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:

«Хонінгування прецизійних внутрішніх циліндричних поверхонь деталей інструментом зі змінною геометрією»

Виконав здобувач вищої освіти ІІ-го курсу
групи ПМ-25Мз-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності G9 «Прикладна механіка »
_____ Максим ТКАЧУК

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Кирил ЩЕРБИНА

Рецензент: к.т.н., доцент
_____ Олег БЕВЗ

Кропивницький – 2026

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Ткачук Максим Анатолійович
Сертифікат: 514B5C86A1E5DA1104000000C4FC3F005F88B105
Дійсний з 11.05.2026 14:48:31 по 11.05.2027 14:48:30

Центральноукраїнський національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра «Машинобудування, мехатроніка і робототехніка»
Освітнього ступеня магістр
Спеціальність G9 «Прикладна механіка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____
"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ткачук Максим Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Хонінгування прецизійних внутрішніх циліндричних поверхонь деталей інструментом зі змінною геометрією
керівник роботи: Щербина Кирил Костянтинович, доцент канд. техн наук ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу №36-13 від "10" серпня 2026 року
2. Строк подання студентом проекту 20 грудня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи _____
3.1 Креслення деталей, технічні вимоги, програма і методика _____
3.2 Аналіз конструкцій існуючих інструментів для алмазної та абразивної обробки отворів
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
4.1. Загальна частина
4.2. Теоретична частина
4.3. Конструкторська частина
4.4. Економічна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал - 14 л. ф.А4

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	к.е.н., доц. Журило І.В.		

7. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна частина	10.10.2026	
2	Теоретична частина	16.10.2026	
3	Конструкторська частина	31.10.2026	
4	Економічна частина	20.11.2026	
5	Розробка презентації	30.11.2026	

Здобувач освіти _____ ___Ткачук М.А.___
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ ___Щербина К.К.____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки на 86 сторінках та графічної частини на 14 листах формату А4.

1. Актуальність роботи. Дослідження процесу фінішної обробки прецизійних отворів, а саме хонінгування, потребує додаткового аналізу закономірностей утворення сітки слідів з метою запобігання обробці «слід у слід», що спричиняє перенесення геометричних відхилень з інструмента на оброблювану поверхню під час його зношування.

2. Наукова новизна роботи. Полягає в моделюванні закономірностей формоутворення сітки слідів при хонінгуванні інструментом зі зміною геометрії розташування алмазно-абразивних брусків.

3. Практична цінність роботи. У синтезі компонувальної схеми хонінгувальної головки зі змінним кутовим розташуванням алмазних чи абразивних брусків, що уможливлює формування складної траєкторії різання окремими зернами.

4. Оцінка найбільш важливої суті роботи виконаної роботи. Оцінюючи найбільш вагомі результати проведеної роботи, а саме було проведено дослідження процесу формоутворення сітки слідів в процесі хонінгування отворів. виконано комплексний аналіз кінематичних закономірностей хонінгування. Зокрема, досліджено вплив накладання додаткової осьової осциляції на просторову траєкторію переміщення одиничних зерен та особливості формування сітки слідів на оброблюваній поверхні. Паралельно опрацьовано наукові праці, присвячені формоутворенню топографії отворів інструментами з несиметричною або різнокутовою орієнтацією алмазно-абразивних брусків. Встановлено, що кожен із зазначених технологічних підходів забезпечує підвищення продуктивності процесу завдяки оптимізації кута схрещування слідів, інтенсифікації мікрорізання та мінімізації повторного проходження зерен за тими самими траєкторіями (ефект обробки «слід у слід»). На основі отриманих результатів запропоновано інтегрований підхід, що передбачає комбінацію осьового осцилювального руху та хонінгувальної головки зі змінним просторовим розташуванням брусків. Синтез

таких кінематичних і конструктивних рішень призводить до утворення складної гіпоциклоїдальної траєкторії руху абразивних зерен. Це уможливлює рівномірніший розподіл теплового й силового навантаження в зоні різання, знижує копіювання похибок інструмента в процесі його зношування, а також одночасно підвищує продуктивність знімання припуску й поліпшує якість мікрорельєфу прецизійного отвору (формування регламентованої оливоємної сітки).

Ключові слова: фінішна обробка отворів, алмазний брусок, прецензійний отвір, хонінгувальна головка.

Annotation

The qualification work consists of an explanatory note on 86 pages and a graphic part on 14 A4 sheets.

1. Relevance of the Study. The study of precision hole finishing processes, particularly honing, requires further analysis of the patterns governing the formation of crosshatch patterns to prevent repeated abrasive passes along the same trajectories (“track-on-track” machining), which can result in the transfer of geometric deviations from the tool to the machined surface as the tool wears.

2. Scientific Novelty of the Study. It involves modeling the patterns governing crosshatch formation during honing using a tool with a variable geometric arrangement of diamond-abrasive honing stones.

3. Practical Significance of the Study. It consists in the development of a structural configuration of a honing head with a variable angular arrangement of diamond or abrasive honing stones, enabling the formation of complex cutting trajectories by individual abrasive grains.

4. Evaluation of the Most Significant Results. Among the most significant outcomes of the research, particular attention should be given to the investigation of crosshatch pattern formation during hole honing. A comprehensive analysis of the kinematic characteristics of the honing process was performed. In particular, the influence of superimposed axial oscillation on the spatial trajectories of individual abrasive grains and the resulting crosshatch pattern formation on the machined surface was investigated. In parallel, scientific publications addressing the formation of hole surface topography using honing tools with asymmetric or different angular orientations of diamond-abrasive honing stones were reviewed and analyzed.

It was established that each of these technological approaches contributes to increased machining productivity by optimizing the crosshatch angle, intensifying the microcutting process, and minimizing repeated abrasive grain passes along identical trajectories (the so-called “track-on-track” machining effect).

Based on the obtained results, an integrated approach was proposed, combining axial oscillatory motion with a honing head featuring a variable spatial arrangement of abrasive stones. The integration of these kinematic and structural solutions results in the generation of complex hypocycloidal trajectories of abrasive grain motion. This enables a more uniform distribution of thermal and mechanical loads within the cutting zone, reduces the transfer of tool geometric errors to the machined surface during tool wear, and simultaneously increases the material removal rate while improving the surface microtopography of precision holes through the formation of a controlled oil-retaining crosshatch pattern.

Keywords: hole finishing, diamond honing stone, precision hole, honing head.

ЗМІСТ

Вступ……... 9
1 Загальна частина…… 11
1.1 Аналіз траєкторії руху ріжучих зерен при різній кінематиці процесу хонінгування отворів алмазними або абразивними брусками…… 11
1.2 Аналіз точності обробки при хонінгуванні отворів …….. 17
1.3 Аналіз сил різання, які виникають при хонінгуванні отворів.……. 17
1.4 Аналіз існуючих проблем та методів утворення траєкторії руху зерна інструменту. 19
2 Теоретична частина……... 22
2.1 Кінематика процесу різання при хонінгуванні отворів хоном зі змінною геометрією розташування брусків …..……..... 25
2.2 Аналіз утворення траєкторії руху при додаванні додаткових рухів осьової та колової осциляції …….…. 31
2.3 Динамічний аналіз кульково-клинового хону в зоні малих переміщень…… 40
3. Технологічна частина…… 50
3.1 Розробка схеми верстату для хонінгування отворів з адаптивною системою керування…….. 50
3.2 Конструктивне виконання верстату для алмазного хонінгування…… 53
4. Економічна частина……..... 63
Висновки…… 80
Список використаних джерел ……. 81

ВСТУП

Забезпечення високої точності обробки отворів у деталях машин є одним із важливих завдань сучасного машинобудування, вирішення якого потребує комплексного підходу до формування заданих геометричних і розмірних характеристик, а також необхідних параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь. Для досягнення встановлених показників якості застосовують різноманітні методи фінішної обробки, спеціалізований різальний та абразивний інструмент, а також технологічні системи, здатні забезпечувати стабільність процесу формоутворення поверхонь.

Одним із високоефективних методів фінішної обробки точних отворів є алмазне хонінгування, технологічні можливості якого постійно розширюються завдяки вдосконаленню конструкцій інструментів, кінематичних схем та способів керування процесом різання. Особливого значення застосування цього методу набуває під час обробки отворів із переривчастими поверхнями, зокрема за наявності внутрішніх поздовжніх канавок, які спричиняють зміну умов контакту абразивних брусків з оброблюваною поверхнею. Водночас використання традиційних технологічних схем алмазного хонінгування таких отворів супроводжується певними обмеженнями щодо автоматизованого регулювання параметрів обробки та оперативного пристосування технологічної системи до змінних умов її функціонування.

Підвищення ефективності алмазного хонінгування переривчастих поверхонь потребує розроблення систем адаптивного керування, функціонування яких ґрунтується на безперервному контролі технологічних параметрів і відповідному коригуванні режимів обробки. Такий підхід передбачає встановлення взаємозв'язків між керувальними впливами, параметрами процесу різання та реакцією технологічної системи. Використання отриманої інформації для формування регулювальних впливів створює передумови для стабілізації умов обробки, підвищення її продуктивності та забезпечення необхідних показників точності й якості оброблюваних поверхонь.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження технологічного процесу алмазного хонінгування точних отворів із переривчастими поверхнями на основі застосування адаптивного керування, спрямованого на стабілізацію умов різання, підвищення ефективності обробки та забезпечення заданих показників геометричної точності й шорсткості поверхонь деталей машин.

1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз траєкторії руху ріжучих зерен при різній кінематиці процесу хонінгування отворів алмазними або абразивними брусками

Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій фінішної обробки точних отворів є застосування алмазного розверчування з накладанням додаткових осциляційних рухів на основну кінематичну схему процесу. Результати експериментальних досліджень, проведених вітчизняними та зарубіжними науковцями, свідчать про те, що введення додаткових коливальних рухів у процес алмазно-абразивної обробки сприяє підвищенню геометричної точності отворів, поліпшенню умов оброблюваності матеріалів із підвищеними фізико-механічними властивостями, а також інтенсифікації процесу знімання матеріалу. Зазначені технологічні переваги зумовлені зміною характеру відносного переміщення різальних зерен інструмента та оброблюваної поверхні, що створює передумови для ефективнішого використання різальної здатності алмазно-абразивного шару.

Підвищення інтенсивності знімання матеріалу за умов накладання додаткових осциляційних рухів пояснюється насамперед зміною закономірностей формування траєкторій переміщення абразивних зерен. За раціонально підібраних кінематичних параметрів обробки забезпечується зменшення повторюваності проходження різальних зерен по раніше сформованих слідах, унаслідок чого збільшується частка їхньої активної взаємодії з матеріалом заготовки. При цьому формується складніша сітка траєкторій, яка сприяє більш рівномірному розподілу різальних впливів по оброблюваній поверхні, ефективнішому використанню робочої поверхні інструмента та підвищенню продуктивності процесу хонінгування.

У традиційних технологічних схемах алмазно-абразивної обробки додаткові коливальні переміщення переважно накладаються на основний зворотно-поступальний рух інструмента. Однак реалізація осьової осциляції супроводжується низкою конструктивних і технологічних обмежень. Зокрема, збільшення маси рухомих елементів верстатної системи ускладнює забезпечення необхідних динамічних характеристик коливального руху. Крім того, періодична

зміна напрямку осьової складової силового навантаження, а також коливання величини перебігу абразивних брусків за межі оброблюваної поверхні можуть негативно впливати на стабільність процесу та точність формоутворення отворів. У зв'язку з цим застосування механізмів осьової осциляції у традиційному виконанні є найбільш доцільним для хонінгувальних верстатів, призначених для обробки відносно коротких отворів невеликого діаметра, зокрема до 50 мм.

Для усунення зазначених конструктивних обмежень запропоновано альтернативну кінематичну схему формування додаткового осциляційного руху, яка може бути реалізована на базі вертикально-свердлильного верстата. Її принципова особливість полягає в накладанні періодичної коливальної складової на основний обертальний рух шпинделя. На відміну від традиційної осьової осциляції, така схема передбачає використання механізму, рухомі ланки якого здійснюють переважно обертальні переміщення. Це дає змогу застосовувати опори кочення, зменшувати вплив інерційних навантажень, пов'язаних зі зворотно-поступальним переміщенням масивних вузлів, та підвищувати керованість кінематичних параметрів процесу.

Важливою перевагою запропонованого технічного рішення є можливість плавного регулювання частоти й амплітуди додаткових коливань відповідно до технологічних умов обробки. Конструкція механізму також передбачає оперативне вмикання та вимикання осциляційного руху без необхідності зміни основної кінематичної схеми верстата. Завдяки цьому розширюються можливості налаштування режимів алмазно-абразивної обробки залежно від геометричних характеристик отворів, властивостей оброблюваного матеріалу та вимог до якості поверхні. Водночас використання механізму кругової осциляції зменшує залежність його конструктивного виконання від габаритних параметрів верстатного обладнання.

Особливе значення для забезпечення високих показників якості обробки має характер взаємного розташування траєкторій різальних зерен на поверхні отвору. За певних технологічних умов перевагу можуть мати схеми, які забезпечують переважно односпрямований характер відносного переміщення абразивних зерен,

що сприяє стабілізації умов мікрорізання. Водночас накладання додаткової осьової осциляції зумовлює періодичну зміну миттєвої осьової швидкості, унаслідок чого змінюються кут нахилу та конфігурація траєкторій переміщення різальних зерен. Застосування кругової осциляції дає можливість формувати інший характер кінематичної взаємодії інструмента із заготовкою та керувати параметрами траєкторій без безпосереднього накладання додаткового осьового переміщення.

Характер траєкторій руху різальних зерен за різних кінематичних схем алмазно-абразивної обробки наведено на рис. 1.1. Для традиційного хонінгування (рис. 1.1, а), яке здійснюється шляхом поєднання обертального та зворотно-поступального рухів інструмента, характерним є формування регулярної сітки слідів у вигляді гвинтових ліній, що взаємно перетинаються. Їхній кут нахилу та просторове розташування визначаються співвідношенням колової й осьової складових швидкості відносного руху інструмента та заготовки.

У разі введення додаткових осциляційних рухів за синусоїдальним законом траєкторії абразивних зерен набувають складнішої конфігурації. При осьовій осциляції (рис. 1.1, б) періодична зміна осьової складової швидкості спричиняє хвилеподібне відхилення траєкторій від їхнього положення за традиційної схеми обробки. За кругової осциляції (рис. 1.1, в) аналогічна періодична зміна конфігурації слідів досягається внаслідок накладання коливальної складової на обертальний рух інструмента. Незважаючи на відмінності механізмів реалізації додаткового руху, обидві кінематичні схеми характеризуються періодичною зміною напрямку миттєвої швидкості різальних зерен і формуванням нерівномірної за геометричними параметрами сітки слідів.

Таким чином, застосування додаткових осциляційних рухів у процесах алмазно-абразивної обробки відкриває можливості цілеспрямованого впливу на кінематику переміщення різальних зерен, закономірності формування мікрорельєфу поверхні та інтенсивність знімання матеріалу. Вибір раціональної схеми осциляції та узгодження її параметрів з основними режимами обробки є важливими передумовами підвищення продуктивності процесу й забезпечення необхідних показників геометричної точності та якості оброблюваних отворів.

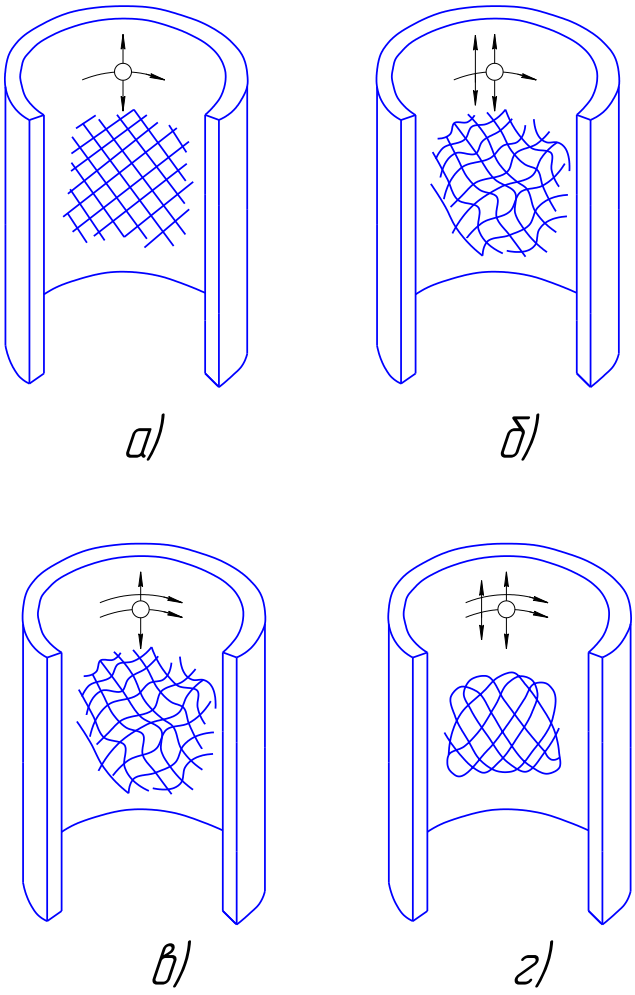


Рис. 1.1 Траєкторії руху ріжучих зерен при різній кінематиці процесу алмазного розверчування.

а – звичайна схема хонінгування;

б, в – кругове осцилування по синусоїдальному закону;

г – траєкторія руху зерен у вигляді фігур Лиссажу;

В запропонованій схемі в якості основних робочих рухів різання прийняті синусоїдальні осьові і кругові коливання, а обертові зворотно-поступальні рухи відповідно є круговою і осьовою подачами інструменту. При такій кінематиці хонінгування утворюється растрова траєкторія руху зерен в виді фігур Лиссажу (Рис. 1.3 г), створюючих при вірному підборі параметрів складових рухів рівномірну густу сітку слідів обробки. В результаті суттєво зростає продуктивність металоз’єму і точність геометричної форми оброблюємих поверхонь.

У запропонованій кінематичній схемі алмазного хонінгування принципово змінено співвідношення між основними робочими рухами різання та рухами подачі інструмента. Зокрема, функції основних рухів різання виконують синусоїдальні коливання в осьовому та коловому напрямках, тоді як традиційні обертальний і зворотно-поступальний рухи забезпечують відповідно колову й осьову подачі інструмента. Такий підхід дає змогу формувати складну траєкторію відносного переміщення алмазно-абразивних зерен по оброблюваній поверхні та здійснювати цілеспрямований вплив на характер їхньої взаємодії з матеріалом заготовки.

Особливістю зазначеної кінематики є формування растрової траєкторії переміщення різальних зерен, геометрична конфігурація якої визначається суперпозицією двох взаємно перпендикулярних гармонічних коливань. У розгортці циліндричної поверхні отвору такі траєкторії можуть набувати форми фігур Ліссажу (рис. 1.3, г), параметри яких залежать від співвідношення частот, амплітуд і фазових зсувів осьової та колової складових коливального руху. Водночас наявність рухів подачі зумовлює поступове зміщення сформованих траєкторій уздовж оброблюваної поверхні, забезпечуючи послідовне охоплення її різними ділянками робочої поверхні абразивного інструмента.

За умови раціонального узгодження кінематичних параметрів складових рухів формується густа та відносно рівномірна сітка слідів обробки, яка характеризується значною кількістю взаємних перетинів траєкторій різальних зерен. При цьому зменшується ймовірність багаторазового проходження окремих зерен по одних і тих самих ділянках поверхні, що сприяє більш повному використанню їхньої різальної здатності та рівномірнішому розподілу процесу мікрорізання. Крім того, зміна напрямку миттєвої швидкості відносного переміщення інструмента та заготовки створює передумови для ефективнішого видалення мікронерівностей і формування однорідніщого мікрорельєфу оброблюваної поверхні.

Застосування такої кінематичної схеми дає можливість інтенсифікувати процес знімання матеріалу без необхідності пропорційного збільшення традиційних режимних параметрів хонінгування. Водночас рівномірніше перекриття траєкторіями різальних зерен оброблюваної поверхні сприяє зменшенню локальної неоднорідності знімання припуску, що є важливою передумовою підвищення точності геометричної форми отворів. Особливого значення зазначені переваги набувають під час фінішної обробки прецизійних отворів, для яких необхідно забезпечувати мінімальні відхилення від циліндричності, круглості та прямолінійності твірної поверхні.

Таким чином, використання комбінованої кінематичної схеми з осьовими та коловими гармонічними коливаннями розширює технологічні можливості алмазного хонінгування завдяки керованому формуванню траєкторій руху абразивних зерен. Раціональний вибір співвідношення частот, амплітуд і фазових характеристик коливань у поєднанні з параметрами осьової та колової подач створює передумови для підвищення продуктивності знімання матеріалу, стабілізації процесу обробки та поліпшення геометричної точності оброблюваних поверхонь. Це обґрунтовує доцільність подальших досліджень впливу кінематичних параметрів на закономірності формування сітки слідів, інтенсивність знімання припуску та кінцеві показники якості оброблених отворів.

1.2. Аналіз точності обробки при хонінгуванні отворів.

Хонінгування отворів може бути отримана висока точність геометричної форми оброблюваних поверхонь. Для усунення похибки форми деталі в поздовжньому перерізі (конусоподібність, бочкоподібність та сідлоподібність) у більшості випадків достатньо правильно вибрати довжину алмазних спіральних труб l та величину „перебігу" за край отвору (1/3–1/4)l. У поперечному перерізі похибки форми отвори виправляються менш інтенсивно.

При використанні алмазних розверток з довгими алмазними спіральними трубами можливе виправлення непрямолінійності осі отвору.

Великий вплив на виправлення овальності у жорстких товстостінних деталей здійснює питомий тиск на поверхні контакту алмазних спіральних труб з деталлю. Інтенсивність виправлення овальності зручно оцінювати коефіцієнтом К [1 стор. 221]:

$$K = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\Delta D} \qquad (1.3)$$

де δ_1 і δ_2 – відповідно вихідна та кінцева овальність отвору, мм;

ΔD – знімання металу на діаметр, мм.

Як показали експерименти при обробці отворів сталевих загартованих шестерень алмазною розверткою з високою радіальною жорсткістю алмазними спіральними трубами характеристики А200/160М1 100%, при вихідній овальності δ_1 = 0,05 мм та збільшенні питомого тиску з 5 кгс/см^2 до 26 кгс/см^2 коефіцієнт K збільшився з 0,4 до 0,59.

1.3. Аналіз сил різання, які виникають при хонінгуванні отворів.

В процесі хонінгування отворів виникають радіальна P_y, тангенціальна P_z і осьова P_x складові сили різання, величини яких необхідно знати для розрахунку верстата, хонінгувальної головки та пристосування. Для розрахунку тангенціальної, радіальної та осьової складових сил хонінгування отворів використовують залежності з роботи [1 стор. 221]:

$$P_x = f_x F \rho \qquad (1.4)$$

$$P_y = \rho F \qquad (1.5)$$

$$P_z = f_z \rho F \qquad (1.6)$$

де f_x, f_z – відповідно коефіцієнти тертя-царапання в осьовому й тангенціальному напрямках (Таблиця 1.1);

ρ – питомий тиск алмазних спіральних труб на оброблювану поверхню, кгс/см^2;

F – площина контакту з оброблюваною поверхнею, см^2;

Таблиця 1.1

Коефіцієнти тертя-царапання при алмазному розвірчуванні загартованої сталі

Час розвер-чування	f_x		f_y		Час розвер-чування	f_x		f_y	
	Зернистість інструменту					Зернистість інструменту			
	А200/160	А80/63	А200/160	А80/63		А200/160	А80/63	А200/160	А80/63
5	0,71	0,58	0,42	0,36	35	0,47	0,36	0,33	0,26
15	0,62	0,46	0,38	0,30	45	0,41	0,33	0,33	0,25
25	0,55	0,42	0,34	0,28	60	0,35	0,31	0,29	0,23

Значення ρ можуть бути прийняті відповідно до наведених вище рекомендацій або розраховані виходячи з параметрів циліндра розширення хонінгувальної головки та її конструктивних розмірів.

Тиск алмазних спіральних труб на оброблювану поверхню змінюється в початковий період обробки. Через 15–20 секунд після початку хонінгування отворів приробітка інструмента закінчується і в подальшому тиск алмазних брусків зберігає постійне значення. Розрахунки сталого тиску алмазних брусків показують, що він зворотньо пропорційний площині контакту з оброблюваною поверхнею й прямо пропорційний тиску.

1.4. Аналіз існуючих проблем та методів утворення траєкторії руху зерна інструменту.

Аналіз закономірностей формування траєкторій відносного переміщення алмазних та абразивних зерен інструмента, розглянутих у підрозділі 1.1, свідчить про суттєвий вплив кінематичної структури робочих рухів на характер формування мікрорельєфу оброблюваної поверхні. Зокрема, ускладнення траєкторії руху різальних зерен унаслідок поєднання декількох кінематичних складових створює передумови для цілеспрямованого регулювання параметрів поверхневого шару, забезпечення необхідної щільності та рівномірності розташування слідів обробки. Таким чином, зміна кінематичних характеристик переміщення інструмента може розглядатися як один із дієвих способів керування процесом формоутворення мікрорельєфу поверхні під час алмазно-абразивної обробки точних отворів [2].

Реалізація зазначеного підходу передбачає введення до основної кінематичної схеми обробки додаткових періодичних коливань, які накладаються на традиційні обертальний та зворотно-поступальний рухи інструмента. Завдяки цьому змінюються миттєві значення швидкості й напрямку відносного переміщення різальних зерен, характер їхньої взаємодії з матеріалом заготовки, а також закономірності розподілу слідів мікрорізання на оброблюваній поверхні. Водночас ефективність використання додаткових осциляційних рухів визначається не лише можливістю їх механічного відтворення, а й здатністю технологічної системи забезпечувати регулювання відповідних кінематичних параметрів у процесі обробки.

У зв'язку з цим однією з основних вимог до технологічного обладнання, призначеного для реалізації керованого алмазного хонінгування, є наявність механізмів осциляції з можливістю незалежного або узгодженого регулювання частоти, амплітуди та фазових характеристик коливальних рухів. Такі механізми повинні забезпечувати стабільність відтворення заданих законів переміщення інструмента, необхідну точність кінематичних параметрів і можливість їх зміни відповідно до технологічних умов обробки. Особливого значення набуває

забезпечення керованості осциляційних рухів, оскільки саме їхні параметри визначають конфігурацію траєкторій різальних зерен, характер взаємного перетину слідів і ступінь охоплення оброблюваної поверхні.

Як зазначено у [2], одночасне застосування колових та осьових гармонічних коливань дає змогу формувати складні траєкторії переміщення різальних зерен, які за певних співвідношень кінематичних параметрів набувають форми фігур Ліссажу. У розгортці циліндричної поверхні отвору такі траєкторії характеризуються періодичним чергуванням напрямків руху та утворенням системи взаємопов'язаних криволінійних слідів. За раціонального поєднання параметрів осциляційних рухів забезпечується формування щільної сітки слідів обробки, що сприяє рівномірнішому розподілу різальних впливів і зменшенню ймовірності виникнення ділянок із недостатнім або надмірним зніманням матеріалу.

Одним із визначальних чинників формування геометричної конфігурації фігур Ліссажу є співвідношення частот осьових і колових коливань. Залежно від його величини змінюються періодичність повторення траєкторій, кількість їхніх взаємних перетинів і характер розподілу слідів на оброблюваній поверхні. При цьому важливу роль відіграють також амплітуди коливань та різниця початкових фаз гармонічних складових, які визначають просторові межі й форму утворюваних кривих. Отже, щільність сітки слідів не може розглядатися виключно як функція частотного співвідношення, оскільки її фактичні характеристики формуються під сукупним впливом параметрів осциляції, швидкостей основних рухів подачі та тривалості обробки.

За фіксованого раціонального співвідношення частот траєкторія різального зерна може набувати замкненої періодичної форми, тоді як зміна частотних характеристик призводить до перебудови її геометричної структури. У разі накладання рухів подачі відбувається поступове зміщення траєкторій відносно поверхні отвору, що забезпечує формування багатократних перетинів слідів у межах оброблюваної ділянки. Така особливість кінематики створює передумови для ефективнішого використання різальної здатності абразивного інструмента,

підвищення рівномірності знімання припуску та поліпшення параметрів геометричної точності й шорсткості поверхні.

Разом із тим реалізація зазначених кінематичних закономірностей можлива не на всіх типах верстатного обладнання, що застосовується для алмазно-абразивної обробки отворів. Конструктивні особливості приводів, характер кінематичних зв'язків між виконавчими механізмами та обмежені можливості регулювання їхніх робочих параметрів суттєво впливають на здатність технологічної системи формувати необхідні траєкторії переміщення різальних зерен [2].

Зокрема, конструкції верстатів, представлених на рис. 1.1, передбачають можливість одночасного відтворення осьових і колових осциляційних рухів, що створює необхідні кінематичні передумови для формування траєкторій у вигляді фігур Ліссажу. Проте суттєвим обмеженням таких технічних рішень є недостатня гнучкість систем керування механізмами осциляції. За відсутності можливості незалежного регулювання частотних і амплітудних параметрів коливань ускладнюється забезпечення їхнього оптимального співвідношення, необхідного для формування заданої конфігурації та щільності сітки слідів обробки.

Внаслідок цього технологічні можливості зазначеного обладнання значною мірою визначаються початково встановленими конструктивними та кінематичними характеристиками приводів. Зміна умов обробки, зокрема діаметра отвору, фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки, параметрів абразивного інструмента або вимог до якості поверхні, потребує відповідного коригування режимів осциляції, яке не завжди може бути реалізоване без додаткового переналаштування механічних вузлів. Це обмежує можливості оперативного керування процесом формоутворення мікрорельєфу та ускладнює впровадження адаптивних алгоритмів регулювання параметрів алмазного хонінгування.

Окремої уваги потребує конструкція верстата, наведена на рис. 1.1, у якій реалізовано жорсткий кінематичний зв'язок між механізмами формування складових руху інструмента. Наявність такого зв'язку зумовлює взаємозалежність

кутових швидкостей відповідних ланок механічної передачі та обмежує можливість незалежної зміни параметрів осьової й колової осциляції. За цих умов співвідношення частот коливальних рухів визначається переважно конструктивними характеристиками кінематичного ланцюга, зокрема передатними відношеннями його елементів, що ускладнює вибір раціональних режимів формування фігур Ліссажу [75, 78, 80].

Зазначена особливість набуває особливого значення за необхідності забезпечення різних кінематичних умов обробки. Зокрема, для формування траєкторій із заданою кількістю перетинів і рівномірністю розташування слідів може виникати потреба у зміні співвідношення частот осьових та колових коливань у досить широкому діапазоні. Проте жорстко пов'язані механічні приводи не завжди забезпечують таку можливість, оскільки регулювання одного параметра супроводжується одночасною зміною іншого. У результаті обмежується діапазон доступних кінематичних режимів і знижується гнучкість налаштування технологічної системи відповідно до конкретних виробничих завдань.

Крім того, додаткового теоретичного обґрунтування потребує працездатність диференціального механізму, використаного в конструкції зазначеного верстата. Зокрема, сумніви викликає можливість забезпечення заданого характеру відносного руху центральних коліс 3 і 4 диференціала, які повинні обертатися з різними кутовими швидкостями за наявності кінематичного замикання через центральні сателіти 1 і 2 (рис. 1.1). За таких умов необхідно враховувати кінематичну сумісність рухів усіх елементів диференціального механізму, оскільки характер їхньої взаємодії визначається геометричними параметрами зубчастих зачеплень, передатними відношеннями та структурою кінематичних зв'язків [82, 92, 93].

Відповідно, встановлення працездатності розглянутого диференціального механізму потребує аналізу рівнянь кінематичних зв'язків між центральними колесами, сателітами та іншими елементами передачі. Особливу увагу необхідно приділити визначенню умов, за яких допускається різниця кутових швидкостей центральних коліс без виникнення кінематичних суперечностей або блокування

руху механізму. Без відповідного розрахункового підтвердження неможливо однозначно оцінити здатність запропонованої конструкції забезпечувати необхідні параметри осциляційних рухів та стабільне функціонування верстатної системи в заданому діапазоні режимів обробки.

Таким чином, проведений аналіз конструктивних і кінематичних особливостей розглянутого обладнання свідчить, що наявність механізмів формування додаткових осциляційних рухів сама по собі не гарантує можливості ефективного керування процесом алмазного хонінгування. Визначальне значення має здатність технологічної системи забезпечувати незалежне або програмно узгоджене регулювання частоти, амплітуди та фазових характеристик осьових і колових коливань із дотриманням необхідної точності їх відтворення.

У зв'язку з цим перспективним напрямом подальшого вдосконалення обладнання для алмазно-абразивної обробки точних отворів є розроблення системи керованої осциляції, яка забезпечуватиме зміну кінематичних параметрів інструмента відповідно до заданих технологічних умов. Така система повинна створювати можливість формування необхідної структури траєкторій різальних зерен, регулювання щільності та рівномірності сітки слідів, а також оперативного коригування режимів обробки. Реалізація зазначених функцій у поєднанні із засобами контролю параметрів технологічного процесу створюватиме передумови для впровадження адаптивного керування алмазним хонінгуванням, спрямованого на стабілізацію процесу знімання матеріалу, підвищення продуктивності та забезпечення необхідних показників точності й якості оброблюваних поверхонь.

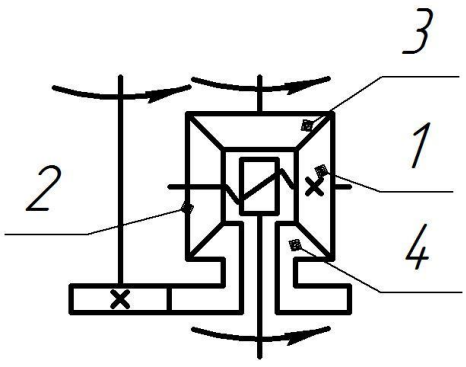


Рис. 1.2 Диференціал хонінгувально-доводочного верстата [75,78,80]

1 – жорсткий сателіт; 2 – вільний сателіт; 3,4 – центральні колеса.

Отже, сформулюємо головні вимоги для керування процесом утворення мікрорельєфу поверхні деталі, що оброблюється:

1. Можливість утворення фігур Ліссажу;
2. Можливість гнучкого змінення частот коливань;

Враховуючи вище наведені вимоги, розглянемо утворення траєкторії руху інструменту на механотроному хонінгувальному продукційному верстаті з адаптивним програмним керуванням.

2. ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Кінематика процесу різання

Аналітичне дослідження кінематики процесу мікрорізання під час алмазного хонінгування отворів доцільно диференціювати на два взаємопов'язані рівні (етапи):

- формування макрогеометрії (макрорельєфу) оброблюваної поверхні — базується на кінематичному методі утворення геометричних ліній формоутворення (твірних та напрямних);

- формування мікрогеометрії (мікрорельєфу) поверхневого шару — визначається кінематикою генерації перехресної координатної сітки слідів від одиничних абразивних зерен.

Макрорельєф (точність геометричної форми) отвору формується в результаті безперервної просторової взаємодії робочого контуру алмазно-абразивного бруска з геометричними лініями формоутворення (ГЛФ) базового отвору — безпосередньо напрямною та твірною. Ключовим технологічним параметром на цьому етапі є інтенсивність кінематичного копіювання (спадковості), тобто ступінь перенесення вихідної геометричної форми бруска, включно з його похибками та поточним експлуатаційним зносом, на відповідну ГЛФ оброблюваної деталі [27].

Для формалізації цього процесу побудовано розрахункову схему контактної взаємодії абразивних брусків традиційної хонінгувальної головки з геометричними лініями формоутворення оброблюваного отвору (рис. 2.1.1).

Аналіз розрахункової схеми (рис. 3.7.1) свідчить, що твірна оброблюваного отвору формується в умовах точкового (дискретного) контакту з робочим контуром алмазного бруска традиційної хонінгувальної головки. Такий характер кінематичної взаємодії фізично виключає можливість безпосереднього перенесення геометричних похибок профілю або локального експлуатаційного зносу інструмента на оброблювану поверхню [27]. Отже, генерація геометричної лінії формоутворення (а саме твірної) під час обробки традиційним хоном реалізується за кінематичним методом слідів [27].

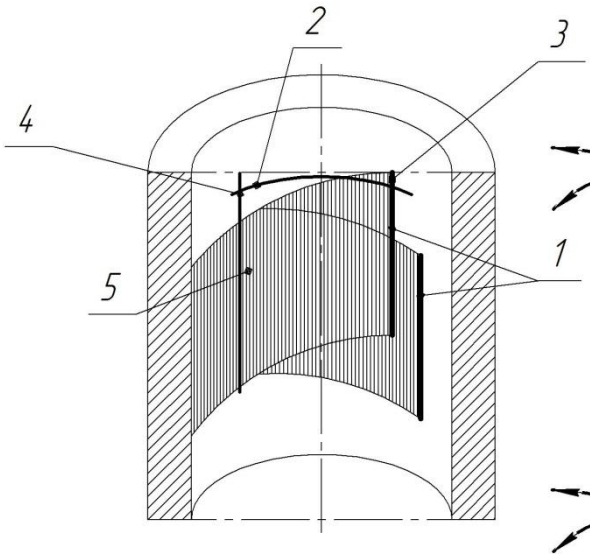


Рис. 2.1.1 Схема взаємодії контуру брусків традиційного хону з геометричними виробними лініями оброблюваного отвору

1 – контур послідовного переміщення бруска в початкове та кінцеве положення; 2 – твірна оброблюваної поверхні; 3 – точка перетину твірної; 4 – напрямна оброблюваної поверхні; 5 – проекції положень контуру брусків.

Натомість напрямна оброблюваного отвору просторово збігається з поздовжнім контуром алмазного бруска, утворюючи лінійний характер контактної взаємодії. Ця трибологічна особливість створює передумови для прямого технологічного спадкування: будь-які початкові макрогеометричні відхилення бруска або його нерівномірний знос гарантовано переносяться на поверхню деталі [27, 135]. Відповідно, утворення другої геометричної лінії формоутворення (напрямної) при застосуванні традиційного інструмента відбувається виключно за методом копіювання [27].

Виявлена специфіка кінематичної взаємодії (зокрема, формування напрямної за методом копіювання) є головним фактором, що лімітує точність традиційного хонінгування. Вона висуває жорсткі підвищені вимоги до початкової розмірної підготовки та правки інструмента, а також зумовлює необхідність безперервного моніторингу та компенсації зносу брусків безпосередньо в процесі різання для запобігання втрати точності форми (циліндричності) отвору.

Для порівняльного аналізу та вирішення проблеми технологічного спадкування похибок, було побудовано розрахункову схему контактної взаємодії робочих брусків досліджуваного ПГХ із геометричними лініями формоутворення базового отвору (рис. 2.1.2).

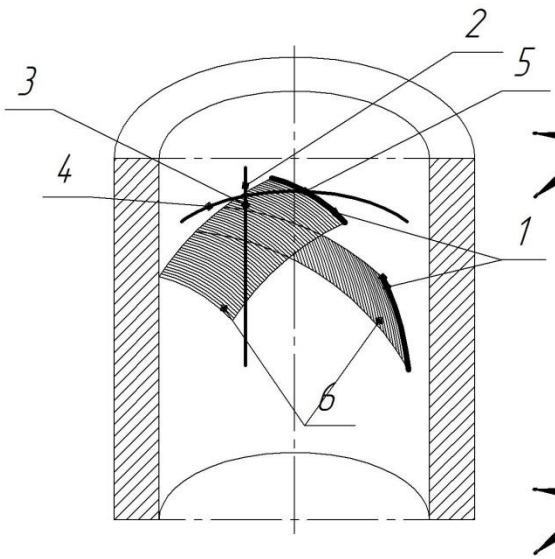


Рис. 2.1.2 Схема взаємодії контуру брусків ПГХ з геометричними виробними лініями оброблюваного отвору

1 – контур послідовного переміщення бруска в початкове та кінцеве положення; 2 – напрямна оброблюваної поверхні; 3 – точка перетину напрямної та контуру; 4 – твірна оброблюваної поверхні; 5 – точка перетину твірної та контуру; 6 – проекції положення контуру.

Аналіз розрахункової кінематичної схеми (рис. 2.1.2) дозволяє встановити, що твірна оброблюваного отвору взаємодіє з контуром алмазного бруска досліджуваного ПГХ виключно точково (дискретно). Такий характер контакту мінімізує технологічне спадкування, допускаючи лише локальне (місцеве) перенесення макрогеометричних відхилень або поточного експлуатаційного зносу інструмента. Отже, генерація першої геометричної лінії формоутворення (твірної) під час обробки отворів за допомогою ПГХ відбувається за кінематичним методом слідів.

Принциповою технологічною відмінністю ПГХ від традиційних конструкцій є те, що напрямна оброблюваного отвору також має точковий (а не лінійний) характер взаємодії з робочим контуром бруска. Це кардинально змінює фізику процесу: суцільне копіювання похибок усувається, а їх перенесення на деталь набуває строго локального характеру. Відповідно, утворення другої геометричної лінії формоутворення (напрямної) також здійснюється за методом слідів.

Реалізація методу слідів для обох базових ГЛФ стала технічно можливою завдяки специфічному просторовому компонуванню ПГХ — розміщенню алмазно-абразивних брусків по гвинтовій лінії (під кутом до поздовжньої осі інструмента). Таке конструктивне рішення просторово «розриває» лінійний контакт, трансформуючи його в точковий рухомий контакт, що радикально зменшує

негативний вплив похибок самого ПГХ на кінцевий макрорельєф (точність геометричної форми) оброблюваного отвору.

Проте слід зауважити, що кінематична похибка, індукована нерівномірним зносом бруска, все ж частково (фрагментарно) транслюється на ГЛФ у зонах локального контакту (рис. 2.1.3). Просторовий розмір (довжина) ділянки копіювання цієї похибки на геометричну лінію формоутворення розраховується за такою аналітичною залежністю:

$$l_k = l_b * \cos\varphi \qquad (2.1.1)$$

де: l_k – довжина похибки копіювання;
l_b – довжина бруска;
φ – кут нахилу бруска.

Відхилення контуру від номінального положення визначається по формулі:

$$h_{зк} = h_з * \sin\varphi \qquad (2.1.2)$$

де: $h_{зк}$ – відхилення контуру від номінального положення;
$h_з$ – похибка зносу .

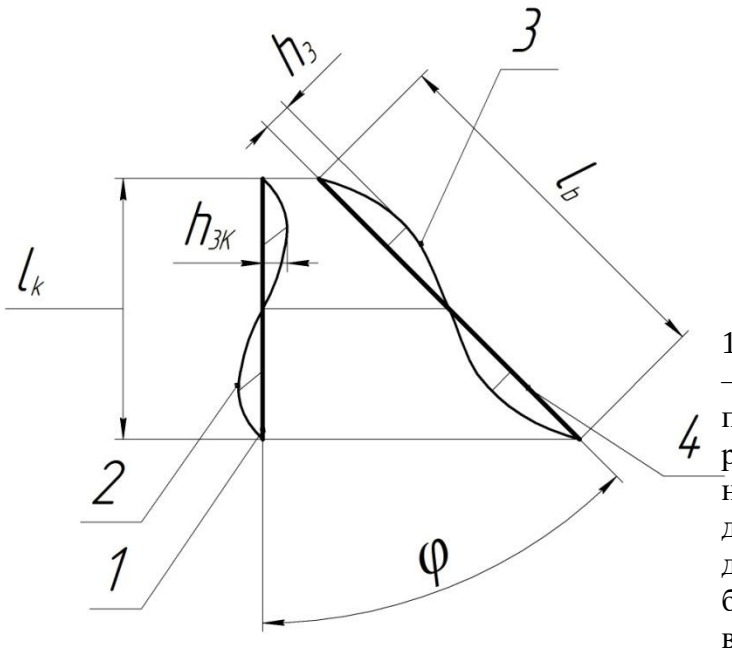


Рис. 2.1.3 Схема утворення макрорельєфу оброблюваного отвору при взаємодії ПГХ з виробними геометричними лініям

1 – ГВЛ, напрямна номінальна; 2 – копія контуру зношеної поверхні бруска; 3 – контур реального зносу бруска; 4 – номінальний контур бруска; l_k – довжина похибки копіювання; l_b – довжина бруска; φ – кут нахилу бруска; $h_{зк}$ – відхилення контуру від номінального положення; $h_з$ – похибка зносу.

Мікрорельєф (мікрогеометрія) оброблюваної поверхні формується внаслідок просторового накладання траєкторій руху одиничних абразивних зерен, які переміщуються за заданими векторами лінійних швидкостей (різання та осьової подачі). Якість утвореного мікрорельєфу безпосередньо визначається щільністю

(густотою) точок перетину цих траєкторій, що формують перехресну координатну сітку слідів.

На рис. 2.1.4 наведено порівняльні розрахунково-графічні схеми формування мікрорельєфу при застосуванні різних конструкцій хонінгувальних головок.

Кінематична схема обробки традиційним хоном (рис. 2.1.4, а) характеризується тим, що сукупна траєкторія руху одиничних зерен генерує циліндричну поверхню, яка чітко обмежена класичними геометричними лініями формоутворення (ГЛФ) — коловими напрямними та лінійними твірними. Оскільки поздовжні контури традиційного інструмента взаємодіють із напрямними оброблюваної поверхні за методом копіювання, поточний експлуатаційний знос брусків безпосередньо переноситься на деталь, спотворюючи геометрію базового отвору.

Натомість схема формування мікрорельєфу за допомогою досліджуваного ПГХ (рис. 2.1.4, б) відрізняється тим, що траєкторії руху одиничних зерен утворюють циліндричну поверхню, обмежену ГЛФ виключно у вигляді твірних. У цьому випадку контактна взаємодія здійснюється за кінематичним методом слідів [27], завдяки чому фактичний знос абразивних елементів значно меншою мірою впливає на вихідну макрогеометрію оброблюваної поверхні.

Аналіз наведених схем дозволяє встановити, що параметри координатної сітки слідів суттєво залежать від конструктивного виконання інструмента. Після обробки традиційним хоном (рис. 2.1.4, а) утворюється сітка зі значно більшим кроком між суміжними траєкторіями руху зерен порівняно з мікрорельєфом, згенерованим інструментом ПГХ (рис. 2.1.4, б). Ця різниця пояснюється тим, що густота сітки слідів при традиційному хонінгуванні є функцією виключно кінематичних режимів верстата і визначається кутом схрещування векторів швидкості головного обертального та зворотно-поступального рухів.

Своєю чергою, густота мікрорельєфної сітки при обробці за допомогою ПГХ є комплексною функцією: вона визначається не лише кінематичним кутом схрещування робочих швидкостей, але й геометричним параметром інструмента —

кутом просторового розміщення алмазно-абразивного бруска (кутом нахилу гвинтової лінії).

Для кількісного визначення параметрів густоти сітки слідів, що формується інструментом ПГХ, розроблено відповідну розрахунково-кінематичну схему (рис. 2.1.5).

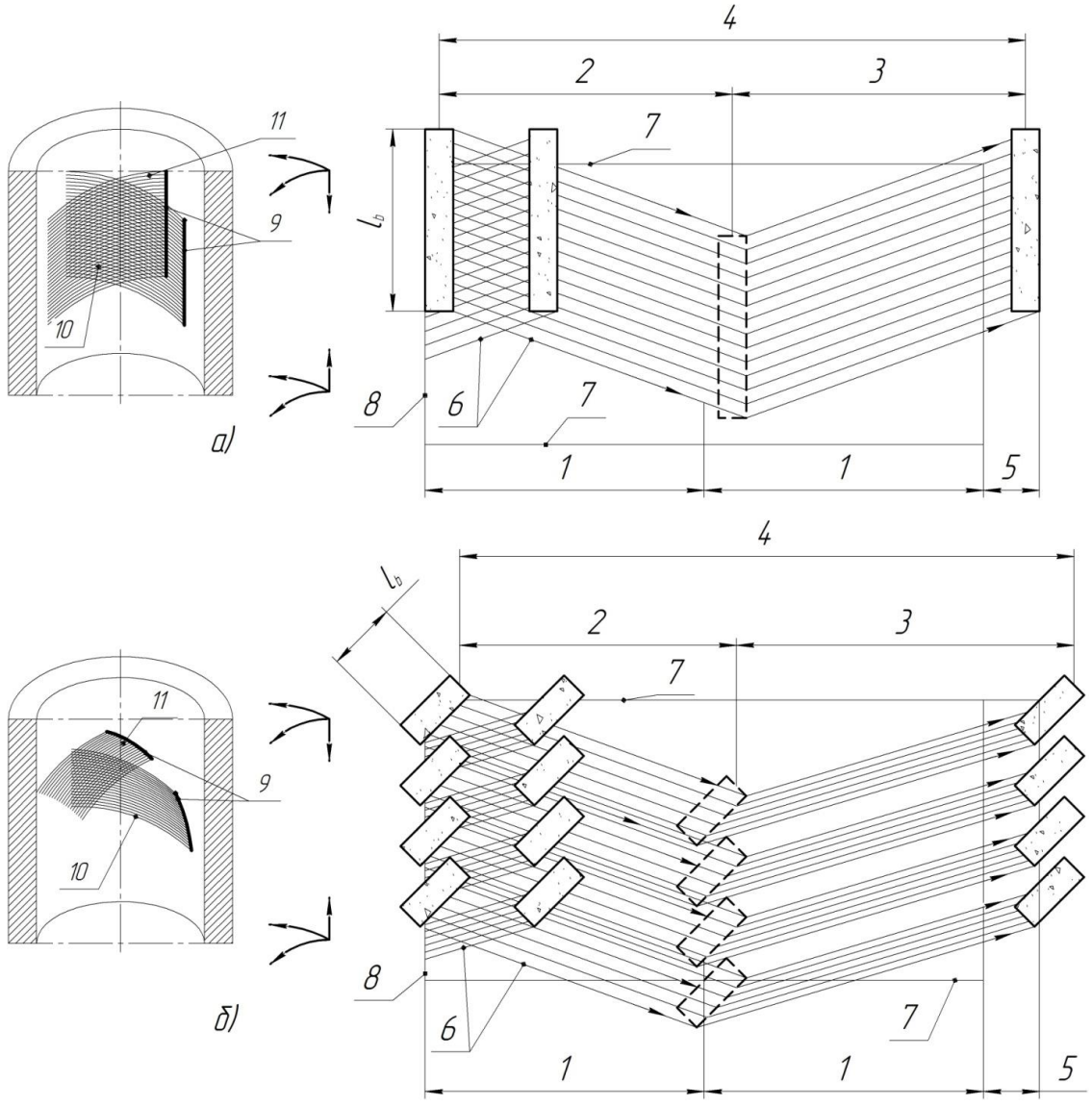


Рис. 2.1.4 Схема утворення мікрорельєфу оброблюваної поверхні

а) розвертка поверхні отвору при обробці хоном традиційної конструкції; б) розвертка поверхні отвору при обробці ПГХ на чорновому проході.
1 – відстань за один обертальний рух; 2 – відстань пройдена за поступальний рух; 3 – відстань пройдена за зворотній рух; 4 – відстань пройдена за зворотно-поступальний рух; 5 – додатковий шлях повороту головки за час закінчення подвійного ходу; 6 – траєкторія руху окремих зерен; 7 – геометрична виробна лінія у вигляді твірної; 8 – геометрична виробна лінія у вигляді напрямної; 9 – контур брусків; 10 – траєкторія руху одиничного зерна при переміщені з низу до верху; 11 – траєкторія руху одичного зерна при переміщені з верху до низу; l_b – довжина бруска.

Для підтвердження даного припущення були отримані математична модель, яка визначає крок сітки слідів при зворотному русі:

$$l_s = l_b * \sin\gamma \quad (2.1.3)$$

де: l_b – довжина бруска (крок сітки слідів при поступальному русі);
γ – кут нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска при зворотному русі.

В результаті аналізу розрахункової схеми (рис.2.1.5) визначено, що крок сітки стає двічі менше при зміні напрямку руху, що обумовлюється кутом нахилу алмазно-абразивного бруска .

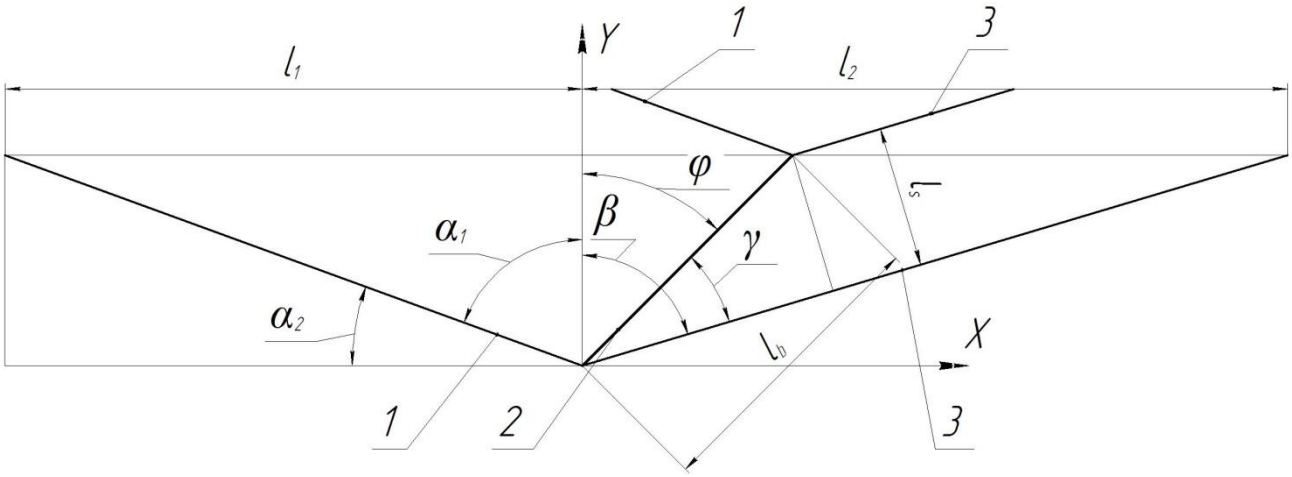


Рис. 2.1.5 Розрахункова схема утворення мікрорельєфу оброблюваної поверхні ПГХ

1 – траєкторія руху зерна при поступальному русі; 2 – алмазно-абразивний брусок; 3 – траєкторія руху зерна при зворотному русі.
l_b – довжина бруска (крок сітки слідів при поступальному русі); l_1 – пройдений шлях при поступальному русі; l_2 – пройдений шлях при зворотному русі; l_s – крок сітки слідів при зворотному русі; α_1 – кут нахилу траєкторії зерна відносно вісі Y при поступальному русі; α_2 – кут нахилу зерна відносно вісі X при поступальному русі; β – кут нахилу зерна відносно вісі Y при зворотному русі; φ – кут нахилу алмазно-абразивного бруска; γ – кут нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска при зворотному русі.

З отриманої математичної моделі 2.1.3 визначимо кут γ нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска при зворотному русі:

$$\gamma = \beta - \varphi \quad (2.1.4)$$

де: β – кут нахилу зерна відносно вісі Y при зворотному русі;
φ – кут нахилу алмазно-абразивного бруска;

Необхідно знайти кут β нахилу зерна відносно вісі Y при зворотному русі:

$$\beta = \frac{180 * l_2}{\sin\alpha_1 * l_1 * \pi} \quad (2.1.5)$$

де: l_1 – пройдений шлях при поступальному русі;
l_2 – пройдений шлях при зворотному русі;
α_1 – кут нахилу траєкторії зерна відносно вісі Y при поступальному русі;

Кут α_1 нахилу траєкторії зерна відносно вісі Y при поступальному русі буде визначатися за наступним рівнянням [10]:

$$\alpha_1 = 90 - 0.5arctg\frac{v_p}{v_o} \quad (2.1.6)$$

де: v_p – швидкість зворотно-поступального руху;
v_o – швидкість обертального руху.

Отримане значення кута α_1 нахилу траєкторії зерна відносно вісі Y при поступальному русі підставимо в рівняння 2.1.3

$$\beta = \frac{180*l_2}{\pi*l_1*\sin\left(90-0.5arctg\frac{v_p}{v_o}\right)} \quad (2.1.7)$$

Отримані значення кутів підставимо до рівняння 2.1.3:

$$l_s = l_b * sin\left(\frac{l_2*180}{\sin\left(90-0.5arctg\frac{v_p}{v_o}\right)*\pi*l_1} - \varphi\right) \quad (2.1.8)$$

де: l_2 – пройдений шлях при зворотному русі;
l_s – крок сітки слідів при зворотному русі;
v_p – швидкість зворотно-поступального руху;
v_o – швидкість обертального руху;
φ – кут нахилу алмазно-абразивного бруска.

Аналітичне моделювання доводить, що цілеспрямована зміна кута просторового нахилу алмазно-абразивного бруска відносно осі інструмента забезпечує можливість суттєво збільшити густоту координатної сітки в утвореному мікрорельєфі. Таке конструктивне рішення не лише інтенсифікує процес зняття мікроприпуску (підвищує продуктивність обробки), але й додатково нівелює негативний вплив поточного експлуатаційного зносу інструмента на кінцеву макрогеометрію оброблюваного отвору.

Для комплексного розуміння робочого циклу досліджуваного інструмента подальший аналіз присвячено дослідженню кінематики процесу хонінгування отворів за допомогою ПГХ на етапах чорнових (попередніх) та чистових (фінішних) проходів (рис. 2.1.6).

Специфіка технологічного циклу ПГХ полягає в тому, що під час виконання чорнових проходів, які характеризуються інтенсивним зняттям основного

припуску та необхідністю активного виправлення початкових похибок форми отвору, в роботу вступають переважно два формоутворювальні бруски. Це забезпечує оптимальний перерозподіл зусиль різання та стабілізацію осі інструмента на початковому етапі обробки.

Формування макрорельєфу під час традиційного хонінгування, за якого поздовжній контур бруска просторово збігається з напрямною як геометричною лінією формоутворення (ГЛФ) отвору, неминуче супроводжується повним перенесенням похибок інструмента (зумовлених його нерівномірним зносом) на деталь. Цей процес реалізується виключно за кінематичним методом копіювання.

Формування макрорельєфу інструментом ПГХ, просторова архітектура якого передбачає розміщення контуру бруска під кутом до напрямної (по гвинтовій лінії), кардинально трансформує контактну взаємодію. Це зумовлює фрагментарне (локальне) перенесення похибок інструмента лише в окремих точках напрямної лінії, що відповідає обробці за методом часткового копіювання з елементами методу слідів.

В обох досліджених випадках (п. 1 та п. 2) друга ГЛФ оброблюваної деталі — твірна — взаємодіє з робочим контуром бруска дискретно, виключно в окремих точках контактної зони. Відповідно, генерація твірної під час хонінгування завжди відбувається за кінематичним методом слідів.

На етапі формування мікрорельєфу (мікрогеометрії) просторове розміщення абразивного бруска під кутом до напрямної базового отвору генерує додаткову кінематичну складову. Це дозволяє кратно збільшити густоту координатної сітки слідів (кількість точок перетину траєкторій одиничних зерен), що структурно забезпечує інтенсивне зниження висотних параметрів шорсткості оброблюваної поверхні.

2.2. Кінематика процесу різання при хонінгуванні отворів хоном зі змінною геометрією розташування брусків

На підставі проведеного кінематичного та функціонального аналізу встановлено технологічну необхідність цілеспрямованого керування топографією

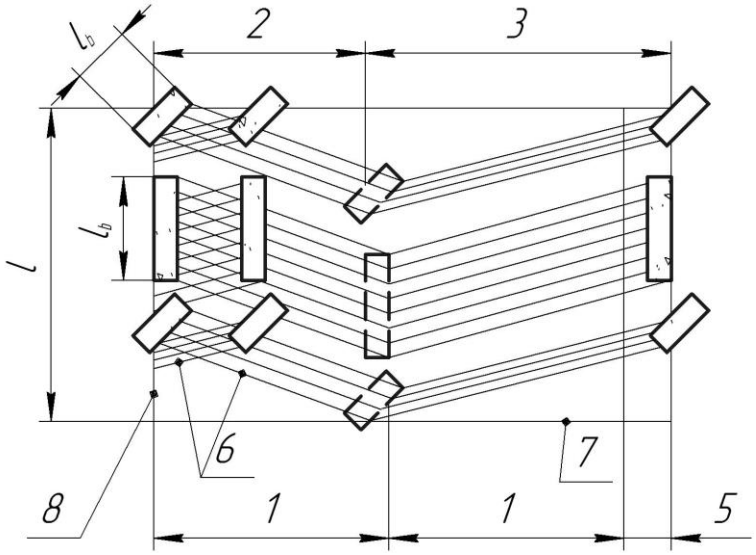
оброблюваної поверхні. Пріоритетним завданням є генерація регулярного мікрорельєфу з оптимізованою сіткою слідів мікрорізання, що характеризується максимальною щільністю перетинів і мінімальним кроком між одиничними рисками. Формування такої структури безпосередньо впливає на мастилоутримувальну здатність, триботехнічні властивості та зносостійкість спряжених пар тертя. Водночас обов'язковому контролю підлягають інтенсивність нерівномірного радіального спрацювання алмазно-абразивних брусків уздовж твірної отвору та ризик успадкування й копіювання вихідних геометричних похибок деталі (овальності, конусоподібності, корсетності) на фінішну поверхню.

Для комплексної мінімізації зазначених деструктивних явищ і вирішення оптимізаційної задачі запропоновано застосування конструкції кульково-клинової хонінгувальної головки [4, 5] з адаптивною або регульованою геометрією просторового розташування робочих алмазно-абразивних брусків (рис. 2.1.1). Механізм радіального розтискання на базі кульково-клинових передач забезпечує підвищену жорсткість кінематичного ланцюга, високу чутливість системи дозованого силового навантаження та рівномірність питомого тиску по довжині бруска.

Механізм функціонування розробленого інструменту та закономірності перекриття слідів обробки ілюструє розрахункова схема утворення мікрорельєфу деталі, наведена на рис. 2.2.2.



Рис. 2.2.1 – Кулько-клиновий хон зі змінною геометрією бруска



1 – відстань за один обертальний рух; 2 – відстань пройдена за поступальний рух; 3 – відстань пройдена за зворотній рух; 4 – відстань пройдена за зворотно-поступальний рух; 5 – додатковий шлях повороту головки за час закінчення подвійного ходу; 6 – траєкторія руху окремих зерен; 7 – геометрична виробна лінія у вигляді твірної; 8 – геометрична виробна лінія у вигляді напрямної; lb – довжина бруска.

Рис. 2.2.2 – Схема утворення мікрорельєфу оброблюваної поверхні

Аналіз розрахункової схеми контакту (рис. 2.1.2) показує, що периметральні алмазно-абразивні бруски, орієнтовані під кутом $\gamma = 45°$ до твірної циліндричного отвору, перебувають в умовах дискретно-точкового кінематичного спряження з

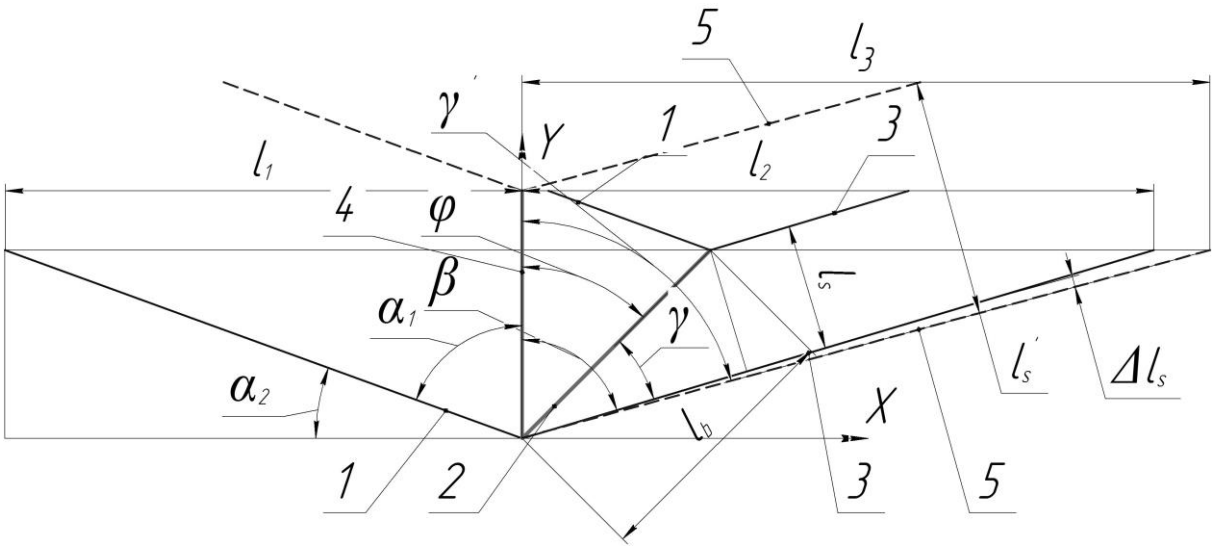
оброблюваною поверхнею. За такого просторового розташування зона миттєвого силового контакту локалізується, що практично виключає лінійне перенесення хвилястості, локального макрозносу робочого профілю бруска або початкових макрогеометричних похибок заготовки вздовж лінії обробки. Таким чином, для вказаної групи брусків формування первинної виробної лінії твірної циліндра — реалізується за методом сліду (кінематичного формоутворення), за якого геометрична лінія утворюється як огинаюча траєкторій послідовних просторових положень дискретно контактуючих зерен. Аналогічний механізм реалізується і при синтезі спряженої виробної лінії — напрямної оброблюваного отвору (кола в поперечному перерізі). Для брусків із кутом орієнтації 45° контакт із дугою кола також носить точковий характер, нівелюючи радіальне копіювання спотворень форми інструмента на деталь. У результаті формоутворення напрямної за методом сліду забезпечує демпфування й ефективне згладжування негативного впливу ортогонально орієнтованих брусків ($\gamma = 90°$). Останні, працюючи за принципом дотичного копіювання профілю, є схильними до копіювання локальних відхилень форми (конусоподібності, бочкоподібності) та смугового нерівномірного зносу вздовж робочої зони.

Комбінування схем сліду та копіювання в єдиному інструментальному блоці забезпечує компенсацію похибок макрогеометрії та стабілізацію форми отвору. Параметрична оптимізація топографії та мікрогеометрії сформованої поверхні досягається шляхом просторово-часової інтерференції траєкторій мікрорізання одиничних абразивних зерен, вектор миттєвої швидкості яких формується як векторна сума швидкостей головного обертального руху, зворотно-поступальної подачі та накладених осциляцій. Ключовим критерієм якості поверхневого шару в даному разі виступає ступінь щільності вузлів координатної сітки слідів (точок перетину мікротраєкторій).

Схематизація, наведена на рис. 2.2.2, ілюструє диференціацію кроків сітки слідів, що залишаються контактними зонами брусків із різними кутовими азимутами. За рахунок просторової переорієнтації робочих поверхонь інструменту щільність взаємного перекриття рисок мікрорізання суттєво зростає порівняно з

традиційним моноорієнтованим розташуванням брусків, забезпечуючи високу ізотропність мікропрофілю та формування оптимізованих мастилоутримувальних мікроканалів.

Для аналітичної оцінки та кількісного розрахунку інтегральної щільності координатної сітки слідів, генерованої багатовузловою алмазно-абразивною головкою з полівекторним розташуванням брусків, побудовано розрахунково-кінематичну модель, представлену на рис. 2.1.3.



1 – траєкторія руху зерна при поступальному русі; 2 – алмазно-абразивний брусок с кутом нахилу 45°; 3 – траєкторія руху зерна при зворотному русі бруска с кутом нахилу 45°; 3 – алмазно-абразивний брусок з кутом нахилу 90°; 3 – траєкторія руху зерна при зворотному русі бруска с кутом нахилу 90°; l_b – довжина бруска (крок сітки слідів при поступальному русі); l_1 – пройдений шлях при поступальному русі; l_2 – пройдений шлях при зворотному русі; l_s – крок сітки слідів при зворотному русі бруска с кутом нахилу 45°; l'_s – крок сітки слідів при зворотному русі бруска с кутом нахилу 90°; Δl_s – різниця кроків брусків з різним кутом нахилу α_1 – кут нахилу траєкторії зерна відносно вісі Y при поступальному русі; α_2 – кут нахилу зерна відносно вісі X при поступальному русі; β – кут нахилу зерна відносно вісі Y при зворотному русі; φ – кут нахилу алмазно-абразивного бруска; γ – кут нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска с кутом нахилу 45° при зворотному русі; γ – кут нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска с кутом нахилу 90° при зворотному русі.

Рис 2.2.3 – Розрахункова схема утворення мікрорельєфу оброблюваної поверхні

Аналіз наведеної розрахункової схеми (рис. 3) свідчить, що при ортогональному розташуванні алмазно-абразивних брусків (під кутом 90° до осі оброблюваного отвору) топологія та інтегральна щільність формованої сітки слідів мікрорізання детермінуються кутом перехрещення траєкторій одиничних зерен. Значення цього кута є результатом векторного складання двох базових кінематичних компонент процесу хонінгування: колової швидкості головного обертального руху та швидкості зворотно-поступальної осьової подачі інструмента. Математична модель, що описує функціональний взаємозв'язок між

зазначеними швидкісними параметрами та кутом схрещення траєкторій (який безпосередньо визначає густину мікрорельєфу), має такий вигляд:

$$l_s^{''} = l_b \cdot \sin\left(90 - 0.5 arctg \frac{v_p}{v_o}\right) \pi l_1, \qquad (2.2.1)$$

де lb – довжина бруска (крок сітки слідів при поступальному русі);

vp – швидкість зворотно-поступального руху;

vo – швидкість обертального руху;

В свою чергу, густина сітки слідів для алмазно-абразивних брусків, розміщених під кутом 45°, буде визначатися за наступною формулою [1]:

$$l_s = l_b * \sin\left(\frac{l_2 * 180}{\sin\left(90 - 0.5 arctg \frac{v_p}{v_o}\right) * \pi l_1} - \varphi\right), \qquad (2.2.2)$$

де: γ – кут нахилу траєкторії зерна відносно алмазно-абразивного бруска при зворотному русі.

l2 – пройдений шлях при зворотному русі;

ls – крок сітки слідів при зворотному русі;

l1 – пройдений шлях при поступальному русі;

φ – кут нахилу алмазно-абразивного бруска.

Підсумовуючи наведене, результуюча щільність координатної сітки мікрорельєфу за умови комбінованої просторової орієнтації інструментальних елементів формується як результат кінематичної суперпозиції. Відповідно до розробленої розрахункової моделі, інтегральний показник густини сітки слідів оцінюється диференціально — як функціональна різниця між щільністю мікротраєкторій, згенерованих ортогонально розташованими брусками (γ= 90°), та щільністю слідів від діагонально орієнтованих брусків (γ= 45°).Математично аналітична залежність для визначення цієї диференціальної густини сітки мікрорізання описується таким рівнянням:

$$\Delta l_s = l_s^{''} - l_s, \qquad (2.2.3)$$

В отримане рівняння (3) підставимо значення густин сітки слідів брусків розташованих під кутом 90° (1) та кутом 45° (2):

$$\Delta l_s = l_b \left(\sin\left(90 - 0.5 arctg \frac{v_p}{v_o}\right) \pi d_1 - \sin\left(\frac{l_2 * 180}{\sin\left(90 - 0.5 arctg \frac{v_p}{v_o}\right) * \pi d_1} - \varphi \right) \right), \quad (2.2.4)$$

Синтезована математична модель надає аналітичний інструментарій для кількісної оцінки густини координатної сітки слідів за умов комбінованої просторової орієнтації робочих елементів, а саме: центральних брусків, розташованих ортогонально (γ= 90°), та периферійних — під кутом γ= 45°. Як показали результати теоретичних і експериментальних досліджень, саме така біангулярна (двокутова) архітектура інструмента є геометрично та кінематично оптимальною для цілеспрямованого керування параметрами як мікро-, так і макрогеометрії оброблюваного отвору.

За результатами проведених досліджень доведено комплексний позитивний ефект від впровадження інструментів зі змінною геометрією розташування алмазно-абразивних брусків: Інтенсифікація процесу та покращення мікрогеометрії: Зміна кутів нахилу генерує багаторазове перехрещування векторів різання, що суттєво збільшує кількість вузлових точок перетину мікротраєкторій. Формування такої надщільної координатної сітки слідів забезпечує інтенсивне зрізання мікронерівностей, стабільне зниження висотних параметрів шорсткості поверхні, а також загальне підвищення продуктивності фінішної обробки за рахунок раціонального розподілу навантаження між зернами.

Стабілізація макрогеометрії (макрорельєфу): З точки зору формоутворення, застосування діагонально орієнтованих брусків ініціює процес обробки за принципом кінематичного сліду, а не дотичного копіювання. Це має вирішальне технологічне значення, оскільки метод сліду ефективно блокує технологічну спадковість: він мінімізує перенесення вихідних геометричних похибок хонінгувальної головки та нівелює вплив поточного нерівномірного зносу брусків на кінцеву точність форми оброблюваного отвору (циліндричність, круглість). Отже, просторове комбінування кутів нахилу алмазно-абразивних брусків дозволяє комплексно вирішити оптимізаційну задачу: одночасно підвищити продуктивність мікрорізання, покращити якість поверхневого шару (мікрорельєф) та забезпечити

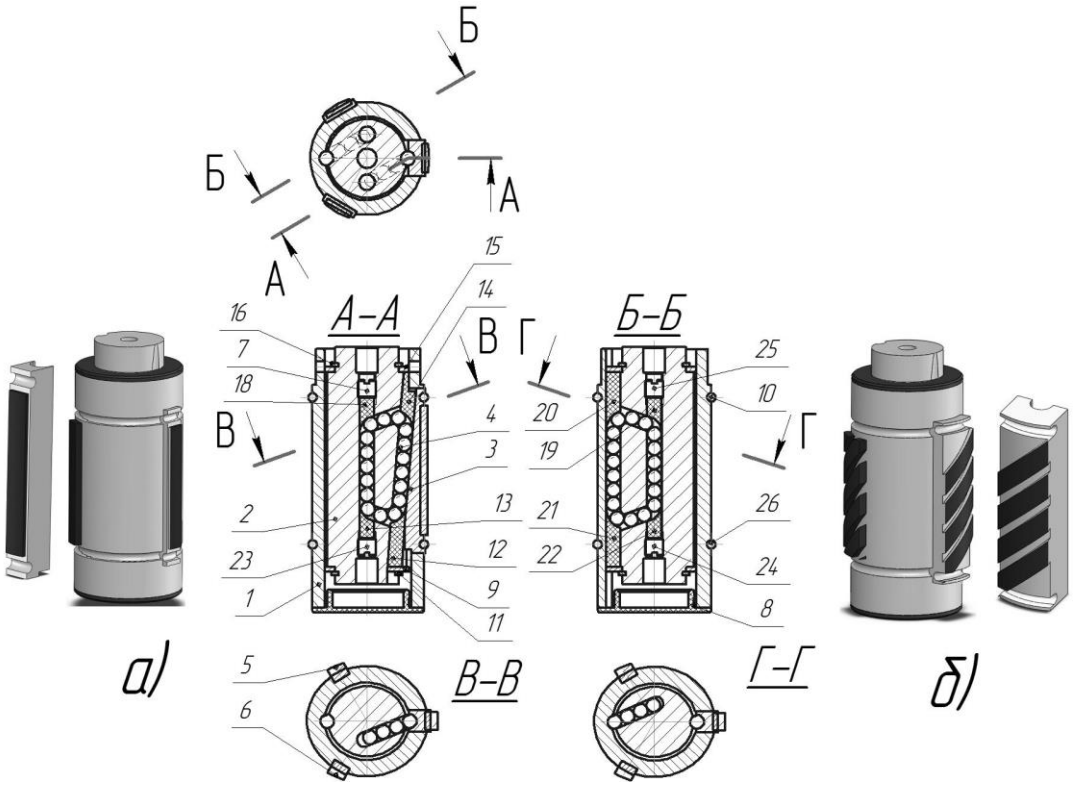
високу точність формоутворення (макрорельєф) в умовах інтенсивного зносу інструмента.

2.3. Динамічний аналіз кульково-клинового хону в зоні малих переміщень

Конструктивна схема досліджуваної кульково-клинової хонінгувальної головки (рис. 2.3.1) базується на асиметричному принципі радіального розтискання робочих елементів. Базовою деталлю інструмента є циліндричний корпус 1, на периферійній поверхні якого еквідистантно (з кутовим кроком 120°) інтегровано три алмазно-абразивні бруски.

Специфіка запропонованого інструментального оснащення полягає у функціональній диференціації абразивних елементів. Два алмазно-абразивні бруски (поз. 5 і 6) виконують роль жорстких напрямних баз: вони нерухомо зафіксовані у глухих фрезерованих пазах прямокутного профілю, розташованих на зовнішній твірній корпусу. Третій алмазно-абразивний брусок (поз. 3) виступає активним формоутворювальним елементом, змонтованим у корпусі з можливістю поступального переміщення в радіальному напрямку.

Радіальна подача та створення необхідного робочого натягу (тиску різання) забезпечуються кінематичною взаємодією рухомого бруска 3 із центральним розтискним клином 2, який розташований співвісно до головної поздовжньої осі корпусу 1. Під час осьового переміщення розтискного клина його геометричний профіль трансформує поздовжнє силове зусилля приводу верстата в кероване радіальне висування бруска 3, що гарантує дозоване врізання абразивних зерен в оброблювану поверхню та ефективну компенсацію поточного розмірного зносу інструмента [9, 10, 11].



1 – корпус; 2 – розтискний клин; 3 – рухомий алмазно-абразивний брусок; 4,19 – потік кульок; 5,6 – нерухомий алмазно-абразивний брусок; 7,23,24,25 – фіксуючий гвинт; 8 – кришка нижня; 9,15 – кільце ущільнююче; 10,26 – пружина кільцева; 11,16 – кільце стопорне; 12,13,21,22 – опора нижня; 14,18 ,19,20 – опора верхня;

Рисунок 2.3.1 – Кульково-клиновий хон
а) з прямим розміщенням брусків; б) з гвинтовим розміщенням брусків

Конструктивною особливістю центрального розтискного клина 2 є наявність двох функціональних площин: похилої (робочої) поверхні, що утворює заданий кут із поздовжньою віссю інструмента та безпосередньо взаємодіє з ідентичним похилим профілем рухомого алмазно-абразивного бруска 3, і тильної опорної поверхні, яка паралельна до осі обертання. Взаємодія між цією опорною поверхнею та корпусом здійснюється не безпосередньо, а через проміжний масив тіл кочення (кульок), що формують беззазорну кульково-клинову передачу. Інтеграція тіл кочення дозволяє замінити тертя ковзання на тертя кочення, що суттєво підвищує механічний ККД вузла, усуває явище заклинювання та забезпечує високу чутливість інструмента до керівних сигналів радіальної подачі.

Для гарантованого збереження безвідривного кінематичного контакту між спряженими поверхнями та створення необхідного попереднього натягу (повернення бруска у вихідне положення при знятті навантаження) застосовано

пружні елементи — кільцеві пружини 10 і 26. Вони базуються у спеціальних кільцевих проточках на зовнішній циліндричній поверхні корпусу, забезпечуючи постійне радіальне підтискання рухомого бруска до центру головки. Захист прецизійних внутрішніх порожнин і кінематичних пар механізму від абразивного шламу та відпрацьованої мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) реалізується за допомогою глухої торцевої кришки 8.

Робочий цикл формоутворення (радіального розтискання) кульково-клинового хона функціонує за таким кінематичним алгоритмом: поступальне переміщення розтискного клина 2 в осьовому напрямку ініціює відповідне перекочування потоку кульок уздовж опорної поверхні. Внаслідок розклинювальної дії похилої площини, осьове зусилля приводу трансформується у строго ортогональне (радіальне) висування рухомого алмазно-абразивного бруска 3. Зазначена кінематична трансформація забезпечує кероване збільшення ефективного робочого діаметра інструмента та створення необхідного технологічного натягу в зоні різання.

Як об'єкт подальшого аналізу розглядається виконавча (кінцева) ланка хонінгувального інструмента, реалізована на базі кульково-клинової кінематичної пари (рис. 2.3.2). На наведеній розрахунковій схемі формалізовано просторовий розподіл силових векторів, що діють у контактній зоні механізму під час робочого циклу. Додатково представлено трибологічну характеристику вузла — графічну залежність сили тертя від швидкості відносного переміщення спряжених ланок та мінливого коефіцієнта тертя (нелінійна характеристика тертя).

Для комплексного дослідження динамічних властивостей виконавчого механізму виникає необхідність розроблення його математичної моделі у вигляді операторної передавальної функції W(s). Однак синтез адекватної динамічної моделі вимагає обов'язкового попереднього визначення статичних характеристик системи. З огляду на це, алгоритм математичного моделювання розпочинається зі складання базового рівняння кінематичного зв'язку (ідеалізованої кінематичної передавальної функції) виконавчої ланки, яке описує закон перетворення руху без урахування масо-інерційних та дисипативних складових.

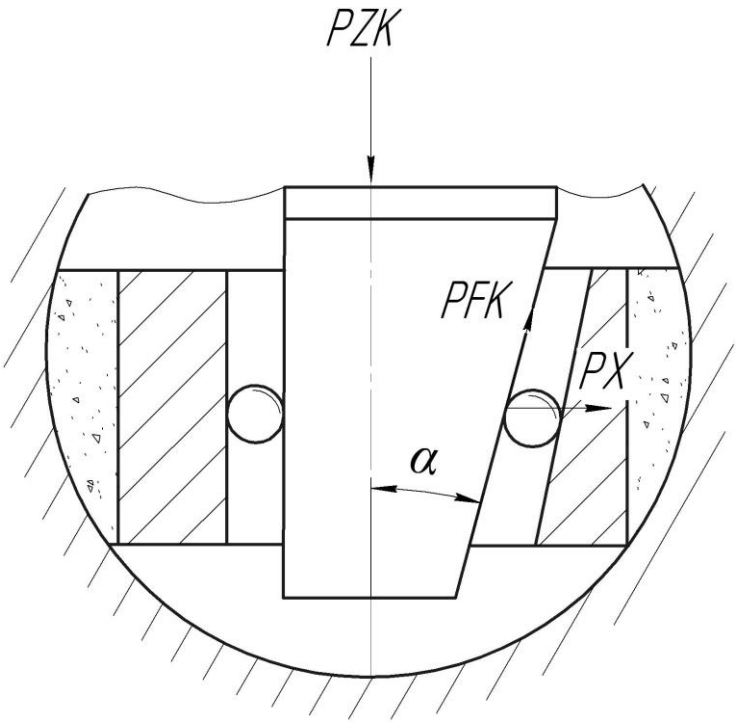


Рис.2.3.2 Кульково-клиновий хон

$$i = \frac{S_o}{S_r} = tga \qquad (2.3.1)$$

де: s_o – переміщення клина в повздовжньому напрямку;

s_r – радіальне переміщення брусків;

α – кут підйому клина.

Складемо рівняння рівноваги кульково- клинової передачі в статиці, але для цього визначимо значення радіальної сили та сил різання.

$$PXK = \frac{PZK}{tg(\alpha+\varphi_{пр})+arctg\frac{d}{D}*tg\alpha} \qquad (2.3.2)$$

де: PZK – осьова сила прикладена до клина;

ψ – кут тертя клинової кінематичної пари;

Для роботи клинової кінематичної пари необхідно визначити значення радіальної сили різання:

$$PxP = f_x U_\Sigma P_k \qquad (2.3.3)$$

де: U_Σ – сумарна площа поверхонь різання;

$\rho_к$ – контактний тиск в зоні різання (визначається за таблицею 42. [13]), МПа;

$f_х$ – коефіцієнт тертя – шкрябання в радіальному напрямку (визначається за таблицею 3.8. [1]).

Згідно з рівняння значення радіальної сили та сили різання визначимо рівняння руху клинової ланки:

$$J = PXP - PxK - PFK \qquad (2.3.4)$$

де: J – сила інерції клинової кінематичної пари;

PXP – радіальна сила різання;

PXK – радіальна сила клинової кінематичної пари;

PFK – сила тертя клинової кінематичної пари;

Визначимо рівняння сили інерції клинової кінематичної пари:

$$J = m_k \frac{d^2 S_K}{dt^2} \qquad (2.3.5)$$

де: $\frac{d^2 S_K}{dt^2}$ – лінійне прискорення (друга похідна від переміщення);

m_k – маса рухомих частин клинової кінематичної пари;

Аналіз трибологічної кривої, наведеної на рис. 4.7, вказує на те, що еволюція коефіцієнта тертя на етапі перехідного процесу (при рушанні з місця та розгоні) описується суворо нелінійним законом, якому притаманна спадна ділянка переходу від максимального тертя спокою до меншого тертя руху.

Оскільки наявність такої суттєвої нелінійності ускладнює розв'язання диференціальних рівнянь руху та синтез моделі приводу, для подальшого аналізу динаміки системи виникає об'єктивна необхідність здійснити математичну лінеаризацію цієї трибологічної характеристики. Процедура лінеаризації нелінійної функції (зокрема, методом розкладання в ряд Тейлора в околі номінальної робочої точки) виконується із застосуванням класичного математичного апарату та методик теорії автоматичного керування (ТАК) [38, 39, 40, 42].

Після лінеаризації наведеної залежності зміни сил тертя, отримано наступне рівняння [42]:

$$PFK = \frac{ds_k}{dt}\frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha \qquad (2.3.6)$$

де: $\frac{ds_k}{dt}$ – швидкість переміщення (перша похідна від переміщення);

μ_k – коефіцієнт тертя клинової кінематичної пари $\mu_k = \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha$

Отже отримані значення сили підставимо у рівняння 1.4.

$$m_k\frac{d^2s_k}{dt^2} = f_x U_\Sigma P_k - \frac{PZK}{tga} - \frac{ds}{dt}\frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha \qquad (2.3.7)$$

Для отримання передавальної функції клинової кінематичної пари, яка відповідає рівнянню (1.7) необхідно визначити початкові умови для PZK(0), $s_k(0)$, s_k'(0) та знайти перетворення за Лапласом:

$$m_k\left(\frac{d^2S_k}{dt^2}\right) = m_k p^2 s_k - m_k p s_k(+0) - m_k s_k(0) \qquad (2.3.8)$$

$$\frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\left(\frac{ds_k}{dt}\right) = \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\,ps_k - \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\,s_k(+0) \qquad (2.3.9)$$

Отримані рівняння, які перетворені за Лапласом підставимо до рівняння (2.3.7).

$$m_k p^2 s_k - m_k p s_k(0) - m_k s_k(0) = f_x U_\Sigma P_k - \frac{PZK}{tga} - \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\,ps_k + \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\,s_k(0) \qquad (2.3.10)$$

Всі вихідні параметри перенесемо в ліву частину рівняння (2.3.10)

$$\left(m_k p^2 + \frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha\,p\right)s_k - f_x U_\Sigma P_k = -\frac{PZK}{tga} + \left(\frac{tg}{arctgD}\,tg\alpha + m_k p\right)s_k(0) + m_k s_k(0) \qquad (4.1.2.11)$$

Виходячи з розробленої математичної моделі, клинова кінематична пара розглядається як багатовимірна динамічна система, що характеризується одним керівним вхідним впливом (осьовим зусиллям PZK) та двома вихідними координатами лінійним переміщенням s_k та контактним тиском ρ_k. З огляду на це, повний аналіз динаміки такого вузла вимагає складання сімейства відповідних операторних передавальних функцій за кожним із каналів керування.

Для визначення передавальної функції за головним кінематичним каналом «вхідне зусилля PZKвихідне переміщення s_k використаємо диференціальне рівняння (2.3.11). Відповідно до класичних постулатів теорії автоматичного

керування щодо застосування перетворення Лапласа, перехід до операторної форми здійснюється за нульових початкових умов. Фізично це означає, що в початковий момент часу (t = 0) система перебуває у стані абсолютного спокою (статичної рівноваги): початкове переміщення $s_k(0) = 0$, швидкість переміщення $s_{k'}(0) = 0$, а динамічна складова контактного тиску $\rho_k =$. Нульове значення тиску обґрунтовується тим, що за відсутності кінематичного збурення (переміщення бруска) додаткове контактне напруження в системі не генерується.

$$\left(m_k p^2 + \frac{tg}{arctgD}\ tg\alpha\ p\right) s_k = -\frac{1}{tga} PZK \qquad (2.3.12)$$

$$W = \frac{s_k}{PZK} = \frac{-1}{tga\left(m_k p^2 + \frac{tg}{arctgD}\ tg\alpha\ p\right)} \qquad (2.3.13)$$

Ось академічно відредагований і розширений варіант тексту. У цій редакції усунено дублювання тексту (випадковий повтор фрази наприкінці), виправлено помилки в написанні програмного забезпечення граматичні хиби («по помножимо», «За рівням») та підвищено загальний науковий рівень викладу.

Зважаючи на фізичну природу досліджуваного процесу, значення вихідної кінематичної величини (переміщення або контактного тиску) апріорі не може набувати від’ємних значень. Для узгодження математичної моделі з реальними напрямками дії векторів та забезпечення її фізичної адекватності, праву частину диференціального рівняння (2.3.13) необхідно помножити на -1.

На базі синтезованого рівняння передавальної функції, із застосуванням математичного інструментарію прикладного програмного середовища MATLAB (зокрема пакету Control System Toolbox), було здійснено комп'ютерне моделювання динаміки механізму розтискання. За результатами симуляції побудовано графік часової перехідної характеристики (рис. 2.3.3), а також частотні характеристики — логарифмічну амплітудно-частотну та фазочастотну (рис. 2.3.4) для досліджуваної клинової кінематичної пари.

,

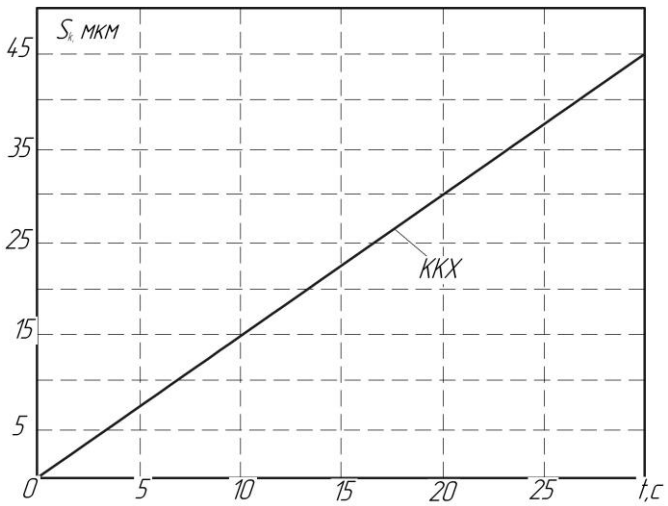


Рис.2.3.3 Перехідна характеристика кульково-клинової кінематичної пари

Аналіз перехідної функції механізму розтискання свідчить про те, що вихідна кінематична величина досягає свого усталеного значення не миттєво, а асимптотично наближається до нього за аперіодичним законом. Це підтверджує наявність масо-інерційних та демпфуючих властивостей у досліджуваному процесі. Відповідно до термінології теорії автоматичного керування (ТАК), такий кінематичний вузол ідентифікується як інерційна (аперіодична) ланка.

Крім того, форма перехідної характеристики клинової кінематичної пари (рис. 4.5) вказує на виражену динамічну нелінійність вихідної реакції системи — закону зміни величини контактного тиску алмазно-абразивних брусків $s_k = f(t)$. Зазначена нелінійність є наслідком інерційності рухомих мас та фазового запізнення (відставання) вихідної координати відносно керівного вхідного силового впливу PZK = f(t).

Динамічна неузгодженість (розбіжність), що генерується між вхідним сигналом PZK та вихідною реакцією s_k, ініціює виникнення стрибкоподібного руху (так званих фрикційних автоколивань або ефекту stick-slip). Це деструктивне трибологічне явище є вкрай небажаним, оскільки воно критично знижує точність, стабільність та роздільну здатність мікрорегулювання радіального розміру інструмента. Фізичною першопричиною виникнення таких автоколивань є нестабільність умов контакту: наявність суттєвої різниці між максимальним тертям спокою (статичним тертям) та меншим за величиною тертям руху (кінетичним тертям). Це формує характерну спадну нелінійну ділянку трибологічної

характеристики саме в зоні надмалих («повзучих») швидкостей відносного переміщення ланок.

.

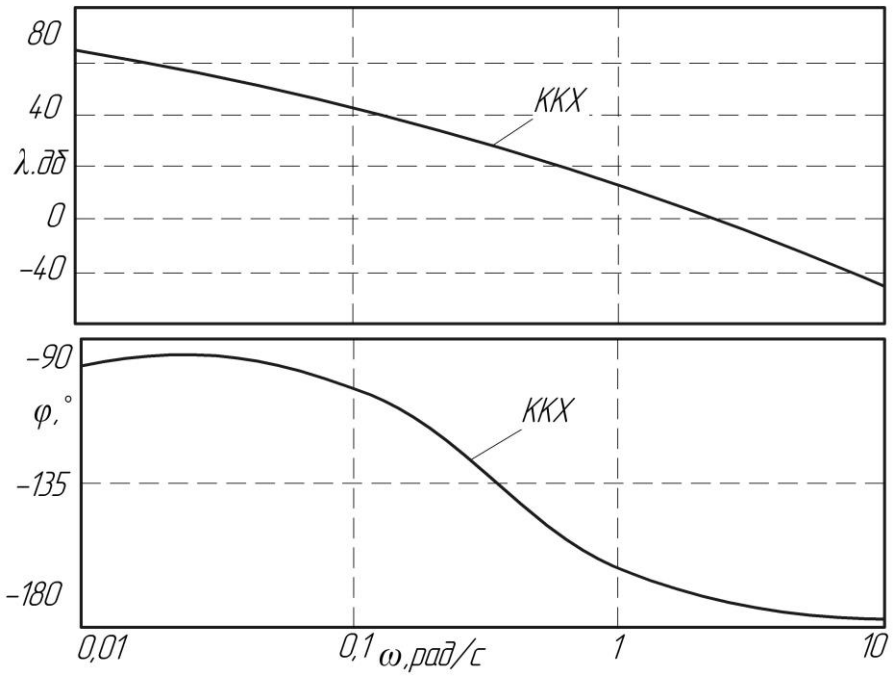


Рис.2.3.4 Логарифмічно частотні характеристики кульково-клинової кінематичної пари в умовах перехідного режиму

1 – амплітудно-частотна характеристика ;2 – фазова – частотна характеристика;

Асимптотична логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) апроксимується ламаною лінією, утвореною двома асимптотами, що перетинаються на спряжувальній частоті (частоті зламу) φн=1/T.. Аналіз отриманих логарифмічних амплітудно- та фазочастотних характеристик (рис. 2.3.4) підтверджує загальну динамічну стійкість системи розтискання та наявність достатнього запасу стійкості за амплітудою і фазою. Водночас топологія цих частотних характеристик додатково верифікує наявність суттєвої масо-інерційної складової в кінематичному ланцюзі передачі зусилля.

За підсумками аналітичного дослідження встановлено, що передавальна функція кульково-клинової кінематичної пари в динамічних режимах (із врахуванням пружно-масових властивостей) математично описується характеристичним рівнянням аперіодичної ланки другого порядку.

Аналіз побудованої часової перехідної характеристики показав наявність незначної динамічної розбіжності (розугодження) між керівним вхідним сигналом і вихідним переміщенням. Ця інерційна затримка генерує певну кінематичну похибку позиціювання при реверсуванні (зворотному ході) виконавчого елемента.

Однак, незважаючи на вказану похибку, застосування кульково-клинової передачі має принципову технологічну перевагу. На відміну від традиційних клинових механізмів (пар тертя ковзання), які під дією радіальних навантажень схильні до повного самогальмування та фізичної нездатності здійснювати зворотний рух, наявність тіл кочення розблоковує систему. Це гарантує стабільне зворотне переміщення робочого бруска при знятті натягу.

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розробка схеми верстату для хонінгування отворів з адаптивною системою керування

Специфіка фізико-механічних процесів алмазного хонінгування (АХ) зумовлює об'єктивну необхідність застосування систем адаптивного керування. Це пояснюється тим, що вхідні технологічні параметри — насамперед радіальний натяг (зусилля розтискання брусків) — безпосередньо та нелінійно впливають на вихідні показники якості: точність розміру та відхилення від циліндричності оброблюваних отворів. Зміна припуску, неоднорідність твердості матеріалу заготовки та поточне затуплення зерен вимагають безперервної корекції режимів різання в реальному часі.

Оптимальний рівень керування режимами АХ досягається шляхом інтеграції сучасних мікропроцесорних систем ЧПК із промисловою гідравлічною апаратурою, оснащеною дистанційним пропорційним керуванням. Для прецизійного перетворення електричних керівних сигналів у відповідні гідравлічні параметри (тиск, витрату) застосовується спеціалізована пропорційна гідроапаратура. Апаратна база системи включає пропорційні гідророзподільники (конструктивно інтегровані з компенсаційними клапанами), дроселі, регулятори об’ємної витрати, а також пропорційні запобіжні та редукційні клапани з відповідними електронними вузлами узгодження. Застосування пропорційних дроселів і регуляторів витрати забезпечує плавне, високодинамічне та безступінчасте регулювання швидкостей переміщення виконавчих органів верстата.

Функціональні можливості інтегрованих гідроприводів із пропорційним регулюванням були досліджені на базі експериментального верстата для алмазного хонінгування (рис. 3.1). Наведеній на рис. 3.1 кінематичній та гідравлічній схемі притаманна наявність трьох незалежних замкнених контурів адаптивних гідроприводів:

Контур керування радіальним натягом (гідропривід 1): Забезпечує створення та динамічну корекцію необхідного натягу в трибологічному спряженні «інструмент (3) — деталь (2)». Подача робочої рідини до виконавчого механізму розтискання алмазної хонінгувальної головки (3) здійснюється через безконтактну гідравлічну муфту (4), змонтовану на шпинделі верстата (6). Гідропривід (1) оснащено насосом живлення (17) та пропорційним гідродроселем (18), який регулює тиск у зливній магістралі. Важливою особливістю є те, що цей привід отримує керівну команду через систему ЧПК (9) від датчика (15), який безперервно контролює тиск у напірній магістралі гідромотора обертання (8). Це дозволяє реалізувати класичний алгоритм адаптивного хонінгування: стабілізацію моменту різання шляхом автоматичної корекції радіального зусилля розтискання.

Контур керування осьовою подачею (гідропривід 16): Забезпечує зворотно-поступальне переміщення шпинделя (6) з інструментом (3) уздовж осі оброблюваного отвору деталі (2) із заданою швидкістю V_0 та високою точністю позиціювання точок реверсу через силовий гідроциліндр (7). Керівна команда для гідроприводу (16) формується системою ЧПК (9) на основі даних від датчика зворотного зв'язку (5).

Контур керування головним рухом (гідропривід 14): Забезпечує безступінчасте регулювання колової швидкості обертання інструмента за допомогою гідромотора (8). Зворотний зв'язок також реалізується через датчик (15) та систему ЧПК (9).

Для забезпечення енергоефективності та точності гідроприводи (14) і (16) укомплектовано гідронасосами (12) із пропорційним регулюванням об’ємної подачі та пропорційними запобіжними клапанами (10). Додатково контур осьової подачі (16) захищений стандартним запобіжним клапаном (13).

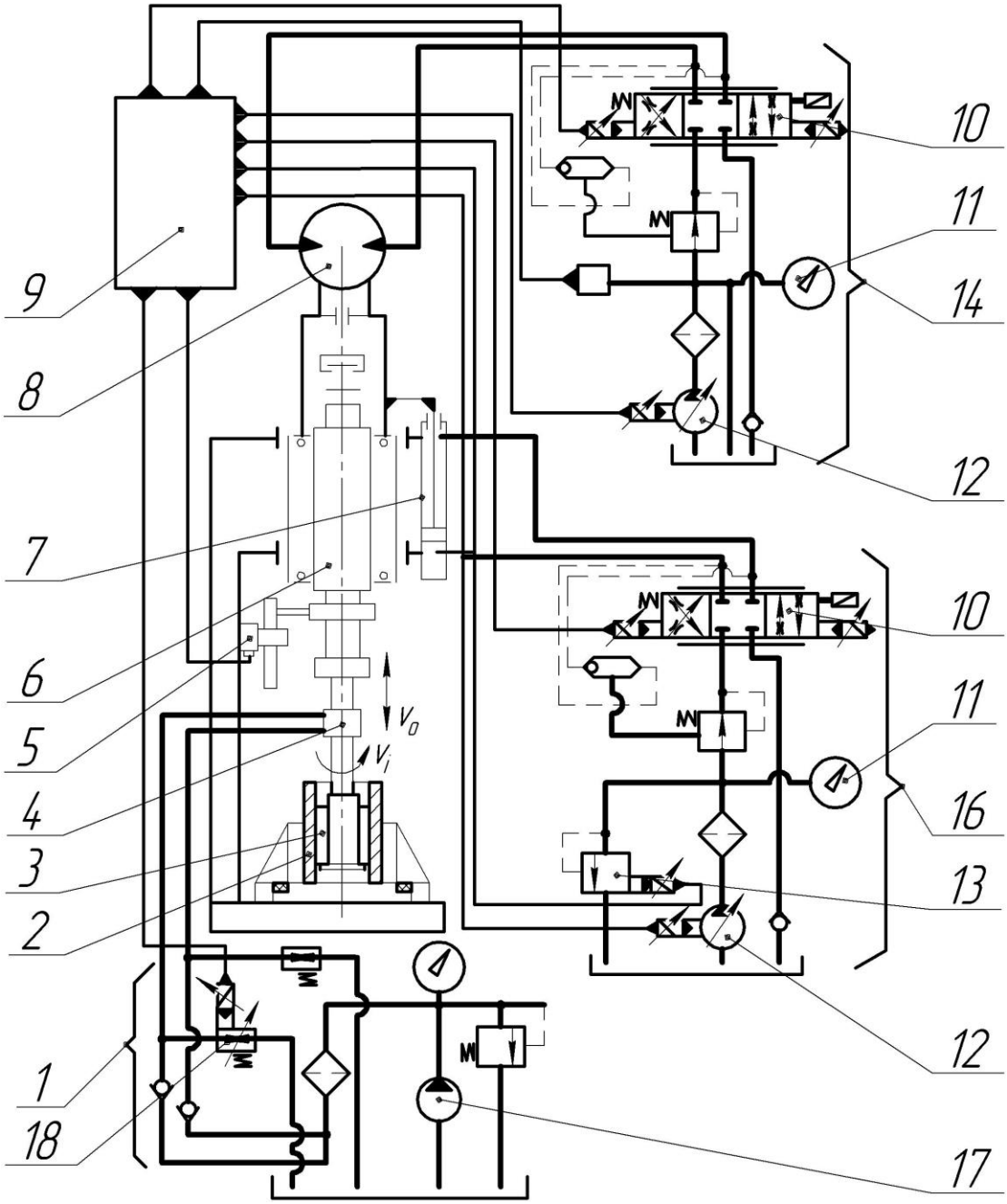


Рисунок 3.1 – Схема верстата для алмазного хонінгування з адаптивною системою керування.

1 - пропорційний гідропривід розтиску АР; 2 - деталь; 3 - інструмент ; 4 - гідравлічна муфта ; 5 - датчик зворотного зв'язку; 6 - шпиндель верстата; 7 - гідроциліндр; 8 - гідромотор ; 9 - пристрій ЧПУ; 10 - пропорційний запобіжник; 12 - насос; 13 - запобіжний клапан; 14 – пропорційний гідропривід обертання АР ; 15 - датчик; 16 – пропорційний гідропривід осьової подачі АР; 17 - насос живлення; 18 - пропорційний гідродросель.

Алгоритм функціонування адаптивної системи: Представлена архітектура верстата функціонує за принципом замкненого циклу регулювання. У відповідний контур керування (1, 14 або 16) від електронної системи (9) надходить базовий сигнал завдання (еталонне значення параметра). Датчики зворотного зв'язку (5 і 15) безперервно зчитують поточні (фактичні) значення координат, тисків або швидкостей. Цей масив даних оцифровується, приводиться до зіставного формату та програмно апаратно порівнюється із сигналом завдання.

У разі виникнення неузгодженості (розбіжності між заданим і фактичним значеннями), мікропроцесор генерує відповідний командний сигнал помилки, який миттєво коригує положення виконавчих регулюючих елементів (10, 18). Завдяки замкненості всіх контурів керування система нівелює зовнішні збурення, забезпечуючи високу точність, швидкодію та стабільність відпрацювання технологічних команд виконавчими органами верстата.

3.2 Конструктивне виконання верстату для алмазного хонінгування

3.2.1. Опис конструкції верстату

Конструктивна компоновка експериментального верстата (рис. 3.2) базується на жорсткій несучій системі, основою якої виступає нижня базова плита 3. У її розточеннях жорстко змонтовано силовий гідроциліндр, що виступає виконавчим механізмом контуру головного зворотно-поступального руху інструмента.

У верхній зоні напрямних систем верстата інтегровано спеціалізований механізм осциляції 5. Його функціональне призначення полягає в генерації додаткового низькоамплітудного коливального руху вздовж осі обробки, який кінематично накладається на основний рух формоутворення. Приводний вузол обертального (головного) руху включає гідромотор, який передає крутний момент на інструментальний шпиндель через карданну передачу 7. Наявність карданного шарніра забезпечує просторове самовстановлення інструмента та компенсацію можливих радіальних і кутових неспіввісностей між віссю шпинделя та базовим отвором заготовки.



Рис. 3.2 Схема верстату для дослідження гідростатичного алмазного хонінгування отвору гвинта.

1 – стійка з ЧПУ; 2 – гідроциліндр; 3 – станина; 4 – механізм стола; 5 – механізм осциляції; 6 – гідростатичний хон; 7 – кардан; 8 – бак МОР; 9 – гідростанція.

Реалізація зворотно-поступального переміщення осциляційного вузла 5 здійснюється за допомогою верхнього гідравлічного циліндра 2. Конструктивною особливістю даного вузла є інтеграція функцій деталей: він базується на циліндричній напрямній колоні (скалці), яка одночасно виконує роль нерухомого штока зазначеного гідроциліндра, утворюючи компактну та високожорстку телескопічну конструкцію.

Безпосередньо на корпусі напрямного гідроциліндра змонтовано механізм робочого столу 4, призначений для базування деталі та надання їй додаткового керованого обертального руху (або колової осциляції). Надійна фіксація вузла столу в необхідному координатному положенні здійснюється за допомогою прецизійних тангенціальних затискних механізмів.

Зниження теплонапруженості процесу мікрорізання та ефективне евакуювання абразивного шламу й стружки із зони контакту забезпечується системою змащування та охолодження, що живиться від автономного резервуара мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) 8.

Енергозабезпечення всієї сукупності основних технологічних (формоутворювальних) та допоміжних рухів реалізується модульною гідравлічною станцією 9, архітектура якої включає три незалежні приводні контури. Алгоритмічне узгодження роботи гідроприводів, синхронізація кінематичних ланцюгів та безпосереднє програмне керування робочими циклами верстата здійснюються за допомогою мікропроцесорної системи числового програмного керування (ЧПК) 1.

3.2.2. Принцип дії верстату.

Функціонування верстата здійснюється в автоматизованому цикловому режимі. Програмування, параметризація та синхронізація заданих технологічних циклів обробки реалізуються за допомогою термінала пристрою числового програмного керування (ЧПК) 1. Кінематика головного зворотно-поступального руху реалізована за схемою з рухомим корпусом: вертикальне переміщення інструментальної каретки зі шпинделем здійснюється силовим гідроциліндром 2,

гільза якого ковзає вздовж нерухомої циліндричної напрямної колони відносно жорстко закріпленого на ній стаціонарного поршня. Таке конструктивне рішення дозволяє суттєво підвищити згинальну жорсткість шпиндельного вузла, зменшити габарити приводної системи та мінімізувати вплив вібрацій.

Керування радіальним натягом (робочим тиском розтискання брусків) в алмазному гідростатичному хонінг-інструменті здійснюється за принципом адаптивного зворотного зв'язку. Мікропроцесорна система ЧПК динамічно регулює тиск у гідросистемі розтискання синхронно зі зміною крутного моменту на гідромоторі головного обертального руху 7. Безперервний моніторинг моменту опору різанню забезпечується відповідним прецизійним датчиком, сигнал з якого в режимі реального часу опрацьовується контролером ЧПК. Це забезпечує жорстку стабілізацію силових параметрів різання незалежно від коливань величини припуску чи локальної твердості заготовки.

Після ініціалізації керуючої програми верстат виконує технологічний цикл повністю в автоматичному режимі, гарантуючи досягнення нормативних показників точності форми (циліндричності, круглості) та якості мікрорельєфу (шорсткості) оброблюваних отворів. Інтелектуальна система керування адаптивно реагує на стохастичні збурення в зоні різання, здійснюючи безперервне автоматичне підналагодження силових і швидкісних параметрів процесу адекватно до поточних умов контактної взаємодії інструмента та деталі.

3.2.3. Будова та принцип дії механізмів верстату

Розроблений автономний механізм осциляції генерує та накладає додатковий низькоамплітудний коливальний рух у поздовжньому (осьовому) напрямку на основний кінематичний рух формоутворення. Інтеграція такого модуля в технологічну систему дозволяє суттєво підвищити точність геометричної форми оброблюваних отворів, ефективно здійснювати фінішну обробку важкооброблюваних матеріалів та значно інтенсифікувати процес зняття мікроприпуску. Кінематичною перевагою запропонованої схеми є те, що всі первинні ланки збудника коливань здійснюють виключно обертальний рух. Це

зумовлює доцільність використання високоточних опор кочення замість пар ковзання, гарантує можливість плавного безступінчастого регулювання частоти й амплітуди коливань, дозволяє інтерактивно керувати режимами (вмикати або вимикати осциляцію без зупинки основного циклу), а також робить модуль структурно незалежним, що уможливлює його агрегатування з верстатами різних типорозмірів.

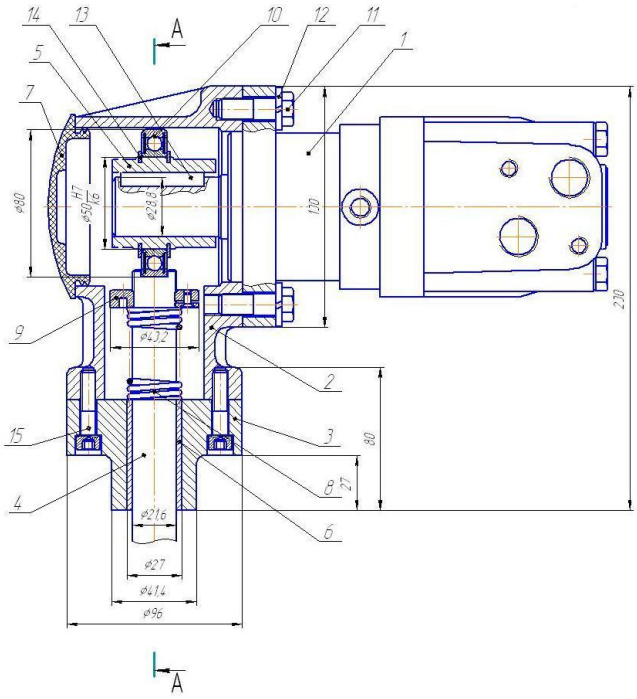




Рис. 3.3 Механізм осциляції

1 – мотор; 2 – корпус; 3 – траверса; 4 – вал-шпиндель; 5 – концентрична втулка; 6 – втулка; 7 – кришка; 8 – пружина; 9 – гайка з контрящим гвинтом; 10 – радіально-упорний підшипник; 11 – болт; 12 – шайба; 13 – шпонка; 14 – стопорне кільце; 15 – гвинт.

Конструктивно механізм осциляції інтегрований у базовий корпус 2, на фланці якого змонтовано приводний електродвигун 1. На вихідному валу двигуна 1 через шпонкове з'єднання 13 жорстко встановлено профільовану (ексцентричну або з похилим торцем) втулку 5, на зовнішній посадковій поверхні якої зафіксовано радіально-упорний підшипник 10 із використанням двох стопорних кілець 14. У

внутрішній порожнині корпуса 2 співвісно розташовано вал-шпиндель 4, торцева частина якого перебуває в постійному силовому контакті із зовнішнім кільцем підшипника 10. Силове замикання кінематичного ланцюга забезпечується циліндричною пружиною стискання 8, попередній натяг якої регулюється спеціальною гайкою зі стопорним гвинтом 9. Напрямною базою для шпинделя слугує прецизійна втулка 6, розміщена в отворі фіксувальної траверси 3. Герметизація робочої порожнини корпуса 2 здійснюється верхньою кришкою 7.

Принцип дії механізму полягає в наступному: крутний момент від електродвигуна 1 передається на генеруючу втулку 5. Завдяки її геометричному профілю (ексцентриситету або кутовому нахилу), рівномірний обертальний рух радіально-упорного підшипника 10 трансформується у зворотно-поступальне переміщення вала-шпинделя 4. Кінематичний цикл має такий вигляд: під час переходу підшипника в нижню мертву точку вал-шпиндель 4 здійснює робочий хід донизу, стискаючи пружину 8. При подальшому обертанні та проходженні верхньої мертвої точки пружина 8 розтискається, забезпечуючи зворотний хід шпинделя вгору та гарантуючи його постійний безвідривний контакт із підшипником.

У результаті описаної взаємодії генерується стабільний рух осьової осциляції, який безпосередньо транслюється через карданний шарнір на робочий інструмент — алмазну гідростатичну хонінгувальну головку. Наявність керованого приводу забезпечує безступінчасте регулювання швидкості та частоти зворотно-поступального переміщення вала-шпинделя в режимі реального часу.

Механізм робочого столу призначений для точного базування, надійного просторового закріплення та надання керованого обертального руху (або кругової осциляції) оброблюваній заготовці. За своїм компонувальним рішенням та навантажувальною здатністю даний кінематичний вузол орієнтований переважно на фінішну обробку деталей типу «тіла обертання» (втулки, гільзи, кільця), а також корпусних деталей малих і середніх габаритів.

Конструктивно механізм столу виконано у вигляді інтегрованого модуля, основою якого є базовий корпус 3. У його розточці співвісно змонтовано

центральне поворотне осердя (шпиндель столу) 4, що являє собою порожнисту деталь із центральним наскрізним отвором. Обертання осердя реалізується на високоточній роликовій вальниці (підшипнику) 7, необхідний попередній натяг у якій та осьова фіксація забезпечуються нижньою регулювальною гайкою 8. Безпосереднє базування деталі здійснюється на планшайбі (столі) 5, жорстко змонтованій на верхньому торці осердя 4. Для захисту внутрішніх порожнин центральний технологічний отвір планшайби герметично закрито заглушкою 19.

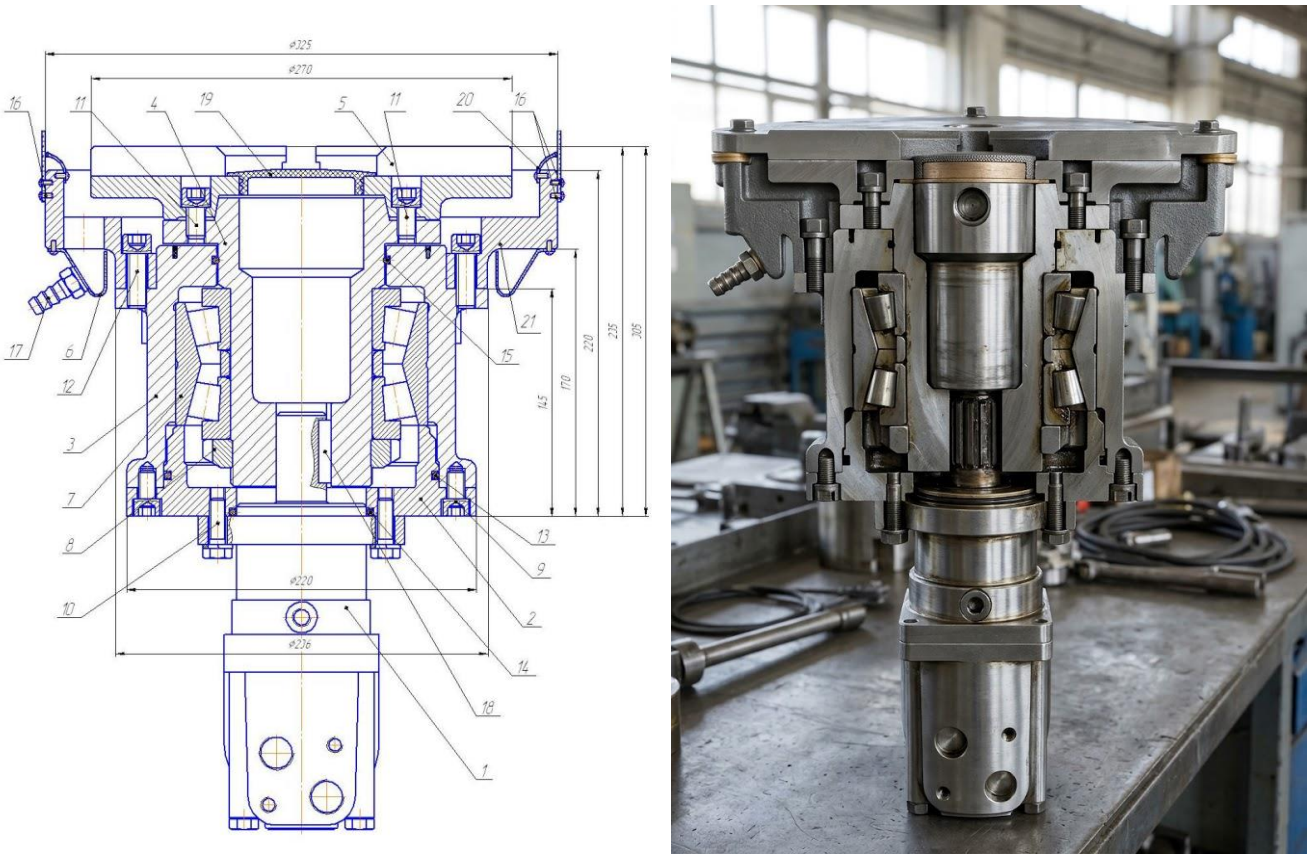


Рис. 3.4 Механізм стола

1 – мотор; 2 – кришка; 3 – корпус; 4 – сердечник; 5 – стіл; 6 – піддон; 7 – роликовий підшипник; 8 – гайка; 9 – гвинт; 10 – болт; 11 – гвинт; 12 – гвинт; 13 – ущільнююче кільце; 14 – ущільнююче кільце; 15 – ущільнююче кільце; 16 – болт; 17 – зливний штуцер; 18 – шпонка; 19 – пробка; 20 – захисний кожух; 21 – траверса.

Приводний контур механізму розташований у нижній частині модуля: корпус 3 закритий фланцевою кришкою 2, на якій базується приводний мотор 1. Монтажний стик двигуна надійно ізольовано кільцем ущільнювача 14, а зовнішня герметичність обертового осердя 4 підтримується радіальним манжетним

ущільненням 15. Для гарантованого захисту прецизійних кінематичних пар від агресивного впливу відпрацьованої мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) та абразивного шламу передбачено спеціальний піддон-уловлювач 6. Він розташований на несучій траверсі 21 і оснащений штуцером 17 для гравітаційного відведення зібраної рідини назад у систему очищення. Локалізацію робочої зони та безпеку оператора забезпечує захисний кожух 20 із дверцятами, також змонтований на траверсі 21.

Кінематичний ланцюг передачі руху відзначається високою жорсткістю та відсутністю проміжних редукторів (прямий привід): крутний момент із вихідного вала мотора 1 через жорстке шпонкове з'єднання 18 передається безпосередньо на осердя 4, надаючи планшайбі 5 робочого обертання. Використання сучасного керованого приводу дозволяє здійснювати плавне, безступінчасте регулювання частоти обертання робочого столу, адаптуючи кінематичні режими верстата до специфіки конкретної технологічної операції.

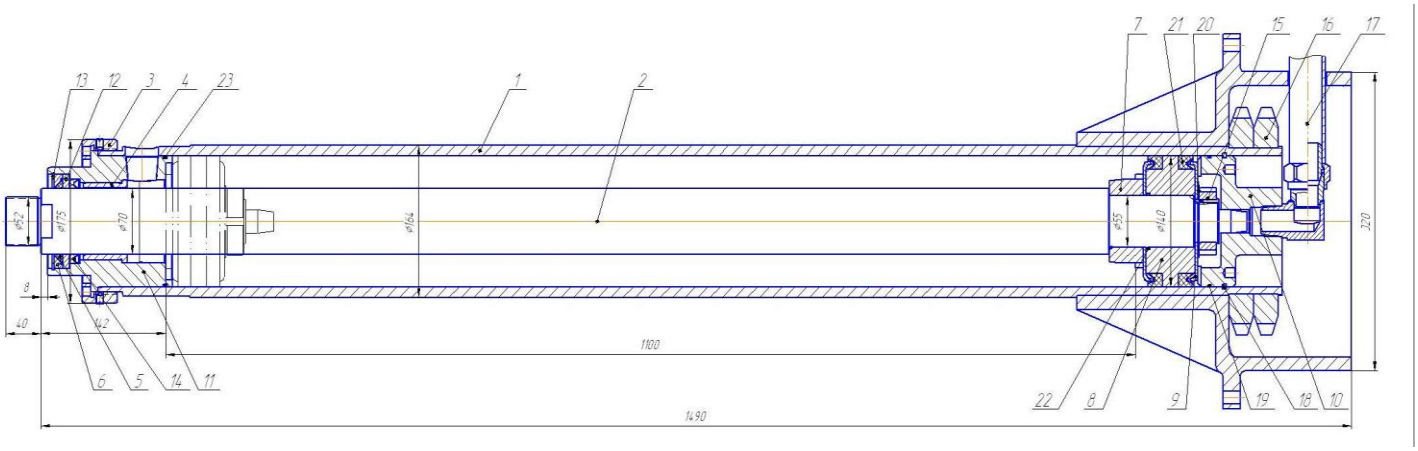


Рис. 3.4 Гідроциліндр

1 – циліндр; 2 – шток; 3 – гайка; 4 – втулка; 5 – грезез'ємник; 6 – кришка грязез'ємника; 7 – демпфер; 8 – поршень; 9 – манжетоутримувач; 10 – пробка; 11 – наскрізна кришка; 12 – шайба; 13 – шайба; 14 – манжета; 15 – гайка; 16 – гайка; 17 – штуцер; 18 – закладна проволока; 19 – ущільнення; 20 – шайба; 21 – манжета; 22 – ущільнення; 23 – ущільнення.

Силовий гідроциліндр є виконавчим механізмом контуру вертикальної подачі. Його функціональне призначення полягає в генерації прямолінійного зворотно-

поступального переміщення штока, що забезпечує як прискорене (маршове) підведення алмазної гідростатичної хонінгувальної головки безпосередньо до зони різання, так і реалізацію самого робочого руху осьової подачі інструмента. Завдяки вибраному компонувальному рішенню, на зовнішньому корпусі (гільзі) гідроциліндра жорстко базується механізм робочого столу, тоді як на рухомому штоці змонтовано модуль осьової осциляції та шпиндельний вузол.

Конструктивно гідродвигун лінійної (двосторонньої) дії складається з гільзи циліндра 1. У її внутрішній робочій порожнині співвісно розміщено шток 2, демпферний пристрій 7 та двосторонній поршень 8, осьова фіксація якого здійснюється стопорною гайкою 15. Для надійного розділення робочих порожнин по обидва боки поршня встановлено гідравлічні манжети 21 із відповідними опорними кільцями (манжетотримачами) 9. Верхня торцева частина циліндра закрита наскрізною напрямною кришкою 11, яка містить технологічний канал для підведення робочої рідини та надійно зафіксована гайкою 3. Зовнішня герметичність з'єднання кришки з гільзою забезпечується радіальним ущільненням 23. У внутрішній розточці наскрізної кришки змонтовано напрямну втулку 4, гідравлічну манжету 14, а також брудознімач 5 із фіксувальною кришкою 6, що запобігає потраплянню абразивних часток та шламу у порожнину гідроциліндра. Протилежний (нижній) торець циліндра герметизовано торцевою заглушкою 10 із кільцем ущільнювача 19. У заглушку інтегровано гідравлічний штуцер 17 для комутації з напірно-зливною магістраллю.

Принцип дії механізму базується на почерговому нагнітанні гідравлічного масла у відповідні порожнини циліндра. Під час ходу вгору робоча рідина під тиском подається через штуцер 17 і канали торцевої заглушки 10 у поршневу (нижню) порожнину. Зростання гідростатичного тиску створює зусилля, що змушує поршень 8 разом із демпфером 7 та штоком 2 здійснювати прямолінійне переміщення вгору. Після досягнення заданої координати реверсу напрямок потоку змінюється: нагнітання рідини відбувається вже через канал у наскрізній кришці 11 у штокову (верхню) порожнину. Під дією перепаду тисків шток 2

здійснює зворотний хід донизу, при цьому поршень 8 витісняє відпрацьовану рідину з поршневої порожнини на злив у гідробак через штуцер 17.

Описаний гідродинамічний цикл забезпечує стабільну генерацію зворотно-поступального руху та дозволяє реалізувати диференційовані швидкісні режими (прискорене підведення/відведення та повільну робочу подачу). Безступінчасте регулювання швидкості переміщення штока досягається шляхом дроселювання потоку робочої рідини із застосуванням пропорційних гідророзподільників у системі керування.

4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ ХОНІНГУВАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ

4.1. Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції необхідно вибрати «базу для порівняння», яку приймають за основу для виявлення техніко-економічних переваг нового конструкторського рішення та визначення економічного ефекту від його впровадження у виробництво.

Розроблена у даному дипломному проекті конструкція хонінгувальної головки не має вітчизняних аналогів. Тому у якості бази для порівняння приймемо її зарубіжний аналог, який коштує близько 2000 € і потребує застосування дорогого хонінгувального обладнання (вартістю 500 тис. €). Запропонована конструкція шпинделя вертикально-свердлильного верстата мод. 2Н135 дозволить не лише запобігти значних витрати на придбання інструменту та обладнання, а й істотно підвищити продуктивність обробки.

Розрахуємо річну потребу у хонінгувальних головках за формулою [2]:

$$k_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e}, \qquad (4.1)$$

$N_д$ – річна програма виготовлення деталі, шт./рік;

$T_{нор}$ – штучний час обробки деталі на операції хонінгування, хв.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

$\kappa_{вт}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.

Потреба у хонінгувальних головках:

- в базовому варіанті

$$\kappa_i = \frac{3600 \cdot 10,0 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{37680} = 1 \text{ шт.}$$

- очевидно, що, при значно меншій нормі часу, в проектному варіанті для виконання річної програми обробки деталі також потрібна одна хонінгувальна головка.

Потребу в обладнанні (верстаті 2Н135) визначаємо за формулою [1]:

$$Q_p = \frac{N_д \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot к_в}, \qquad (4.2)$$

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

$к_в$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

$$Q_p = \frac{3600 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,15$$

Приймаємо 1 верстат як у базовому, так і в проектному варіантах.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ з/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проектний
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	3600	3600
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті	шт./рік	1	1
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	10,0	3,14
5.	Площа, яку займає верстат	$м^2$	2,23	2,23
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	1,7	1,7
7.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	14/9	14/9
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	3	3
9.	Оптова ціна: - верстата - хонінгувальної головки	 грн грн	 81700 101200	 - -

4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

4.2.1. Конструкторська підготовка виробництва

Визначення витрат на конструкторську підготовку виробництва шпинделя та хонінгувальної головки виконаємо у такій послідовності:

1. Встановлюємо етапи конструкторської підготовки виробництва інструменту та модернізації верстата: технічне завдання; технічна пропозиція; ескізний проект; технічний проект; робочий проект.

2. Встановлюємо групу новизни та складності модернізації верстата згідно [31, табл. А.1 і А.2 дод. А].

3. Визначаємо кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу [31, табл. А.3 дод. А] деталі різних видів переводимо в «умовні деталі».

4. Трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості «умовних деталей» на трудомісткість однієї умовної деталі [31, табл. А.4 дод. А] в залежності від групи новизни та складності модернізації верстата.

5. Трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни і складності верстата [31, табл. А.4 дод. А].

6. Після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва. При цьому, розмір середньогодинної заробітної плати конструктора, використаної нами у розрахунках, відповідає середній заробітній платі цієї категорії працівників у 2018 році. Розмір відсотків приймається за заводською калькуляцією визначення собівартості базових конструкцій.

7. Усі отримані результати зводимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Розрахунок витрат на конструкторську підготовку модернізації верстата

№ п/п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Технічне завдання	Технічна пропозиція	Ескізний проект	Технічний проект	Робочий проект	Всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Група новизни	гр.	II	-	-	-	-	II
2.	Група складності	гр.	II	-	-	-	-	II
3.	Кількість деталей × коефіцієнт переводу в «умовні деталі»:	шт.	-	-	-	-	-	-
	б) литих та зварних, які не є корпусними	-	-	-	-	11×2	11×4	
	в) оригінальних, які не є литими та корпусними	-	-	-	-	61×1	61×1	-
	г) стандартних нормалізованих	-	-	-	-	72×0,15	72×0,15	-
	д) покупних деталей та виробів	-	-	-	-	26×0,15	26×0,15	-
4.	Кількість умовних деталей	шт.	-	-	-	106,8	119,7	-
5.	Норма на умовну деталь	нор-год.	-	-	-	2,0	2,6	-
6.	Трудомісткість етапу робіт	нор-год.	24	20	31,5	213,6	311,22	600,32
7.	Середньогодинна заробітна плата конструктора	грн/год.	124,58	112,93	107,29	108,67	99,946	
8.	Зарплата основна ($З_о$)	грн	2989,92	2258,6	3379,6	23211,9	31105,2	62945,26
9.	Зарплата додаткова ($З_д$): 10% від $З_о$	грн	298,99	225,86	337,96	2321,19	3110,52	6294,53
10.	Єдиний соціальний внесок: 22,0% від ($З_о$+$З_д$)	грн	723,56	546,58	817,87	5617,28	7527,46	15232,75
11.	Витрати на відрядження: 5% від $З_о$	грн	149,50	112,93	168,98	1160,60	1555,26	3147,26
12.	Накладні витати: 45% від $З_о$	грн	1345,46	1016,4	1520,8	10445,4	13997,3	28325,37
13.	Всього вартість проекту $В_{пк}$	грн	5507,43	4160,3	6225,3	42756,3	57295,8	115945,0

4.2.2. Технологічна підготовка виробництва

Розрахунок витрат на технологічну підготовку виробництва здійснюємо відповідно до вимог «Єдиної системи технологічної підготовки виробництва». На основі проведеного аналізу технологічності конструкцій хонінгувальної головки та шпинделя визначено перелік тих етапів, які слід включити до технологічної підготовки модернізації верстата:

– технологічний контроль креслень, їх налагодження та розмноження;

– розробка техпроцесів: виготовлення деталей та складання вузлів;

– інші витрати.

Трудомісткість технологічної підготовки виробництва визначаємо в такій послідовності.

1. В залежності від кількості деталей і вузлів різної технологічної складності та на підставі диференційованих норм часу визначаємо трудомісткість проектування технологічних процесів виготовлення деталей і складання вузлів. Трудомісткість інших етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначаємо у відсотках від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів.

2. Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо вартість технологічної підготовки виробництва інструменту та модернізації верстату $B_{\text{пт}}$. (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Витрати на технологічну підготовку

№ п/п	Показники та етапи робіт	Кількість	Кількість нормо-годин на одиницю	Загальна кількість нормо годин	Середньогодинна зарплата технолога	Зарплата основна $З_о$, грн	Додаткова зарплата $З_д$, 10% від $З_о$, грн	Відрахування у соціальні фонди 22,0% від ($З_о$+$З_д$)	Накладні витрати 55% від $З_о$, грн	Загальна вартість
1	Технологічний контроль креслень, їх відладка та розмноження, н-год.			17,5	116,2	2033,50	203,35	492,11	1118,4	3847,4
2	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:									
	а) загальна кількість деталей, шт.	72		713		74776,7	7477,6	18096,0	41127,2	141477,6
	б) у т.ч. за групами технологічної складності:									
	I	22	4,5	99	92,32	9139,68				
	II	32	9	288	92,32	26588,2				
	III	16	17	272	116,85	31783,2				
	IV	2	27	54	134,55	7265,70				
3	Розробка технологічного процесу складання вузлів, шт., у т.ч.	2		17,6		1915,53	191,55	463,56	1053,5	3624,2
	інструмент (I гр. складності	1	2,7	2,7	92,32	249,26				
	шпиндель (IV гр. складності	1	14,9	14,9	111,83	1666,27				
4	Інші витати, н-год.			16,8	92,32	1550,98	155,10	375,34	853,04	2934,5
5	Всього вартість ТПП, грн			764,9		80276,8	8027,7	19427,0	44152,2	151884

4.3. Визначення витрат на виготовлення хонінгувальної головки та модернізації верстата

Трудомісткість виготовлення хонінгувальної головки та шпинделя (модернізації верстата) $T_{\text{о}}$ визначаємо в нормо-годинах за формулою:

$$T_o = \sum_{i=1}^{n} T_i \,, \tag{4.3}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$T_к$, $T_м$, $T_т$, $T_с$, $T_{ін}$, – трудомісткість ковальсько-штампувальних, механічних, термічних, слюсарсько-складальних, та інших робіт, норо-год.

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного інструмента та модернізації верстата розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{г(і)}} \cdot T_{\text{і}} \tag{4.4}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$C_{\text{г(і)}}$ – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i-й вид робіт з урахуванням умов праці, грн/год.;

$T_{\text{і}}$ - трудомісткість i-того виду робіт, нормо-год.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах з виготовлення хонінгувальної головки:

$$З_{\text{ор}} = 18,6 \cdot 101,217 = 1882,64 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{\text{о}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор(і)}} \cdot \frac{П_{\text{во(і)}}}{100} \,, \tag{4.5}$$

де $П_{\text{во(і)}}$ - процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, на механічних роботах:

$$B_{\text{о}} = 1882,64 \cdot \frac{280}{100} = 5271,38 \text{ грн}$$

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор(і)}} \cdot \frac{П_{\text{цех(і)}}}{100}, \qquad (4.6)$$

де $П_{\text{цех(і)}}$ – процент цехових витрат по кожному *і*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{\text{цех}} = 1882,64 \cdot \frac{232}{100} = 4367,72 \text{ грн.}$$

Результати аналогічно виконаних розрахунків даних статей на інших роботах заносимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, включені до собівартості хонінгувальної головки та модернізації верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт, нормо-год.	Середній розряд	Середньо-годинна тарифна ставка робітників, грн/год.	Основна заробітна плата робітників $З_{\text{ор}}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $В_{\text{о}}$,		Цехові витрати $К_{\text{цех}}$	
					%	грн	%	грн
Хонінгувальна головка								
Ковальсько-штампувальні	2,1	3	102,029	214,26	310	664,21	223	477,80
Механічні	18,6	4	101,217	1882,64	280	5271,38	232	4367,72
Термічні	2,5	3	112,988	282,47	285	805,04	250	706,18
Слюсарсько-складальні	1,9	4	101,217	192,31	210	403,86	142	273,08
Інші	1,8	3	91,091	163,96	220	360,72	140	229,55
Всього	26,9	-	-	2735,64	-	7505,21	-	6054,33
Шпиндель								
Ковальсько-штампувальні	12,6	3	102,029	1285,57	310	3985,25	223	2866,81
Механічні	95,3	4	101,217	9645,98	280	27008,74	232	22378,67
Термічні	2,5	3	112,988	282,47	285	805,04	250	706,18
Слюсарсько-складальні	10,1	4	101,217	1022,29	210	2146,81	142	1451,65
Інші	1,3	3	91,091	118,42	220	260,52	140	165,79
Всього	121,8	-	-	12354,73	-	34206,37	-	27569,10

Собівартість виготовлення інструменту та модернізації верстата розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних і звітних калькуляцій.

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{вир} = M_о + M_д + П_н + T_в - B_{зв} + E_{тех} + П_{тех} + \\ + З_{ор} + З_{др} + B_{єс} + B_{цп} + B_{цех} + B_{зав} + B_{ін}, \quad (4.7)$$

де: $M_о$, $M_д$ – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн;

$П_н$ – покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби, грн;

Розрахунки $M_о$, $П_н$, зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Склад матеріальних витрат

№ з/п	Матеріали, покупні комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн
Інструмент					
Основні матеріали					
1.	Сталь У8А	кг	1,2	150,0	180,00
Покупні напівфабрикати					
1.	Підшипники	шт.	2	393,36	786,72
2.	Метизи	компл.	1	64,09	64,09
Всього		–	–	–	850,81
Шпиндель					
Основні матеріали					
1.	Сталь 40Х	кг	17,8	112,8	2007,84
Покупні напівфабрикати					
1.	Підшипники	шт.	4	393,36	1573,44
2.	Метизи	кг	8,5	49,90	424,15
3.	Інші покупні				234,30
Всього		–	–	–	2231,89

$B_т$ – транспортно-заготівельні витрати, грн;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн;

$E_{тех}$, $П_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн;

$З_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн;

$B_{єс}$ – єдиний соціальний внесок, грн;

$B_{цп}$ – відшкодування зносу інструмента та пристосувань цільового призначення, грн;

$B_{зав}$, $B_{ін}$ – загальнозаводські та інші виробничі витрати, грн;

$K_{пв}$ – позавиробничі витрати, грн

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Витрати на виготовлення хонінгувальної головки та модернізацію верстата

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Величина, грн	
				інструмент	шпиндель
1.	Матеріали основні	$M_о$	табл. 4.5	180,00	2007,84
2.	Матеріали допоміжні	$M_д$	4% від $M_о$	7,20	80,31
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_н$	табл. 4.5	850,81	2231,89
4.	Зворотні відходи	$– B_{зв}$	6% від $M_о$	10,80	120,47
5.	Транспортно-заготівельні витрати	$B_т$	5% від ($M_о$ + $M_д$+ $П_н$)	41,52	172,80
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $E_{тех}$	59,8% від $M_о$	1635,91	7388,13
7.	Всього матеріальні витрати			2704,65	11760,50
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.4	2735,64	12354,73
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	273,56	1235,47
10.	Єдиний соціальний внесок	$B_{сс}$	22,0% від ($З_{ор}$+$З_{др}$)	662,03	2989,84
11.	Відшкодування зносу інструментів та пристосувань цільового призначення	$B_{цп}$	12,2% від $З_{ор}$	333,75	1507,28
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$B_о$	табл. 4.4	7505,21	34206,37
13.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 4.4	6054,33	27569,10
14.	Загальнозаводські витрати	$B_{зав}$	221% від $З_{ор}$	6045,77	27303,94
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	93,01	420,06
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	Σст.1-15	26408,00	119347,30

4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок експлуатаційних витрат виконуємо за формулою [31]:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}} \qquad (4.8)$$

де $B_{\text{мо}}$ – витрати на основні матеріали (залишаються незмінними в порівнюваних варіантах), грн;

$B_{\text{з}}$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби основних робітників, грн;

$B_{\text{е}}$ – витрати на силову електроенергію, грн;

$B_{\text{мд}}$ – витрати на допоміжні матеріали. грн;

$B_{\text{р}}$ – витрати на ремонт обладнання, грн;

$B_{\text{п}}$ – витрати на утримання приміщення, грн;

$B_{\text{а}}$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок):

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \frac{T_{шт}}{60} \cdot \left(1 + K_{\text{д}}\right) \cdot \left(1 + K_{\text{с}}\right) \qquad (4.9)$$

де $C_{\text{г}}$ - годинна тарифна ставка оператора, грн/год.;

$T_{\text{шт}}$ – час обробки деталі, хв.;

$K_{\text{д}}$, $K_{\text{с}}$ – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби.

У базовому варіанті:

$$B_{з}^{баз} = 91,091 \cdot \frac{10,0}{60} \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) = 22,879 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_{з}^{пр} = 91,091 \cdot \frac{3,14}{60} \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) = 7,184 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{N}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60} \cdot Ц_{\text{ел}} \qquad (4.10)$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи моторів (приймають 0,65...0,8);

K_{N} – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймають 0,65…0,8);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,5…0,6 для свердлильних верстатів);

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів;

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$Ц_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{4,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{10,0}{60} \cdot 10,13 = 1,781 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{пр} = \frac{4,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{3,14}{60} \cdot 10,13 = 0,559 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{дм}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{шт}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}} \qquad (4.11)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 14 \cdot 10,0}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 1,855 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{пр} = \frac{79,5 \cdot 14 \cdot 3,14}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,582 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot Г_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot Г_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \qquad (4.12)$$

де $Г_{\text{вм}}$, $Г_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн/рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3950 год.).

$$B_p^{баз} = \frac{(14 \cdot 980 + 9 \cdot 790) \cdot 10,0}{3950 \cdot 60} = 0,879 \text{ грн};$$

$$B_p^{пр} = \frac{(14 \cdot 980 + 9 \cdot 790) \cdot 3,14}{3950 \cdot 60} = 0,276 \text{ грн}.$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \qquad (4.13)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення):

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн/м^2;

$F_{\text{дрм}}$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{1,7 \cdot 4,0 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 3,215 \text{ грн}.$$

$$B_{\text{уп}}^{пр} = \frac{1,7 \cdot 4,0 \cdot 3,14}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 1,009 \text{ грн}.$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot Н_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \qquad (4.14)$$

де $Н_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

$Ф_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн;

Балансова вартість базового верстата:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + К_{\text{тр}} + К_{\text{м}} + К_{\Ф}\right) \qquad (4.15)$$

де $Ц_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн;

$К_{\text{тр}}$, $К_{\text{м}}$, $К_{\Ф}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$Ф_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 81700 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 97223 \text{ грн.}$$

Балансову вартість модернізованого верстата визначимо за формулою:

$$Ф_{бал}^{пр} = Ф_{зал}^{баз} - В_{ан} + С_{мод}, \qquad (4.16)$$

де $Ф_{зал}^{баз}$ - залишкова вартість базового верстата на момент модернізації, грн:

$$Ф_{зал}^{баз} = Ф_{бал}^{баз} - \frac{Ф_{бал}^{баз} \cdot Н_{а} \cdot Т_{ек}}{100}, \qquad (4.17)$$

де $Т_{ек}$ - строк експлуатації верстата до моменту модернізації, років.

$$Ф_{зал}^{\text{баз}} = 97223 - \frac{97223 \cdot 20 \cdot 3}{100} = 38889,2 \text{ грн,}$$

$$Ф_{бал}^{пр} = 38889,2 - 3913 + 119347 = 154323 \text{ грн,}$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{97223 \cdot 20 \cdot 10,0}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,820 \text{ грн,}$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{154323 \cdot 20 \cdot 3,14}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,409 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7.

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п.п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата робітника основна, додаткова з відрахуваннями у соціальні фонди	$B_з$	22,879	6,537,18409
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	1,781	0,559
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	1,855	0,582
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	0,879	0,276
5.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	3,215	1,009
6.	Амортизація обладнання	$B_а$	0,820	0,409
7.	Загальна сума	$B_е$	31,429	10,019

4.5. Розрахунок показників економічної ефективності проекту

4.5.1. Річний економічний ефект, який отримує підприємство від проектування, виготовлення та експлуатації хонінгувальної головки, а також модернізації вертикально-свердлильного верстата [31]:

$$E_р = (B_е^б - B_е^п) \cdot N_д - E_н \cdot K_д, \quad (4.18)$$

де: $B_е^б, B_е^п$ - відповідно річні експлуатаційні витрати у базовому та проектному варіанті, грн;

$N_д$ – річна програма випуску продукції, грн;

$E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $E_н$=0,16;

$K_д$ – додаткові капітальні витрати, грн

$$K_д = B_{пк} + B_т + C_{ін} \cdot к_{ін} + C_{шп} \cdot Q - Ц_{ін.б} \cdot K_{тм} \cdot к_{ін}, \quad (4.19)$$

де: $B_{пк}$ – вартість конструкторської підготовки виробництва інструменту та шпинделя верстата, грн;

$B_т$ –вартість технологічної підготовки виробництва інструменту та шпинделя верстата, грн;

$C_{ін}$, $C_{шп}$ - відповідно собівартість виготовлення інструменту та шпинделя (модернізації верстата), грн;

$к_{ін}$ - потреба в інструменті для виконання річної програми випуску деталей, шт./рік;

Q – потреба у верстатах для виконання річної програми випуску деталей, шт.;

$Ц_{ін.б}$ - ціна базового інструменту, грн;

$К_{тм}$ - коефіцієнт, який враховує транспортні, митні витрати та податок на додану вартість.

$$К_д = 115945 + 151884 + 26408 \cdot 1 + 119347 \cdot 1 - 101200 \cdot 1,32 \cdot 1 = 280000 \text{ грн.}$$

$$E_р = (31,429 - 10,019) \cdot 3600 - 0,16 \cdot 280000 = 32300 \text{ грн.}$$

4.5.2. Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{К_в}{\left(B_е^{баз} - B_е^{пр}\right) \cdot N_д} = \frac{280000}{(31,429 - 10,019) \cdot 3600} = 3,6 \text{ роки} \qquad (4.20)$$

4.5.3 У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників (табл. 4.8).

Таблиця 4.8.

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№	Показники	Одиниця	Варіанти		Зміна (±), %
			Базовий	Проект	
1.	Програма модернізації верстатів	шт./рік	1	1	-
2.	Річний випуск продукції	шт./рік	3600	3600	-
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	10,0	3,14	-68,6
4.	Потреба в інструменті для виконання річної програми випуску деталей	шт.	1	1	-
5.	Коефіцієнт завантаження верстата	$\eta_з$	0,15	0,05	-66,7
6.	Витрати підприємства, в т.ч.: - на підготовку виробництва	грн грн	133584 -	413584 267829	+209,6 -

	- на інструмент - на модернізацію верстату	грн грн	133584 -	26408 119347	-80,2 -
7.	Балансова вартість верстату	грн	97223	154323	+58,7
8.	Залишкова вартість верстату на момент модернізації	грн	-	38889	-
9.	Собівартість одиниці обробки із застосуванням інструменту та модернізованого верстату	грн	31,429	10,019	-68,1
10	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	-	3,6	-
11	Річний економічний ефект	грн	-	32300	-

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Дана кваліфікаційна робота виконана з дотриманням основних вимог діючих стандартів. Графічна частина оформлена згідно вимог ЕСКД.

Конструкторські і економічні розрахунки, виконані в даній кваліфікаційній роботі, доводять переваги використання нового модернізованого стенда, підвищення продуктивності праці, зниження собівартості та покращення якості продукції, підвищення надійності та довговічності технічних засобів, покращення умов праці та створення безпечних екологічних умов.

В загальній частині проаналізовані основні деталі та їх призначення. Описано роботу діючого стенду та контролюємі параметри.

В конструкторській частині розглянуто наскрізну структурну уніфікацію КГГП. Розроблено програми і методики по елементних і комплексних випробувань, що дає змогу швидко налаштувати стенд і визначити необхідні параметри.

В дослідній частині були розглянуті варіанти синтезу енергоефективності рейкової передачі. Була розроблена математична модель для визначення ефективної роботи КГГП. Проведені експериментальні дослідження.

Модернізація стенду спрямована на його автоматизацію, оснащення комп’ютерною технікою і спрощення роботи оператора, що дає змогу значно зменшити час випробувань і в автоматичному режимі побудувати графіки розподілу вимірювальних параметрів.

Проведені дослідні випробування на стенді дали позитивні і постійні результати по роботі стенду, збоїв в роботі не спостерігалося.

Всі прийняті технічні рішення підтверджено економічними розрахунками

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Klocke, F. (2009). Manufacturing processes 2: Grinding, honing, lapping. Springer.

2. Zahouani, H., & El Mansori, M. (2017). Multi-scale and multi-fractal analysis of abrasive wear signature of honing process. Wear, 376-377, 178-187.

3. Lawrence, K. D., & Ramamoorthy, B. (2016). Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines. Applied Surface Science, 365, 19-30.

4. Demirci, I., Mezghani, S., Yousfi, M., & El Mansori, M. (2016). Impact of superficial surface texture anisotropy in helical slide and plateau honing on ring-pack performance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 230(8), 1030-1037. https://doi.org/10.1177/1350650115623452

5. Shcherbyna, K., Hrechka, A., Mazhara, V., & Diachenko, T. (2020). Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, 50, 159-164. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.159-164

6. Підгаєцький, М. М., & Щербина К. К. (2012). Утворення складної траєкторії руху зерна при хонінгуванні отворів. Вісник Чернігівського державного технологічного університету «Технічні науки», 3(59), 77-81. Електронний архів ЦНТУ.

7. Щербина К., Торчілов Д., Заїка А., Мандзюк Д., Системи регулювання радіального розміру хона для обробки малих діаметрів // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2025. – 359 № 6.2 (2025). – С.174-179.

8. Щербина К.К. Експериментальне дослідження деформації пружно-гвинтового хона / К.К. Щербина, М.М. Підгаєцький, В.А. Мажара, А.І. Гречка, Т.В. Дяченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 31-38.

9. Немченко Т.А. Забезпечення академічної доброчесності в контексті розвитку штучного інтелекту с. 502- 514/ Немченко Т.А., Сторожук О.В., Щербина К.К./ Наука і техніка сьогодні журнал 2024 №1(29) м. Київ 2024.

10. Динамічний аналіз кільково-клинового хону в зоні малих переміщень / К.К. Щербина, В.А. Мажара, Д.Р. Торчілов, С.М. Заїка, В.М. Масляніков / Вісник Хмельницького національного університету, No3,T.2,2024(337) с. 250-254

11. Мажара В.А. Система автоматизованого проєктування технологічного оснащення / В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.

12. Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка С., Масляніков В. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону з гвинтовими канавками // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2025. – №2 (349). – С.493-499. (Категорія Б).

13. Щербина К.К. Забезпечення академічної доброчесності в наукових дослідженнях в умовах використання штучного інтелекту с. 1347- 1359/ Щербина К.К, В'юник О.В. Немченко Т.А., Сторожук О.В.,./ Наука і техніка сьогодні журнал 2026 №2(56) м. Київ 2026 (Категорія Б). https://perspectives.pp.ua/index.php/nts/issue/archive

14. Zhang, Y.; Yang, Y.; Niu, J.; Gong, J. Study on the Impact of Honing Machine Reciprocating Reversing Acceleration upon Reticulate Pattern Trajectory. In Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012), Shanghai, China, 28–30 December 2012. [Google Scholar]

15. Edberg, S.; Landqvist, E. The Impact of Honing Process Parameters on the Surface Quality of Cylinder Liners. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015. [Google Scholar]

16. Harasymowicz, J.; Wantuch, E. Finishing. A Script for Students of Higher Technical Schools; Graphic Department of the Krakow University of Technology: Krakow, Poland, 1994.

17. Singh, V.; Agawal, V.P.; Deb, P. A decision making method for selection of finish process for a cylindrical surface. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Macao, China, 7–10 December 2010; pp. 38–42.

18. Wang, J.; Shao, Y.; Zhu, X. Kinematics analysis and experimental study on ultrasonic vibration honing. In Proceedings of the International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009), Xi'an, China, 12–14 October 2009.

19. Журило І.В. Конкурентоспроможність нової продукції промислово-виробничого призначення: теоретичні аспекти, методика прогнозування та забезпечення: Монографія. Кіровоград: ПВЦ «Мавік», 2007. 186 с.

20. Тормоса Ю. Г. Ціни та цінова політика: Навч. посібник. К.: КНЕУ, 2001. 122 с.

21. Журило І.В., Брагінець Т.П. Визначення технічного рівня (якості) і ціни реалізації нового виробу на ранніх етапах його проєктування. Проблеми і перспективи економічного розвитку в умовах модернізаційних процесів в Україні та світі: матеріали Всеук. наук.-практ. конф. (12 грудня 2023 р.). ЦНТУ, 2023. С. 49-52.

22. Годунко М.О. Основи 3D моделювання і робототехніки: Навч. посіб. для проведення практичних занять / М.О. Годунко, А.І. Гречка. – К. : 7БЦ, 2024. – 42 с.

23. Мажара В.А. Система автоматизованого проектування технологічного оснащення / В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.

24. Мажара В. А. Контрольно-вимірювальні пристрої. Методичні вказівки для виконання самостійної роботи студентами денної та заочної форми

навчання напрямку «Інженерна механіка» з профілюванням за спеціальністю «Технологія машинобудування». – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 48 с.

25. Мажара В. А. Технологічна оснастка. Методичні вказівки для виконання самостійної роботи студентами денної форми навчання напрямку «Інженерна механіка» з профілюванням за спеціальністю «Технологія машинобудування». – Кіровоград: КНТУ, 2009. – 44 с.

26. ДСТУ ISO 128-1:2005 Технічні Кресленики. Загальні принципи оформлення. [Чинний від 2019–01–01]. Київ, 2018.

27. ДСТУ EN ISO 10209:2018 Технічна документація на продукцію. Словник термінів щодо технічних креслеників, визначення виробів і відповідної документації. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2008.

28. ДСТУ ISO 5457:2006 Документація технічна на вироби. Розміри та формати. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2008.

29. ДСТУ ISO 5455:2005 Кресленики технічні. Масштаби. [Чинний від 2006- 07-01]. Київ, 2006.

30. ДСТУ ISO 3098-0:2006 Документація технічна на вироби. Шрифти. Загальні вимоги. [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2006.

31. ДСТУ ISO 128-20:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи подавання. Частина 20. Основні положення про лінії. [Чинний від 2007- 04-01]. Київ, 2007.

32. ДСТУ ISO 128-21:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 21. Лінії, виконані автоматизованим проектуванням. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

33. ДСТУ ISO 128-22:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 22. Основні положення та правила застосування 27 ліній виносок і полиць ліній-виносок. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

34. ДСТУ ISO 128-24:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 24. Лінії на машинобудівних кресленнях. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

35. ДСТУ ISO 128-30:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 30. Основні положення про види. [Чинний від 2007- 04-01]. Київ, 2007.

36. ДСТУ ISO 128 34:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 34. Види на машинобудівних кресленикаx. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

37. ДСТУ ISO 128-40:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 40. Основні положення про розрізи та перерізи. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, 2007.

38. ДСТУ ISO 128-44:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 44. Розрізи та перерізи на машинобудівних кресленикаx. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2005.

39. ДСТУ ISO 128 50:2005 Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 50. Основні положення про зображення розрізів і перерізів. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2006.

40. ДСТУ EN ISO 1302:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Познака зовнішньої текстури в технічній документації на продукцію. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

41. ДСТУ ISO 129 1:2007 Кресленики технічні. Проставлення розмірів і допусків. Частина 1. Загальні принципи. [Чинний від 2009-07-01]. Київ, 2010.

42. ДСТУ ISO 286-1-2002 Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок. [Чинний від 2003-10-01]. Київ, 2003. 28

43. ДСТУ EN ISO 2692:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Визначення геометричних допусків. Вимоги щодо максимуму матеріалу (MMR), мінімуму матеріалу (LMR) та взаємодії (RPR). [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

44. ДСТУ ISO 2768-1:2001 Основні допуски. Частина 1. Допуски на лінійні та кутові розміри без спеціального позначення допусків. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

45. ДСТУ ISO 2768-2:2001 Основні допуски. Частина 2. Допуски геометричні для елементів без спеціального позначення допусків. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

46. ДСТУ ISO 5458-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Встановлення геометричних допусків. Позиційні допуски. [Чинний від 2003-01-01]. Київ, 2002.

47. ДСТУ EN ISO 5459:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Геометричні допуски. Бази та системи баз. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

48. ДСТУ ISO 7083:2009 Кресленики технічні. Умовні познаки геометричних допусків. Співвідношення та розміри. [Чинний від 2011-07-01]. Київ, 2015.

49. ДСТУ ISO 10578:2014 Кресленики технічні. Допуски орієнтування та розташування. Виступне поле допуску. [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015.

50. ДСТУ EN ISO 6433:2018 Кресленики технічні. Позначення деталей. [Чинний від 2019-01-01]. Київ, 2018.

51. ДСТУ EN ISO 7200:2005 Розроблення технічної документації. Графи у штампах та основних написах. [Чинний від 2006-10-01]. Київ, 2007.

52. ДСТУ ISO 7573:2006 Кресленики технічні. Специфікація. [Чинний від 2001-06-27]. Київ, 2008.