Surface Roughness (Ra, Rz), Material Removal Rate, and Residual Stresses in Cylindrical Grinding of Hardened OHNS Steel. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2020. Vol. 9, No. 6. P. 312–318.
41. Radhakrishnan V., Raman L. Effects of process parameters on workpiece roundness in tangential feed centerless grinding using a surface grinder. Academia.edu, 2018.
42. Ribeiro F. S., Da Silva M. B., De Paiva A. P. Grinding comparative analysis between different proportions of water-oil applied to MQL technique and industrial production cost towards a green manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 113. P. 2105–2119.
43. Rovelli S. A novel approach to roundness generation analysis in centerless grinding. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bibliothek, 2018.

44. Rowe W. B. Rounding and stability in centreless grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 82–83. Pp. 1–10.
45. Silva E. J., Oliveira J. F. G. Analysis of acoustic emission in precision and high-efficiency grinding technology. ResearchGate, 2013.
46. Silva E. J., Oliveira J. F. G. Monitoring Force in Precision Cylindrical Grinding. Scribd, 2018.
47. Souza R. R., Silva L. R., Machado A. R. Parametric analysis of a grinding process using the rough sets theory. FUMEC Engineering Journal. 2020. Vol. 18, No. 1. P. 45–58.
48. Sun Y., Jiang Z., Wang X. Research on roundness error consistency model for crank journal grinding process. ProQuest, 2021.
49. Taylor Hobson Inc. Talyrond 565/585HS: Multi-part high precision roundness measuring system. Product Brochure, 2022.
50. Tian X., Zhang J., Wang L. Temperature field model in surface grinding: a comparative study. International Journal of Extreme Manufacturing. 2023. Vol. 5, No. 4. Art. 045001.
51. Viitala R., Juhanko J., Kuosmanen P. The Effect of Grinding Wheel Contact Stiffness on Plunge Grinding Process Stability. Machines. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 62.
52. Wang L., Zhao L., Cao Z., Hu Y. Centerless grinding dynamic rounding model and numerical simulation. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition). 2023. Vol. 40, No. 6. Pp. 128–135.
53. Wang Y., Chen X., Zhao Z. High-precision and high-efficiency grinding technology for sleeve parts. Manufacturing Technology and Machine Tool. 2021. Vol. 47, No. 3. P. 3–11.
54. Wang Y., Li X., Zhang H. Parameter Optimization and Modeling for Improving Gear Grinding Quality. Processes. 2026. Vol. 14, No. 7. P. 1171.
55. Wang Z., Liu Y., Sun C. Experimental Study on Roundness of High-Speed Cylindrical Plunge Grinding. Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1004–1005. P. 1050–1055.
56. Xiao G., Zhao Y., Zhang S. Profile Evolution and Cross-Process Collaboration Strategy of Precision Components in Grinding Operations. Micromachines. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 21.
57. Xu W., Wu Y. A new in-feed centerless grinding technique using a surface grinder. Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211, Issue 1. Pp. 141–149.

58. Xu W., Wu Y., Sato T., Lin W. Effects of process parameters on workpiece roundness in tangential-feed centerless grinding using a surface grinder. Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, Issue 5. Pp. 759–766.
59. Xu X., Zhang L., Zhao B. Predictive models for the surface roughness and subsurface damage in grinding of brittle materials. International Journal of Extreme Manufacturing. 2024. Vol. 6, No. 2. Art. 022001.
60. Yao W., Zhang X., Li Y. Modeling, simulation, and experimental verification on material removal and rounding process of centerless cylindrical finishing with free abrasives and soft pad. ResearchGate, 2021.
61. Zanger F., Schulze V. Influence of gear hobbing feed marks on the resulting gear quality after discontinuous profile grinding. ResearchGate, 2020.
62. Zarubin A. M., Pecheritsa H. V. Investigation of the process of external cylindrical grinding with a wheel of different grain size. ResearchGate, 2021.
63. Zatarain M., Le Maître F., Bueno R. Nonlinear Model for the Instability Detection in Centerless Grinding. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 64, No. 9. P. 545–554.
64. Zhang L., Xu Y., Chen M. Determining the Best Dressing Parameters for External Cylindrical Grinding Using Vitrified CBN Wheels. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Art. 8287.
65. Zhang X., Zhao B., Li Y. Experimental Oscillation-Assisted Cylindrical Plunge Grinding of Hardened Steel. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2022. Vol. 144, No. 1. Art. 011012.
66. Zhao B., Wang Y., Zhang L. A Study on Intelligent Grinding Systems With Industrial Perspective. Research Square, 2021.
67. Zhao B., Wang Y., Zhang L. Influence of material microstructure on grindability of bearing steel. ResearchGate, 2021.
68. Zhou X., Liu Y., Wang Z. Nonlinear Dynamics Analysis of High-Precision Grinding Systems. International Journal of Modern Physics B. 2020. Vol. 34, No. 18. Art. 2040161.