Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

«Забезпечення надійного формування заданих параметрів поверхневого шару деталей при поверхнево-пластичній деформації»

«Ensuring reliable formation of specified parameters of the surface layer of parts during surface-plastic deformation»

Виконавець: здобувач гр. ГМ-24М-3
_____ Валентин ДИМУРА
Керівник: к.т.н., доц.
_____ Олександр ЛИСЕНКО
Рецензент: к.т.н., доц.
_____ Олег БЕВЗ
Зав. каф. ММіР: к.т.н., доц.
_____ Андрій ГРЕЧКА

Кропивницький – 2026

Анотація

ДИМУРА Валентин. Забезпечення надійного формування заданих параметрів поверхневого шару деталей при поверхнево-пластичній деформації. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2026. – 103 с. Матеріали презентації 9 іл.

Актуальність: для забезпечення заданої якості обробки широко використовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Однак технологічні можливості існуючих методів ППД багато в чому вичерпані відповідно до принципових особливостей і не завжди здатні забезпечувати все зростаюче підвищення вимог до їхньої ефективності за якісними показниками і зносостійкості. Це обумовлює доцільність розробки і дослідження нових методів поверхневого деформування, що усуває недоліки відомих технологій і збільшує їх переваги.

Метою роботи є підвищення фізико-механічних властивостей оброблювальної поверхні шляхом збільшення ефективності процесу поверхневого пластичного деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою управління процесом обробки.

Практичне значення: За результатами роботи запропоновано методику створення накатного інструменту, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості при забезпеченні необхідної якості оброблювальної поверхні деталей обертання.

Ключові слова: пластична деформація, деформуючий елемент, накатування поверхні, контактна зона, зміцнення.

Annotation

DYMURA Valentyn. Ensuring reliable formation of specified parameters of the surface layer of parts during surface-plastic deformation. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, city Kropyvnytskyi, 2026. - 103 p. Presentation materials 9 slides.

Relevance: Surface plastic deformation (SPD) is widely used to ensure a given quality of processing. However, the technological capabilities of existing SPD methods are largely exhausted in accordance with their fundamental features and are not always able to meet the ever-increasing requirements for their efficiency in terms of quality indicators and wear resistance. This makes it advisable to develop and research new surface deformation methods that eliminate the shortcomings of known technologies and increase their advantages.

The purpose of this work is to improving the physical and mechanical properties of the machined surface by increasing the efficiency of the surface plastic deformation process by using an elastic rolling tool with a machining process control system.

Practical meaning: Based on the results of the work, a method for creating a knurled tool was proposed, which allows to improve the physical and mechanical properties while ensuring the required quality of the machined surface of rotating parts.

Key words: plastic deformation, deforming element, surface rolling, contact zone, strengthening

Форма № Н-9.01

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММіР
Андрій ГРЕЧКА
«__ _» _____ 2025 р.

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

Валентин ДИМУРА
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Забезпечення надійного формування заданих параметрів поверхневого шару деталей при поверхнево-пластичній деформації
Ensuring reliable formation of specified parameters of the surface layer of parts during surface-plastic deformation

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

затверджені наказом ЦНТУ від «01» грудня 2025 р. № 83-13

3. Строк подання роботи до захисту 15 травня 2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є підвищення фізико-механічних властивостей оброблювальної поверхні шляхом збільшення ефективності процесу поверхневого пластичного деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою управління процесом обробки.

Завдання:
– проаналізувати застосовувані методи досягнення заданої якості поверхонь деталей;
– визначити геометричні параметри та напруження в контактній зоні деформуючого елементу та деталі;
– визначення впливу конструктивних параметрів деформуючих елементів на якість обробки пружно-пластичним деформуванням;
– створити методику та розробити конструкцію обкатника, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості оброблювальної поверхні;
– розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Олександр ЛИСЕНКО		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Грудень 2025	
2.	Вступ	Січень 2026	
3.	Мета та задачі роботи	Січень 2026	
4.	Методика роботи	Лютий 2025	
5.	Теоретична робота	Березень-квітень 2025	
6.	Визначення економічної ефективності	Квітень-травень 2025	
7.	Висновки	Травень 2025	
8.	Оформлення роботи	Травень 2025	
9.	Здача роботи на кафедру	Травень 2025	

Дата видачі завдання
«_____» _____ 2025 р.

Керівник роботи _____ Олександр ЛИСЕНКО
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_____» _____ 2025 р.

Здобувач _____ Валентин ДИМУРА
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП..... 8

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПРУЖНО- ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ..... 11

1.1. Існуючі методи досягнення заданої якості робочих поверхонь деталей..... 11

1.2. Якість і продуктивність при обробці ППД..... 14

1.3. Забезпечення та характеристика процесу ППД..... 20

1.4. Сили деформування, шорсткості поверхні та глибини зміцнення ППД..... 26

1.5. Мета і завдання дослідження..... 35

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЗАЄМОДІЇ ДЕФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ДЕТАЛЕЙ ОБЕРТАННЯ НА ЯКІСТЬ ОТРИМАНОЇ ПОВЕРХНІ..... 37

2.1. Визначення геометричних параметрів контактної зони..... 37

2.2. Напруження в контактній зоні деформуючого елементу та деталі..... 49

2.3. Означення факторів, що впливають на якість обробки ППД..... 55

2.4. Дослідження впливу конструктивних параметрів деформуючих елементів на геометрію контактної зони..... 57

2.5. Глибина зміцнення поверхневого шару заготовки в залежності від параметрів деформуючого елемента..... 67

3. КОНСТРУКЦІЯ ТА КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ОБКАТНИКА..... 75

3.1. Обкатник для обробки зовнішніх поверхонь тіл обертання..... 75

3.2. Особливості конструкції обкатного інструменту..... 78

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБКАТНИКА 81
4.1. Загальні вихідні дані до розрахунку 81
4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва 83
4.3. Визначення витрат на виготовлення інструменту 84
4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) 87
4.5. Розрахунок показників економічної ефективності 92
ВИСНОВКИ 94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 95

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток машинобудування зумовлює постійне зростання вимог до якості деталей машин, зокрема до точності їх геометричних параметрів, стабільності форми, стану мікрорельєфу поверхні та комплексу фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Особливого значення набувають експлуатаційні характеристики деталей, серед яких зносостійкість, опір втомному руйнуванню, корозійна стійкість, контактна міцність і здатність зберігати працездатність упродовж тривалого часу. Саме поверхневий шар у більшості випадків сприймає основні силові, температурні, контактні та корозійні впливи під час роботи виробу, тому його стан суттєво впливає на надійність, довговічність і ресурс машин.

Формування необхідних параметрів поверхневого шару переважно здійснюється на завершальних етапах технологічного процесу виготовлення деталей. При цьому вирішальну роль відіграють методи фінішної обробки, які забезпечують не лише отримання заданої шорсткості та точності, а й цілеспрямовану зміну структури, залишкових напружень і механічних властивостей приповерхневої зони. У цьому випадку методи пружно-пластичного формування поверхонь деталей є важливим технологічним засобом підвищення експлуатаційної надійності виробів, оскільки дозволяють керовано впливати на стан поверхневого шару без істотного зняття матеріалу.

Тривалий час для забезпечення заданої якості обробки широко використовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Однак технологічні можливості існуючих методів ППД багато в чому вичерпані відповідно до принципових особливостей і не завжди здатні забезпечувати все зростаюче підвищення вимог до їхньої ефективності за якісними показниками і зносостійкості. Це обумовлює доцільність розробки і дослідження нових методів поверхневого деформування, що усуває недоліки відомих технологій і збільшує їх переваги.

Для визначення напряму роботи проаналізовано існуючі методів ППД по їхніх технічних можливостях: якості обробленої поверхні, продуктивності процесу і т.д.

Аналіз показав, що найбільш перспективним видом чистової оздоблювальної обробки деталей машин, що забезпечують високу якість їх робочих поверхонь, є удосконалювання і розвиток нових технологічних процесів, зокрема ППД, що забезпечують одержання стабільного і рівномірного наклепу (зміну фізико-механічних властивостей) по поверхні і глибині металу.

Управління процесом обробки дозволить вирішити проблеми підвищення якості і надійності отримання заданих параметрів матеріалу поверхневого шару заготовок під час застосування методів ППД.

Запропоновано метод обробки, заснований на застосуванні в пружній державці інструмента системи автоматичного управління, яка регулює взаємодію деформуючого робочого елемента інструмента з оброблюваною деталлю.

Використання запропонованого принципу створення накатних інструментів дозволить обробляти деталі з високою вихідною шорсткістю, одержуючи при цьому поверхневий шар високої якості, з регульованими в широких межах параметрами зміцнення.

Мета роботи і завдання роботи.

Метою роботи є підвищення фізико-механічних властивостей оброблювальної поверхні шляхом збільшення ефективності процесу поверхневого пластичного деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою управління процесом обробки.

Завдання:

– проаналізувати застосовувані методи досягнення заданої якості поверхонь деталей;

– визначити геометричні параметри та напруження в контактній зоні деформуючого елементу та деталі;

– визначення впливу конструктивних параметрів деформуючих елементів на якість обробки пружно-пластичним деформуванням;

– створити методику та розробити конструкцію обкатника, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості оброблювальної поверхні;

– розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

Об’єкт дослідження – пружно-пластичне деформування поверхневого шару (наклеп) по поверхні і глибині металу заготовки.

Предмет дослідження – підвищення фізико-механічних властивостей оброблювальної поверхні пружно-пластичним деформуванням накатним інструментом.

Наукова новизна роботи:

– на основі застосування методу перетинів ролика й оброблюваної деталі двома перпендикулярними площинами отримані математичні залежності для визначення всіх геометричних параметрів контактної зони при обробці деталей ППД роликами будь-яких типорозмірів;

– встановлено вплив конструктивних параметрів деформуючого елемента та технологічних параметрів процесу обробки на якість поверхневого шару деталей обертання, оброблених поверхневим пластичним деформуванням.

Практична цінність.

За результатами роботи запропоновано методику створення накатного інструменту, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості при забезпеченні необхідної якості оброблювальної поверхні деталей обертання.

Апробація результатів роботи.

Матеріал, наведений у роботі був представлений на LX науковій конференції здобувачів вищої освіти Центральноукраїнського національного технічного університету, присвяченої до "Дня науки-2026", яка відбулась 22-23 травня 2026 року. (https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/59f204a0-e800-4e97-aeac-d2fa1fd7d2b5/content#page=99). За матеріалами доповіді опубліковані тези конференції.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

1.1. Існуючі методи досягнення заданої якості робочих поверхонь деталей

Підвищення якості поверхневого шару деталей машин значною мірою пов’язане з використанням методів пружно-пластичного деформування, які забезпечують формування необхідного стану приповерхневої зони без істотного зняття матеріалу. До таких методів належать вигладжування, обкочування роликами, дорнування та інші способи фінішної зміцнювальної обробки. Їх застосування дозволяє не лише зменшити висоту мікронерівностей, а й підвищити мікротвердість поверхневого шару, сформувати сприятливі залишкові напруження стиску та покращити експлуатаційні властивості деталей.

Для забезпечення заданої точності, шорсткості та стабільної якості поверхні технологічний маршрут виготовлення деталі має включати як попередню, так і завершальну обробку. Чорнові операції призначені для видалення основної частини припуску, формування базових геометричних параметрів заготовки та підготовки поверхні до наступних чистових або зміцнювальних переходів. На цьому етапі можуть застосовуватися токарно-гвинторізні, безцентрово-шліфувальні та інші верстати, вибір яких залежить від форми деталі, матеріалу заготовки, величини припуску та вимог до подальшої обробки.

Однак саме на чорнових переходах часто виникають умови, що негативно впливають на якість обробленої поверхні. Через значні технологічні навантаження інструмент, заготовка, пристосування і верстат працюють в умовах підвищеного силового впливу. Це може спричиняти збільшення пружних деформацій елементів технологічної оброблювальної системи, зниження її жорсткості та появу автоколивань або вимушених вібрацій. Крім того, ускладнене підведення ЗОР до зони контакту інструмента із заготовкою може призводити до погіршення теплового режиму, прискореного зношування інструмента та нестабільності параметрів поверхневого шару [35, 39, 49, 62].

У якості чистової обробки для забезпечення низької шорсткості (*Ra* = 0,12...0,63 мкм) може застосовуватися абразивна обробка або поверхневе пластичне деформування (ПДД). Обробка циліндричних валів шліфуванням, а саме хонінгуванням. Незважаючи на те, що хонінгування є одним з точних методів обробки, дозволяє досягти низької шорсткості, проте по продуктивності поступається іншим методам, у тому числі й тонкому точінню, а обробка маловуглецевих незагартованих сталей при хонінгуванні приводить до швидкого засалювання абразивних шліфувальних кіл, що вимагає частої правки та викликає підвищену витрату абразивного матеріалу.

Шорсткість поверхні, одержана при шліфуванні, досягає значень *Ra* = 0,32...0,63 мкм. З підвищенням вимог до одержуваної шорсткості знижується продуктивність у зв'язку зі зменшенням поздовжньої подачі, а застосування дрібнозернистих абразивних інструментів веде до їх більше інтенсивного засалювання.

У випадку, коли необхідно одержати більш низьку шорсткість, застосовують додаткову абразивну обробку дрібнозернистими абразивними кругами, пелюстковими кругами або поліруванням повстяними кругами з нанесенням на них полірувальних паст. Недолік процесу – низька стійкість кругів і, пов'язані із цим, часті зупинки обладнання для їх заміни, нестабільна якість поверхні, погані санітарні умови праці, шаржування абразиву в поверхню деталі.

Загальним недоліком абразивної обробки є ефект шаржування сторонніх абразивних часток в оброблювану поверхню, особливо при обробці м'яких матеріалів (маловуглецеві сталі, мідь, алюміній і його сплави), а також несприятливі санітарні умови праці верстатників.

Відомо, що після зміцнювальної обробки ППД змінюється шорсткість поверхні деталей. Причому застосування деяких способів зміцнення підвищує шорсткість обробленої поверхні (накочування), зміна інших збільшує шорсткість (дробеструменева обробка), але у всіх випадках вихідна і кінцева шорсткість, як правило, взаємозалежні: вихідна шорсткість визначається в залежності від використовуваного способу обробки. Шорсткість деталі до обробки ППД

залежить від процесу її виготовлення, змінити який не завжди можливо. Коли задані вихідна і кінцева шорсткості, то вони виступають як обмеження на застосовність способів зміцнення деталі в цілому або окремих її ділянках [7,12, 21, 32].

На етапі чистової обробки перспективною альтернативою абразивним методам є застосування поверхнево-пластичного деформування. На відміну від процесів, пов'язаних зі зняттям матеріалу, ППД забезпечує формування необхідного стану поверхні переважно за рахунок пластичного перерозподілу мікронерівностей і ущільнення приповерхневого шару. У процесі такої обробки відбувається згладжування виступів мікрорельєфу заготовки, що супроводжується підвищенням мікротвердості, зміцненням поверхневого шару та формуванням залишкових напружень стиску, які позитивно впливають на експлуатаційну надійність деталі.

Важливою перевагою методів ППД є відсутність характерних для абразивної обробки негативних явищ. Зокрема, не відбувається шаржування поверхні сторонніми абразивними або іншими твердими частинками, зменшується ризик появи термічних пошкоджень і припіків, а також забезпечуються умови для стабільнішого формування поверхневого шару. Крім того, використання ППД дає змогу отримувати частково або повністю регулярний мікрорельєф, що є важливим для підвищення зносостійкості, контактної міцності та працездатності деталей у вузлах тертя [2-4, 23, 47].

Однак ППД відноситься не до розмірної, а до оздоблювально-зміцнюючої обробки без зняття припуску металу. Тому для отримання необхідної якості приповерхневого шару та, якщо необхідно, точних розмірів деталі йому повинен передувати один з видів розмірної обробки різанням.

На рис. 1.1. приведена порівняльна вартість різних методів обробки деталей і шорсткість, яка досягається за допомогою цих методів [35].

Із представленої діаграми (рис. 1.1) зі збільшенням точності при досягненні більш низької шорсткості вартість обробки різко збільшується. Найменша вартість відповідає обробці обкочуванням і розточуванням. Одночасно із цим досягається й висока продуктивність, а шорсткість при обкочуванні порівнянна із шорсткістю, що досягається при суперфінішуванні.

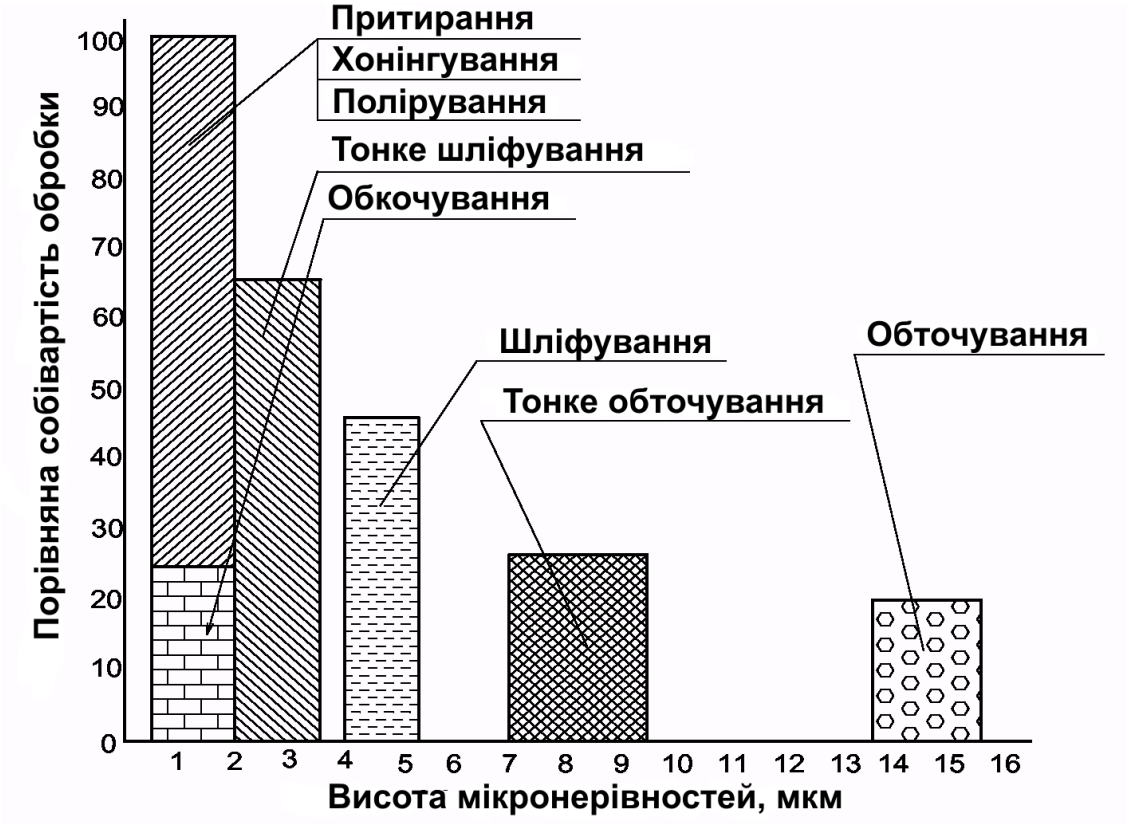


Рис. 1.1. Порівняльна вартість різних методів чистової обробки й шорсткості поверхні, яка досягається цими методами
(за даними фірми «Hegenscheide»)

Таким чином при поєднанні в технології виготовлення деталей обробки різанням і ППД загальна вартість обробки менше на 40 %, в порівнянні з фінішними методами абразивної обробки: хонінгування, притирання й доведення.

1.2. Якість і продуктивність при обробці ППД

Економічна доцільність комплексного забезпечення якості деталей на всіх етапах життєвого циклу призвела до необхідності аналогічного підходу і до робочих поверхонь деталей [53].

У проблемі підвищення довговічності деталей машин якість поверхні завжди мало велике значення. Якість оброблюваних поверхонь деталей машин визначається не тільки геометричними параметрами, але й іншими, зокрема хімічними, механічними, фізичними та ін. параметрами приповерхневих шарів та

напруженим станом. Ці шари характеризуються, як правило, мікротвердістю, структурними і фазовими перетвореннями, величиною, знаком і глибиною поширення залишкових напруг, щільністю дислокацій і концентрацією вакансій, деформацією зерен і кристалічних решіток металу, та іншими параметрами. Найбільше повно комплекс параметрів, що характеризують стан поверхневого шару деталей після будь-якої технологічної обробки, представлений у роботах [50-52, 64] і відображає як геометричне, так і механо-фізико-хімічний стан поверхневого шару.

Формування параметрів якості поверхневого шару при механічній обробці обумовлено наступними обставинами [64]. По-перше, сумарним впливом на металеву поверхню деталі різних факторів: кінематичних, силових, теплових, фізико-хімічних і ін., як на попередніх, так і на остаточних операціях обробки. По-друге, поверхневий шар характеризується особливим енергетичним станом атомів, що зумовлює підвищену вільну поверхневу енергію та значну здатність до адсорбційної взаємодії. Специфіка стану зовнішньої поверхні полягає в тому, що атоми металу, які її формують, мають тільки однобічні зв'язки (у тіло металу) у порівнянні з атомами, що знаходяться в більш глибоких частинах поверхневого шару (в обсязі тіла). Унаслідок чого вони знаходяться в неврівноваженому стані, володіють надлишкової (вільної) енергією і більш активні.

Таким чином, змінюючи в потрібному напрямку структурно-енергетичний стан поверхневого шару деталей, можна поліпшувати і стабілізувати фізичні, хімічні й інші параметри, властивості його, що роблять великий вплив на механізм руйнування в експлуатації. Дана зміна параметрів стану і властивостей поверхневого шару може бути, досягнуто тільки за певних умов і методах зміцнювальної обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

У сучасному машинобудівному виробництві поверхневе пластичне деформування набуло значного поширення як ефективний метод фінішної та зміцнювальної обробки деталей. Його застосовують під час виготовлення виробів зі сталей, чавунів, кольорових металів та їх сплавів. Основна технологічна мета ППД полягає у цілеспрямованому поліпшенні стану поверхневого шару, зокрема

зменшенні шорсткості, підвищенні мікротвердості, формуванні сприятливих залишкових напружень і покращенні експлуатаційних властивостей деталей.

Статистика показує [61], що більш 80% машин і механізмів, апаратів і приладів виходить з ладу в результаті зносу деталей, що працюють на тертя – підшипників, зубчастих коліс, цапф, муфт, шліцьових з'єднань, деталей ущільнень і різних напрямних. На зносостійкість у великому ступені впливає якісний стан приповерхневого шару, який характеризується мікрогеометрією, структурою, зміцненням і залишковими напругами. Властивості поверхневого шару деталей у процесі тертя піддаються змінам, інтенсивність і характер яких залежать від процесів пластичного деформування оброблюваного металу.

Поверхнево-пластичне деформування належить до найбільш ефективних і технологічно доступних методів підвищення працездатності, довговічності та експлуатаційної надійності деталей машинобудівного призначення [54]. Його застосування дає змогу цілеспрямовано змінювати стан поверхневого шару без істотного зняття матеріалу, що особливо важливо на фінішних і зміцнювальних операціях обробки.

Унаслідок дії деформувального інструмента в приповерхневій зоні деталі відбувається комплекс змін геометричного та фізико-механічного характеру. Зокрема, підвищуються твердість і міцність поверхневого шару, формується сприятливий залишковий напружений стан, зменшується значення параметра шорсткості Ra, збільшуються радіуси заокруглення вершин мікронерівностей, а також зростає відносна опорна довжина профілю. Такі зміни сприяють покращенню контактної взаємодії поверхонь, підвищенню їхньої зносостійкості та стабільності роботи деталей у вузлах тертя.

Важливу роль у забезпеченні довговічності деталей відіграють залишкові напруження, що виникають у поверхневому шарі після обробки. Особливо корисними є стискальні залишкові напруження, оскільки вони частково компенсують розтягувальні напруження, які виникають під дією експлуатаційних навантажень. Завдяки цьому зменшується ймовірність зародження та поширення мікротріщин, підвищується опір втомному руйнуванню і зростає циклічна міцність деталей машин та елементів конструкцій.

Поверхневе пластичне деформування, яке здійснюється без додаткового зовнішнього нагрівання і забезпечує формування поверхневого шару з наперед заданим комплексом властивостей, пов’язане з явищем наклепу [24–26, 46]. Наклеп супроводжується підвищенням опору металу пластичному деформуванню, зростанням твердості та міцності, але водночас призводить до зниження пластичності матеріалу. Таким чином, у процесі ППД формується зміцнений поверхневий шар, властивості якого істотно відрізняються від властивостей вихідного матеріалу.

Механізм зміцнення залежить від структурного стану оброблюваного матеріалу. У незагартованих сталях підвищення міцності поверхневого шару зумовлене переважно структурними змінами, збільшенням густини дислокацій, зміною характеру їх взаємодії, накопиченням вакансій, подрібненням блоків структури та виникненням мікронапружень. У загартованих сталях, крім зазначених процесів, можливі додаткові структурні перетворення, зокрема частковий перехід залишкового аустеніту в мартенсит і виділення дрібнодисперсних карбідних частинок.

Під дією поверхневої пластичної деформації у зернах металу виникають зсуви, відбувається пружне викривлення кристалічних ґраток, змінюються форма та розміри зерен. Інтенсивність зміцнення значною мірою залежить від початкової твердості матеріалу: чим м’якша сталь, тим виразніше проявляється ефект наклепу. Для незагартованих сталей приріст твердості може перевищувати 100 %, тоді як для загартованих сталей він зазвичай становить близько 10-20 %. При цьому глибина зміцненого шару за певних умов може досягати 12 мм і більше.

На сьогодні в галузі дослідження процесів поверхнево-пластичного деформування накопичено значний обсяг теоретичних і експериментальних даних. У наукових працях розглянуто вплив конструктивних, технологічних і режимних параметрів на продуктивність обробки, якість поверхні та фізико-механічний стан поверхневого шару. Узагальнення цих результатів свідчить, що кінцева якість деталей після ППД визначається не одним окремим параметром, а сукупною дією багатьох взаємопов’язаних факторів.

Аналіз результатів попередніх досліджень [1, 6, 8, 13, 16, 20, 34, 35, 40, 42, 44, 60] дає підстави виділити основні параметри, які найбільше впливають на

ефективність процесу. До них належать подача, кількість проходів, сила деформування, геометрія та розміри деформувальних елементів, кути їх установлення відносно оброблюваної поверхні, зокрема кут входження і кут самозатягування, а також вихідна шорсткість, твердість матеріалу та інші характеристики заготовки.

Особливістю процесу ППД є те, що швидкість деформування в досить широкому діапазоні не має вирішального впливу на якість сформованого поверхневого шару. Це створює передумови для підвищення продуктивності обробки без істотного погіршення якості поверхні. Водночас застосування мастильно-охолоджувальних або змащувальних середовищ має переважно допоміжне значення. Їх використання необхідне передусім для зменшення тертя, стабілізації теплового режиму в зоні контакту та запобігання перегріванню деформувального інструмента.

Наявність великої кількості величин, що впливають на якість поверхневого шару, ускладнює вибір раціонального поєднання їх значень. Для систематизації і наочного представлення взаємозв'язку конструктивних та технологічних чинників обробки і показників якості при ППД складена схема (рис. 1.2). На якій буквою *М* позначені маловивчений або відсутність інформації про взаємозв'язок.

Зі схеми виходить також, що переважна кількість як технологічних, так і конструктивних параметрів взаємозалежні між собою, причому вони, а також вихідні характеристики поверхні, визначають і фізико-механічні явища, що протікають у зоні контакту та в кінцевому підсумку це визначає експлуатаційні показники деталей машин.

У свою чергу, фізико-механічні процеси (розподіл напруг і деформацій у зоні обробки, прослизання, розподіл температур) при ППД, а також їхній взаємозв'язок з показниками якості, слабко вивчені, а по деяким з них інформація відсутня.

Теоретичний аналіз поверхневого пластичного деформування є важливою складовою обґрунтування режимів фінішної та зміцнювальної обробки. Найчастіше він виконується шляхом розроблення математичних моделей, які відображають взаємодію деформувального інструмента з поверхнею заготовки. За допомогою таких моделей можна описати форму та розміри контактної області,

характер розподілу контактних напружень, глибину поширення пластичної деформації, а також зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару після обробки.

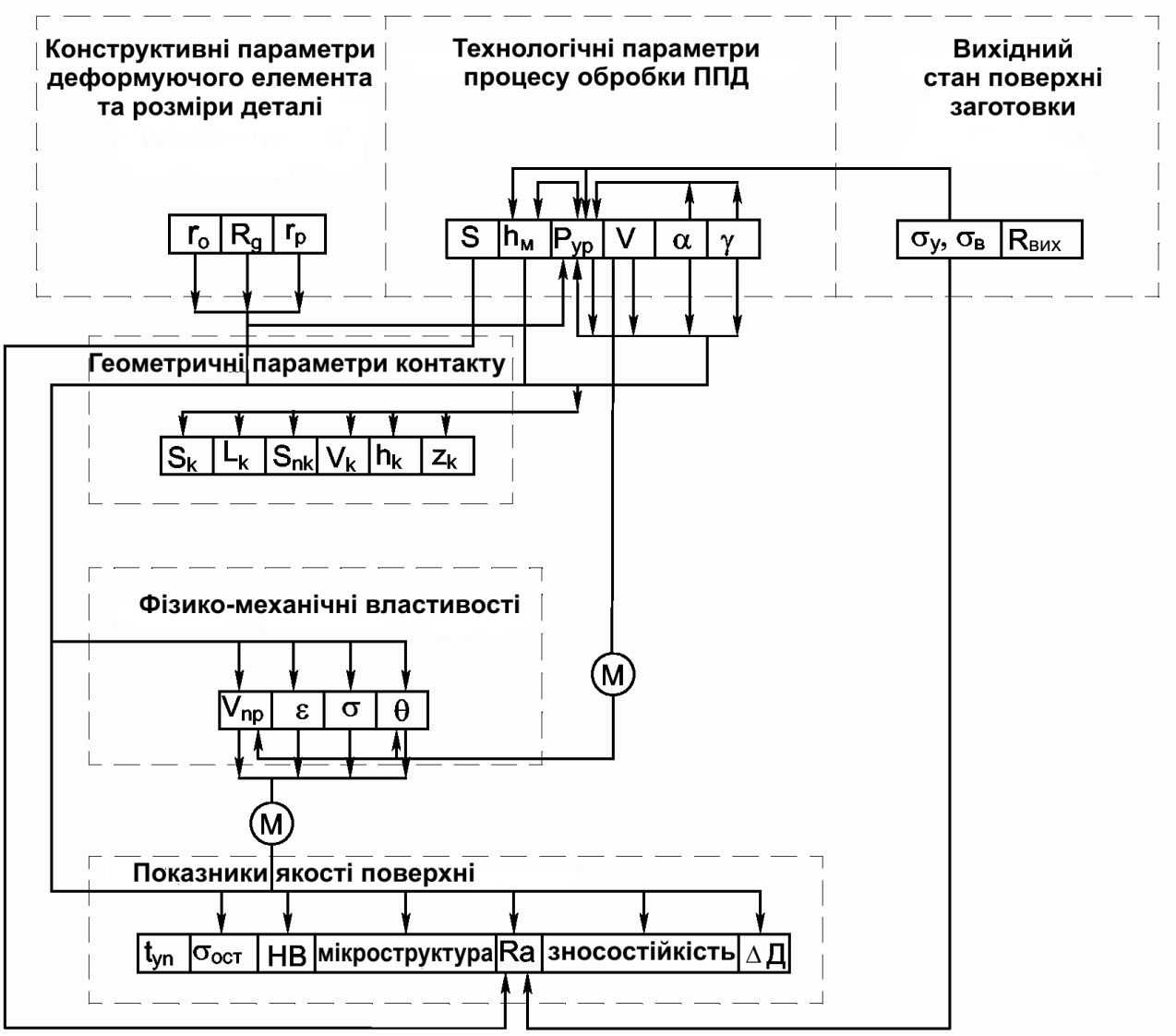


Рис. 1.2. Схема взаємозв'язку між конструктивно-технологічними параметрами і факторами обробки, фізико-механічними явищами в зоні контакту і показниками якості при обробці ППД роликами

Математичне моделювання дає змогу встановити залежність між параметрами процесу ППД і результатами обробки. Зокрема, воно використовується для прогнозування шорсткості, ступеня зміцнення, залишкових напружень, глибини деформованої зони та несучої здатності поверхні. Одночасно такі моделі можуть бути корисними для оцінювання силового навантаження на

інструмент, працездатності технологічного оснащення, жорсткості системи та умов стабільного перебігу процесу.

Разом із тим побудова адекватної теоретичної моделі ППД є досить складним завданням. Це пояснюється тим, що формування поверхневого шару відбувається внаслідок одночасної дії багатьох взаємозалежних процесів. У зоні деформування та прилеглих областях розвиваються пружні й пластичні деформації, змінюються механічні властивості металу, виникають контактні напруження, сили тертя та локальні теплові явища. Крім того, під дією деформування перебудовується макро- і мікроструктура матеріалу, змінюються форма мікронерівностей, залишковий напружений стан і топографія поверхні.

Саме багатофакторність процесу ППД ускладнює одержання універсальних аналітичних залежностей, які б однаково точно описували всі умови обробки. Тому під час теоретичних досліджень зазвичай застосовують певні припущення щодо властивостей матеріалу, геометрії контакту, характеру тертя, температурного режиму та схеми навантаження. Такі припущення дають змогу спростити математичний опис процесу, однак потребують подальшої перевірки результатів за допомогою експериментальних або чисельних методів.

1.3. Забезпечення та характеристика процесу ППД

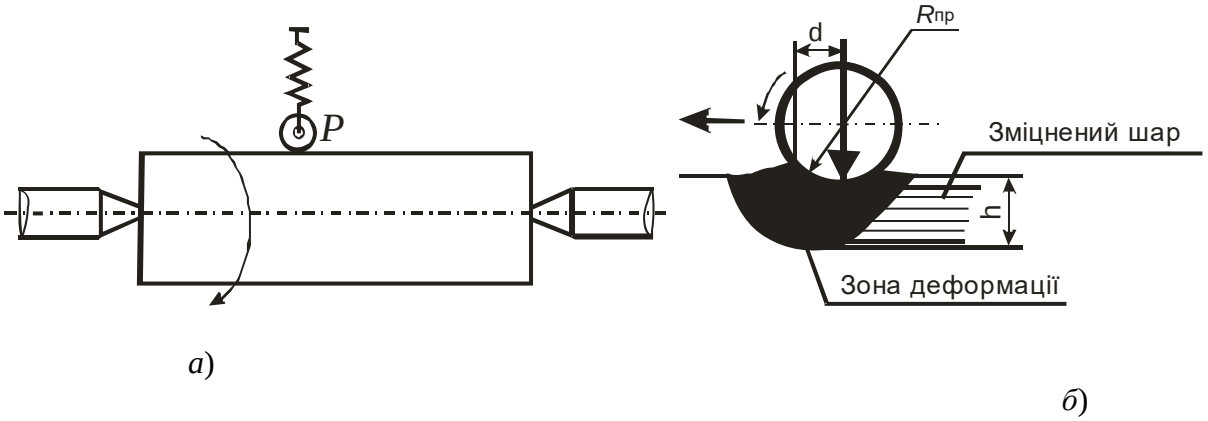
Найбільше широко застосовують способи обкатування і розкочування кульковими і роликовими обкатниками зовнішніх і внутрішніх циліндричних, плоских і фасонних поверхонь [36, 37, 54]. Тип верстатного обладнання обирають залежно від геометрії поверхні деталі: циліндричні зовнішні, внутрішні та фасонні поверхні здебільшого обробляють на токарних, револьверних і свердлильних верстатах, тоді як плоскі поверхні – на фрезерних або стругальних.

Відомі також методи обробки ППД з ультразвуком [55-57].

Під час поверхнево-пластичного деформування за схемою кочення робочий елемент інструмента, наприклад ролик або кулька, взаємодіє з поверхнею заготовки під дією заданого нормального зусилля P (рис. 1.3 *а*). На відміну від різання, у цьому випадку матеріал не видаляється, а зазнає локального

пластичного переміщення в зоні контакту. У процесі обробки деформувальний елемент переміщується відносно деталі та одночасно обертається, що забезпечує послідовне оброблення всієї необхідної ділянки поверхні.

У місці контакту інструмента із заготовкою виникає обмежена зона інтенсивного напружено-деформованого стану. Якщо контактні напруження перевищують межу текучості матеріалу, у поверхневому шарі розвивається пластична деформація. Ця зона не є нерухомою: вона переміщується разом із деформувальним елементом, унаслідок чого приповерхнева область деталі поступово зміцнюється на глибину *h* (рис. 1.3. *б*). Саме ця глибина характеризує поширення пластичного впливу від поверхні вглиб матеріалу.



а)

б)

Рис. 1.3 Схема оброби деталі коченням: *а* – схема обробки; *б* – зона деформації

Параметри зони деформування залежать від режимів і умов обробки. Зі збільшенням сили притискання *P* зазвичай зростають контактні напруження, глибина пластичної деформації та ступінь зміцнення поверхневого шару. Водночас на результат процесу впливають радіус, форма і матеріал деформувального елемента, величина подачі, початкова шорсткість, твердість заготовки та її здатність до пластичного деформування. Тому призначення режимів накочування має здійснюватися з урахуванням як властивостей матеріалу, так і геометрії оброблюваної поверхні.

Відповідно до термінології [9], поверхневе пластичне деформування, що здійснюється перекочуванням інструмента по поверхні деформованого матеріалу, називають накочуванням. Цей різновид ППД охоплює декілька технологічних схем, які відрізняються формою поверхні та напрямом дії інструмента. Для зовнішніх, опуклих і частини плоских поверхонь використовують обкатування, а для внутрішніх або увігнутих поверхонь, зокрема отворів, застосовують розкочування. Такий поділ дає змогу точніше визначати технологічну схему обробки залежно від конструктивних особливостей деталі.

При обробці обкатуванням на токарних верстатах деталь, що обкатується, у залежності від її конструкції, закріплюється в центрах або патроні, а обкатне пристосування (обкатник) – у різцетримачі. Робоча головка універсального обкатника (рис. 1.4) складається зі штока 1, у передній частині якого в пазу знаходяться два кулькових підшипники 2. На підшипники спирається деформуюча куля 3, що запобігається від випадіння ковпачком 4.

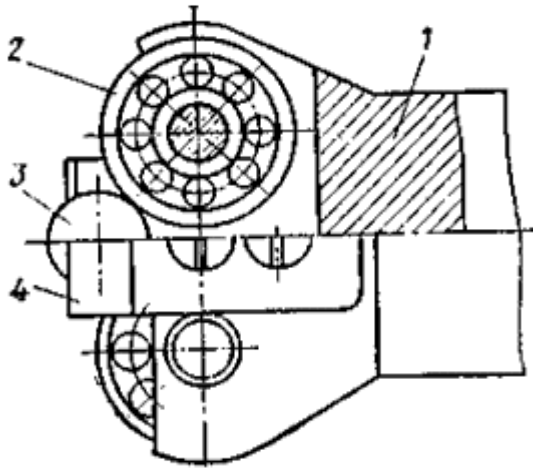


Рис. 1.4. Робоча головка кулькового обкатника

Широке застосування в промисловості методів ППД привело до створення численних конструкцій інструментів і схем обробки. Застосовувані в машинобудуванні конструкції обкатників можна розділити на два основних типи:

– обкатники з „твердим” контактом між деформуючим інструментом і оброблюваною поверхнею;

– обкатники з пружним контактом між деформуючим інструментом і оброблюваною поверхнею.

В обкатниках першого типу необхідна нормальна сила створюється за рахунок поперечної подачі обкатника, здійснюваної гвинтом поперечної подачі верстата. Обкатники з „твердим” контактом більш прості у виготовленні. Однак вони не можуть забезпечити рівномірного зміцнення всієї оброблюваної поверхні внаслідок неточностей форми заготовки, похибки її установки на верстаті, різного прогину по довжині деталі від тиску інструмента, наявності в основному металі різних включень з іншими механічними властивостями. Тому обкатники з „твердим контактом” не знайшли широкого застосування.

Обкатники з твердим контактом, налагоджуються суворо на визначений розмір. Недоліком цих конструкцій інструменту є розташування деформуючих роликів на підшипниках кочення.

Оскільки діаметри роликів повинні бути більше зовнішнього діаметра підшипників, на які вони встановлені, ті їхні діаметральні розміри зростають, отже, збільшуються розміри контактної зони, що знижує технологічні і деформуючі можливості.

Обробка обкатниками з пружним контактом між інструментом і оброблюваною поверхнею переважає. За характером навантаження деформуючих елементів інструменти з пружним контактом бувають пружинні, пневматичні, гідравлічні і комбіновані. Контакт здійснюється за допомогою тарованої пружини, а також за допомогою пневматичного або гідравлічного силового механізму. При пружному контакті траєкторія переміщення деформуючого інструмента в процесі обробки визначається формою вихідної заготовки. Оскільки нормальна сила при обробці зберігається постійної, то практично не змінюється і форма вихідної заготовки. Похибки встановлення також практично не відбиваються на результатах зміцнення. Отже, при пружному контакті досягається більш рівномірний наклеп всієї обробленої поверхні. Однак похибки форм деталі в цьому випадку не виправляються.

У процесі обробки деталь обертається, а деформуючий інструмент (куля), що знаходиться в контакті з оброблюваною поверхнею, разом з обкатаним пристосуванням має подовжню подачу. Завдяки самовстановлюваності кулі під час обкатування забезпечується його вільне обертання при терті катання між кулею і деталлю. У силу цього і створюються більш сприятливі умови для пластичної деформації, що забезпечують одержання менш шорсткуватої поверхні при невеликому тиску кулі.

На рис. 1.5. показана двухроликова головка пружна розкатна для обробки внутрішніх поверхонь глибоких отворів. Основою головки є корпус 1, також головка складається з важелів 2, роликів 3, сухарів 4, клина 5, пружини 6, гайок 7 і 8. Необхідне зусилля деформування при ППД забезпечується гвинтовою пружиною 6, а його регулювання гайкою 7. Ролики 3 розташовані у важелях 2 на голчастих підшипниках.

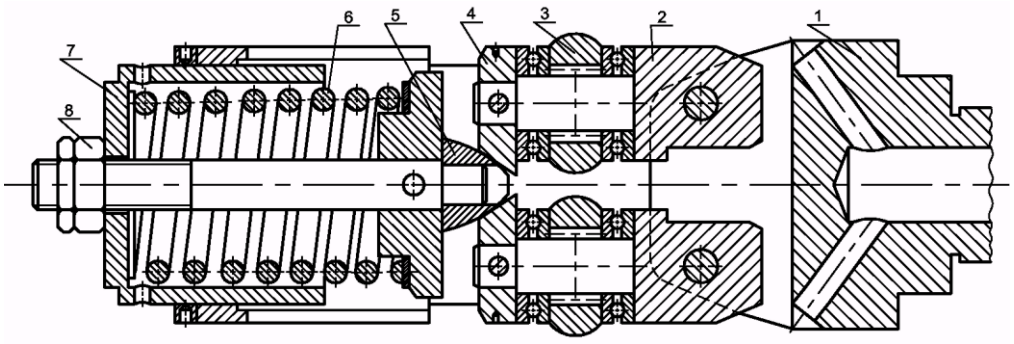


Рис. 1.5. Двухроликова пружна розкатна головка:
1 – корпус; 2 – важіль; 3 – ролик; 4 – сухар; 5 – клин; 6 – пружина; 7,8 – гайки

Застосування пружини збільшує піддатливість інструмента, але цілком не забезпечує стабільність процесу обробки, оскільки зсув пружини пропорційно її зусиллю стиску, тому буде мінятися одночасно величина натягу роликів. Для усунення вищезгаданих недоліків застосовують пневматичний і гідравлічний приводи для навантаження деформуючих елементів.

Конструктивно інструменти для обробки ППД умовно поділяються на дві категорії: інструменти безсепараторного і сепараторного типів.

Особливістю інструмента безсепараторного типу є те, що деформуючі ролики встановлюються на підшипники кочення. Для створення зусилля деформування, що деформують ролики навантажуються в радіальному напрямку до оброблюваної поверхні (див. рис. 1.4 та 1.5).

Ротаційні інструменти сепараторного типу виконуються за схемою планетарного обкатування. Планетарне обкатування здійснюється інструментом, деформуючі елементи якого під дією обертання деталі або оправки роблять складний рух: обертання навколо власної осі і планетарний рух навколо осі деталі.

На рис. 1.6. приведений жорсткий диференціальний розкатник, який містить деформуючі ролики 1, опорний конус 2, оправку 3, упорний підшипник 4, штифт 5, сепаратор 6.

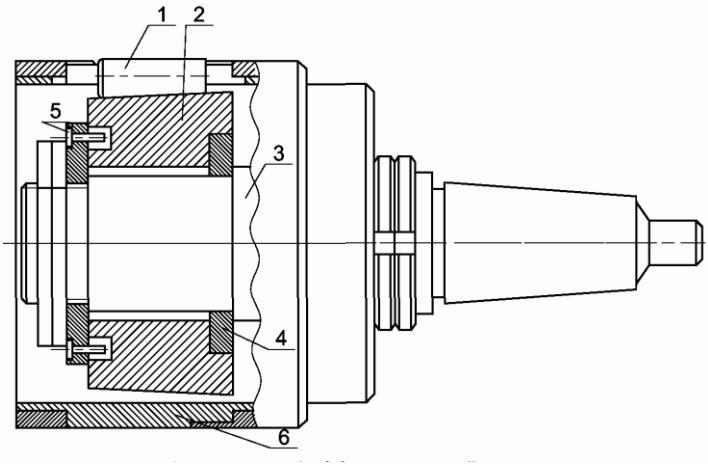


Рис. 1.6. Жорсткий диференціальний розкатник:
1 – ролик; 2 – опорний конус; 3 – оправка; 4– упорний підшипник;
5 – штифт; 6 – сепаратор

Ролики 1, знаходячись у процесі розкочування ввійшовши в оброблювану поверхню на величину 0,05...0,3 мм, котяться по оброблюваній деталі, спираючи на конус 2, що сприймає реактивне зусилля. Не маючи примусової осі обертання, деформуючі ролики фіксуються в необхідному положенні щодо деталі поверхнями пазів сепаратора 3, яка за формою і розмірами збігається з формою і розмірами деформуючих роликів.

При обробці заготовок виду порожнистих валів з нежорсткими стінками для зменшення зусилля, що сприймається заготовкою, рекомендують

застосовувати деформуючі елементи, що дають первісний точковий контакт (алмазні вигладжувачі й кулькові обкатники) [14, 22, 38], а для збільшення продуктивності багатороликові обкатники зі стрижневими циліндричними й конічними роликами або роликами сильно витягнутої бочкоподібної форми [2-4, 23, 29, 63].

Обкатування роликами (як правило, спеціально виготовленими для цієї мети) в порівнянні з обкатуванням кулями має наступні переваги:

– простоту конструкції й універсальність обкатаного пристосування (обкатника);

– застосуванням високоякісних і низьких по вартості стандартних кульок;

– створенням найвигідніших умов процесу обкатування завдяки самовстанавлюваності куль;

– досягненням високих контактних тисків при порівняно невеликих силах $P_н$, переданих з боку деформуючого інструмента на оброблювану поверхню деталі.

1.4. Сили деформування, шорсткості поверхні та глибини зміцнення ППД

Визначальним параметром процесу поверхнево-пластичного деформування є сила притискання деформувального елемента до оброблюваної поверхні. Саме вона значною мірою визначає інтенсивність контактної взаємодії, глибину поширення пластичної деформації, ступінь зміцнення поверхневого шару та характер формування мікрорельєфу. У зв’язку з цим установлення залежності між величиною прикладеного навантаження та показниками якості поверхні є одним із важливих завдань дослідження процесів ППД. Дослідники пропонують для визначення сили деформування ряд аналітичних залежностей. Однак єдність підходів у рішенні задач відсутній. При цьому характерно, що кожний з авторів при дослідженні пропонує і використовує свої власні розробки стосовно до особистих розглянутих питань.

Відома аналітична залежність для розрахунку середньої напруги, радіальної сили і площі контакту при обкатуванні кулею [45]:

$$p = \frac{P_H}{F_k}; \tag{1.1}$$

$$F_k = \frac{8}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_d \cdot R_p \cdot R}{R_d \pm R_p}} \cdot \left[\sqrt{(h + W) \cdot W} + W + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{W \cdot h} \right], \tag{1.2}$$

де $P_н$ – радіальне зусилля деформування;

$F_к$ – загальне значення площі контакту;

R – радіус профілю ролика;

W – пружна місцева деформація;

R_d – величина радіусу заготовки;

h – величина значення обтиснення 1;

R_p – величина радіусу кульки.

Залежність між діаметром відбитка d і навантаженням $P_н$ на кулю при його впровадженні в пружній і пластичній областях описується також рівнянням Мейєра:

$$P = a \cdot d^n, \tag{1.3}$$

де a і n – константи пластичності.

Розглянуті процеси реально протікають у більш складних умовах, тому приведені формули мають обмежене застосування. Незважаючи на це, вони характеризують основні силові залежності при ППД.

На можливість використання формул, що зв'язують силу і деформацію при статичному вдавленні деформуючого елемента, для випадку руху останнього по поверхні деталі вказує В. М. Браславский. У роботі [6] говориться, що ширина і кривизна перетину, утворені при русі інструмента, практично збігаються із шириною і кривизною відновленого відбитка. При обкатуванні деталей роликом формула для визначення зусилля деформування має вигляд

$$P = 1{,}475 HB^{1,1} \cdot \frac{b}{a}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{R_d} + \frac{b}{a}\left(\frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_\partial}\right)\right]^{0.3} \cdot \mu^{2,3} \cdot \sin^{2,3} \cdot \varphi_a, \qquad (1.4)$$

де D_p, r – діаметр і радіус профілю ролика;

D_d, R_d – діаметр і радіус кривизни оброблюваної деталі;

φ_a – кут входження ролика в площині подачі;

b та a – півосі еліпса контактної зони.

Значення кута входження φ_a передбачається встановлювати для сталей із твердістю по шкалі Бринелля НВ 140 рівним 2°30', а для більш твердих сталей вказує на необхідність поступового збільшення кута впровадження до $\varphi_a = 3°$ при *HB* до 400 одиниць.

Ґрунтовні дослідження виконані В. М. Торбило й А. С. Донсковим [14]. За основу рішення беруться положення теорії пружності, де пружні характеристики матеріалу приймаються деформації, що змінюються в залежності від ступеня. При цьому використовується складна система рівнянь, розв'язувана методом послідовних наближень. При визначенні зусилля деформування необхідно мати експериментальні залежності:

$$\sigma_i = \Phi(\varepsilon) \qquad (1.5)$$

де σ_i і ε – узагальнені напруги і деформації, що не завжди відомі для визначених сталей.

Тому в роботі [40] пропонуються методи розрахунку напруг на підставі врахування твердості металу *HV*. При цьому зв'язок сили деформування з якісними характеристиками обробленої ППД поверхні здійснюється двома шляхами. У першому випадку передбачається підстановка в розрахункове значення формули глибини входження h, відносна величина якої $\varepsilon = h/R$, де R – величина радіусу відбитка, визначає ступінь зміцнення і зниження шорсткості.

Другий шлях припускає безпосередній зв'язок між шорсткістю обробленої ППД поверховості і зусиллям деформування.

Існують праці, де визначають параметри процесу пластичної деформації через визначення значення безрозмірного тиску:

$$q = \frac{P}{F_k \cdot HV}, \tag{1.6}$$

де F_k – значення величини площі плями контакту;

HV – значення поверхневої твердість за шкалою Вікерса.

Разом з тим, існують методики призначення режимів ППД, через параметр B:

$$B = \overline{q} \cdot N^m, \tag{1.7}$$

де $N = \frac{a_k}{S} \cdot i$ – велична циклів навантаження обробної поверхні;

$a_к$ – величина ширини плями контакту;

S – значення подачі на оборот;

i – значення кількості проходів. Однак, розглянута методика розрахунку доволі громіздка і незручна у застосуванні [33].

У роботах [17-20] робиться спроба визначення законів розподілу тисків, деформацій і напруг за визначеною формою і розмірам поверхні контакту. При рішенні використовується метод перемінних параметрів пружності без обліку зміни форми плями контакту в результаті подачі і перекриття слідів деформуючого елемента

У роботах [27, 28] запропонована формула для призначення сили деформування в залежності від діаметра оброблюваного вала

$$P = 50 + \frac{D_{B1}^2}{6}, \tag{1.8}$$

де D_{B1} – величина діаметру валу, який оброблюється.

У роботі [43] як розрахункову формулу пропонує використовувати залежність:

$$P = \frac{D_{B1} \cdot q^2}{0{,}12 \cdot E \cdot \left(\frac{D_{B1}}{d} + 1 \right)} \tag{1.9}$$

де d – діаметр ролика;

q – значення середнього тиску, величину q визначають як $q = 1{,}8...2{,}1(\sigma_m)$.

E – величина модулю пружності матеріалу,

Ще одна залежність по визначенню зусилля запропонована у роботі [2]:

$$P = P_0 \cdot k_{\alpha_0} \cdot k_{R_z} \cdot k_S \cdot k_\sigma \cdot k_d \cdot k_D, \tag{1.10}$$

де k_{a0} – коефіцієнт впливу заднього кута деформування;

k_{Rz} – коефіцієнт вихідних нерівностей;

k_S – коефіцієнт подачі;

k_σ – коефіцієнт твердості матеріалу;

k_d – коефіцієнт значення діаметру ролика;

k_D – коефіцієнт діаметру оброблюваної заготовки.

Відомі аналітичні залежності отримані у роботах [4, 63, 64]:

$$P = \frac{7{,}65 \cdot h_H \cdot \sigma_T}{1 + \mu \cdot tg\varphi_m} \cdot \sqrt{\frac{R_\partial \cdot R_p \cdot R_{np}}{R_\partial \pm R_p}} \cdot \left((\Delta h + \varepsilon) + \sqrt{(\Delta h + \varepsilon) \cdot \varepsilon} \right), \tag{1.11}$$

де R_∂ – величина радіусу заготовки;

R_p – значення радіусу накатного ролика;

$R_{пр}$ – значення радіусу профілю накатного ролика;

μ – величина коефіцієнту Пуассона;

Δh – значення величини обтиснення;

$\sigma_т$ – значення величини границі текучості;

h_H – величина коефіцієнту наклепу;

ε – значення місцевої пружної деформації і $P = F_k \cdot q$,

$$F_k = 2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{S_i}{R_{вих}} \cdot \sqrt{d_ш} \cdot \sum_{i=2}^{n/2} \left[\left(R_{вих} - R\right) - \frac{S_i^2 \cdot (i-1)^2}{d_ш} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (1.12)$$

де F_K – величина площі загальної поверхні контакту;

q – значення середнього тиску;

S_i – величина кроку початкових нерівностей;

d_m – діаметр кульки;

n – постійна, що характеризує особливості матеріалу заготовки;

$R_{вих}$, R – вихідна і досягнута в результаті ППД шорсткість.

У межах теоретичного аналізу геометрії контактної взаємодії під час обробки роликами розглядають вплив форми, розмірів і просторового положення деформувального елемента відносно поверхні деталі. Такий підхід дає змогу врахувати сукупну дію конструктивних і технологічних параметрів процесу на характер формування контактної області. Як інтегральний показник, що узагальнює особливості цієї взаємодії, доцільно використовувати об’єм контактної зони, оскільки він відображає не лише розміри ділянки контакту, а й потенційну інтенсивність пластичного впливу на поверхневий шар.

Для прогнозування висоти мікронерівностей після поверхнево-пластичного деформування в наукових роботах запропоновано низку аналітичних залежностей. Вони встановлюють зв’язок між кінцевою шорсткістю поверхні та основними параметрами процесу, зокрема подачею, радіусом кривизни ролика,

початковою висотою нерівностей, питомим тиском у зоні контакту, профільним радіусом деформувального елемента та величиною пружного відновлення матеріалу після навантаження. Зокрема, у працях [36, 37] наведено залежність, яка дає змогу оцінити висоту мікронерівностей поверхні після деформаційної обробки:

$$R_z = \frac{S_0^2}{8 \cdot R} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k}\right) \cdot k_\xi \cdot k_p \qquad (1.13)$$

де k, k_ξ, k_p – експериментально обумовлені коефіцієнти.

Запропонована залежність дає змогу врахувати як початковий стан мікрорельєфу поверхні, так і фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу.

$$R_z = R_{z0} \cdot \left(1 - K_c \cdot K_M \cdot \lg \frac{P}{\lambda \cdot \beta \cdot F_k}\right), \qquad (1.14)$$

де R_{Z0} – значення початкової висоти мікронерівностей;

K_M – значення коефіцієнту фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки;

β – значення коефіцієнту матеріалу заготовки;

F_k – величина площі контакту.

Розрахункова формула, запропонована у [6], величина R_z зв'язана зі значенням подачі та величиною кривини елемента, що деформує:

$$R_Z = R_{np} - \frac{\sqrt{4 \cdot R_{np}^2 - S_0^2}}{2}, \qquad (1.15)$$

де R_z – величина висота мікронерівностей по 10 крайнім точкам;

R_{np} – значення величини радіусу кривини профілю деформуючого ролика;

S_0 – значення величини обертової подачі.

Основним з показників якості поверхневого шару, що досягається в процесі ППД є глибина зміцненого шару. Рішення задачі визначення глибини поширення пластичної деформації в тіло деталі було здійснено у роботі [59] Запропонована формула, позв'язує значення глибини шару зміцнення, сили деформації і значення границі текучості матеріалу [59] виглядає так:

$$h_y = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}}, \tag{1.16}$$

де P – величина значення сила деформування;

σ_T – значення границі текучості матеріалу заготовки.

Поверхня контакту має еліптичний вигляд який приймають у вигляді рівновеликого кола. Однак, як показали подальші експериментальні дослідження, фактична глибина поширення пластичної деформації виявилася менше розрахункової, причому, чим більше розміри ролика і деталі, тим більше відхилення (до 50 %). У цьому зв'язку Кудрявцевим І. В. була запропонована модифікована залежність формули (1.22), що враховує вплив на глибину зміцнення розмірів деталі і ролика [27-29]

$$h_y = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}}, \text{ де } \omega = 1 + 0{,}07 \cdot R_{np}, \tag{1.17}$$

де ω – коефіцієнт впливу розмірів інструмента і деталі;

R_{np} – приведені радіуси кривизни ролика і деталі в місці контакту.

У роботах [36, 37], визначено, що величина зміцненого наклепаного шару матеріалу Δ корелює зі значенням площі контакту елемента деформації з заготовкою.

$$\Delta = k \cdot \sqrt{F_k}, \tag{1.18}$$

де k – коефіцієнт, який характеризується розмірами заготовки та її матеріалом;

$F_к$ – значення площини контакту;

Дослідженнями [65] наведена наступна залежність:

$$h_y \geq \frac{23{,}6 \cdot \sigma_T \cdot R_p}{E}, \quad R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \tag{1.19}$$

де R_1, R_2 – радіуси сполучених циліндрів; E – модуль пружності.

Дрозд М. С., Федоров А. В., Сидякин Ю. І. для розрахунку товщини наклепаного шару пропонують використовувати залежність [15]:

$$h_y = 2{,}8 \cdot \sqrt{D_{np} \cdot h}, \tag{1.20}$$

де $D_{пр}$, – приведений діаметр.

Величини D_{np} і h розраховуються за формулами:

$$D_{np} = \frac{1}{A} \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}338}{a}\right)^3}, \; h = \frac{P}{H \cdot \pi \cdot D} \tag{1.21}$$

де H – пластична твердість або контактний модуль зміцнення заготовки;

P – сила.

У підсумку, з вивчення матеріалів спеціалізованих технічних інформаційних джерел, витікає висновок що головними параметрами від яких залежить якість поверхневого шару, є сила деформування і площа контакту.

Різноманіття запропонованих у літературі аналітичних залежностей свідчить про складність процесу поверхнево-пластичного деформування та водночас дає змогу розглядати його з різних позицій. Такі формули допомагають оцінити вплив окремих параметрів на формування мікрорельєфу, напружено-

деформованого стану та властивостей поверхневого шару. Завдяки цьому вони мають важливе значення для теоретичного осмислення фізики процесу ППД.

Разом із тим наведені залежності, як правило, не є універсальними. Вони відображають особливості конкретних схем деформування, умов контакту, типів інструмента або властивостей оброблюваного матеріалу. Крім того, у багатьох випадках до складу таких моделей входять експериментальні коефіцієнти, які необхідно визначати або уточнювати заново при зміні режимів обробки, геометрії інструмента чи характеристик матеріалу. Це знижує можливість їх прямого використання для прогнозування результатів ППД у різних виробничих умовах.

Разом з тим, сила деформування в розглянутих методиках визначається стосовно до деформуючих елементів, що мають форму тора і кулі, у той час як не менш розповсюдженим є конічний ролик, при обробці яким утвориться каплеподібний контакт. Можливі й інші типи роликів, поверхня яких утвориться обертанням довільної опуклої кривої, що не дозволяє робити аналіз отриманих результатів і їхнє порівняння на основі єдиної методики. Рішення даної проблеми можливо за рахунок розробки математичної моделі призначеної для визначення геометричних параметрів контактної зони для всіх типорозмірів роликів і розмірів деталі з наступним визначенням взаємозв'язку геометрії контакту з розподіленим напруженим станом.

Шорсткість поверхні залежить від сили деформування профільного радіуса і подачі інструмента. Приведений у інформаційних джерелах матеріал достатній для обґрунтованого призначення значень впливаючих на значення шорсткості факторів.

Таким чином, подальше вивчення поставленого питання визначення взаємозв'язку конструктивно-технологічних параметрів з показниками якості при обробці деталей ППД деформуючими роликами довільної форми представляється актуальним.

1.5. Мета і завдання дослідження

Виконаний аналітичний огляд підтвердив актуальність теми роботи. **Метою роботи є** підвищення фізико-механічних властивостей оброблювальної поверхні шляхом збільшення ефективності процесу поверхневого пластичного

деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою управління процесом обробки.

З**авдання**:

– проаналізувати застосовувані методи досягнення заданої якості поверхонь деталей;

– визначити геометричні параметри та напруження в контактній зоні деформуючого елементу та деталі;

– визначення впливу конструктивних параметрів деформуючих елементів на якість обробки пружно-пластичним деформуванням;

– створити методику та розробити конструкцію обкатника, що дозволяє підвищити фізико-механічні властивості оброблювальної поверхні;

– розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЗАЄМОДІЇ ДЕФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ДЕТАЛЕЙ ОБЕРТАННЯ НА ЯКІСТЬ ОТРИМАНОЇ ПОВЕРХНІ

2.1. Визначення геометричних параметрів контактної зони

Між показниками якості поверхневого шару й умовами обробки при поверхневому пластичному деформуванні (ППД) існує тісний взаємозв'язок. Умови обробки задаються через вибір геометричних параметрів деформуючих елементів і технологічні фактори, до яких відносяться: глибина входження деформуючого елементу в тіло деталі, силу деформування, а також подача. Вони ж визначають і геометричні параметри контактної зони, а через них і силу деформування.

В даний час є загальновизнаним головним фактором, який діє на показники якості поверхневого шару при обробці деталей ППД є сила деформування. Проте, аналіз технічних джерел інформації показує, що при обробці з тим самим зусиллям деформування, але різними по розмірах і формі робочої поверхні деформуючими елементами результати виходять різні. У цьому зв'язку авторами [6, 15, 17, 23, 29, 38, 41] була висловлена думка, що замість сили деформування як інтегруючий показник варто прийняти площу контакту. Однак, площа контакту також не є параметром, що однозначно описує умови і результати обробки. Проведемо через дві довільні точки, відзначені на поверхні обробки, два кола різного радіусу r_1 і r_2 (рис. 2.1). Більшому колу відповідає обробка більшим по розмірах деформуючим елементом, але впровадженим на меншу глибину, отже і напруга, створювана даним деформуючим елементом, виявиться змінною по величині. Це буде спостерігатися в будь-якому перетині деформуючого елементу, проведеному перпендикулярно його осі в межах довжини контакту з деталлю. Оскільки через дві точки можна провести скільки завгодно кіл, то правомірним є твердження, що той самий за формою і розмірами контакт може бути забезпечений різними по розмірах деформуючими елементами.

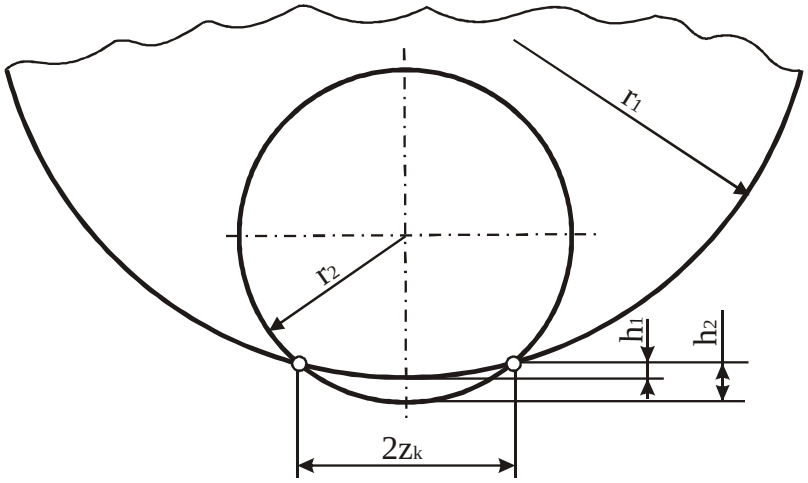


Рис. 2.1. Перетин деформуючих елементів різних радіусів, кола яких одночасно перетинають дві точки

Аналогічно можна показати, що зміна діаметру оброблюваної деталі теж впливає на розміри контактної зони. Однієї і тієї ж по розмірах площі контакту може відповідати різна його форма (еліпс, коло, краплеподібний контакт і т.д.). Причому, для кожної форми контакту застосовується відповідний тип деформуючого елементу з різною формою робочої поверхні. На геометрію контакту впливає також форма і розміри оброблюваної поверхні. При входженні ролика в поверхню вала або отвору при всіх інших рівних умовах параметри контакту будуть відрізнятися.

Отже, за інтегруючий показник необхідно вибрати інший параметр контактної зони, що однозначно відповідає прийнятому для обробки деформуючому елементу і його глибині входження. У якості такого показника, можна прийняти об'єм металу, що витісняється деформуючим елементом з контактної зони. Складність в необхідності мати для інженерних розрахунків і можливості подальшого аналітичного дослідження процесу обробки важливо мати рішення задачі в простому виді. Воно повинно здійснюватися за єдиною методикою для всіх типів деформуючих елементів типу роли, як по розмірах, так і за формою робочої поверхні з урахуванням розмірів деталі. Для цього необхідно встановити, які фактори є малоістотними, їх відкинути та спростити аналітичні рішення.

Проведені експериментальні дослідження [6, 29, 58], показують, що деформуючі ролики при ППД можна прийняти абсолютно твердими. Припустимо також, що між поверхнями ролика і деталі немає схоплювання, матеріал деталі пружно-пластичний. При деформуванні матеріал деталі є суцільним та не має розривів.

Як свідчать численні літературні джерела [5, 11, 30, 48], рішення задачі визначення геометричних параметрів контактної зони залежно від виду геометричної форми і зближення деформуючих елементів типу ролик при ППД у загальному виді для усіх випадків обробки циліндричних поверхонь не запропоновано. Рішення ускладнюється ще і тим, що осі деформуючих елементів типу ролик при обробці зміщаються стосовно осі деталі на кут входження.

Отже, для аналізу дії геометричних параметрів елементів, що деформують типу ролик і технологічних факторів обробки на якість поверхневого шару, необхідно встановити залежність між конструктивними параметрами деформуючих роликів, технологічними факторами і геометричними параметрами контактної зони на основі єдиної методики розрахунку.

Всі параметри контактної зони: максимальна довжина, ширина, площа контакту, обсяг контактної зони і площа поверхні контактної зони (частини поверхні деформуючого елементу контактуючої з деталлю) визначаються через закон зміни напівширини контакту по його довжині. Тому задача зводиться до перебування контурної лінії контакту.

Визначення взаємозв'язку геометричних параметрів деформуючих роликів з геометричними параметрами контактної зони можна вирішити на основі прямої і зворотної задач. При вирішенні прямої задачі в якості вихідних даних задаються геометричні параметри деформуючого ролика і глибина його входження в оброблювану поверхню, після чого визначають геометричні параметри контакту. При рішенні зворотної задачі, навпаки, задаються форма і розміри контактної зони, а потім визначаються геометричні параметри деформуючого ролика, що забезпечує заданий контакт. При вивченні процесу ППД більшістю авторів застосовується рішення прямої задачі. Про важливість зворотної задачі свідчить

необхідність спочатку можуть бути задані необхідні умови обробки, при яких досягаються необхідні показники якості поверхневого шару, а вже потім здійснюється перехід до вибору конструктивних параметрів роликів.

У першому наближенні можна формально застосувати математичний апарат теорії поверхонь, приймаючи що зовнішні поверхні деформуючого ролика й оброблюваної деталі не деформуються як цілі тіла, а тільки перетинаються один з одним. Контурна лінія контактної зони в цьому випадку представляє собою геометричне місце точок, що належать одночасно поверхням ролика і деталі, записаним у виді рівнянь:

$$\begin{cases} \varphi_p = (x, y, z) \\ \varphi_\partial = (x, y, z) \end{cases}, \tag{2.1}$$

де φ_p – поверхня деформуючого елемента типу ролик;

φ_∂ – поверхня деталі.

При обробці валів оброблювана деталь є прямим круговим циліндром, а поверхня деформуючого елемента в загальному випадку утвориться обертанням довільній опуклої кривої навколо його осі. Рівняння цих поверхонь мають вигляд:

– для деталі:

$$R_\partial - \sqrt{x^2 + y^2} = 0; \tag{2.2}$$

– для деформуючого елементу типу ролик:

$$r_p - f\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) = 0. \tag{2.3}$$

Ці рівняння записані з припущенням, що осі деталі і ролика збігаються з віссю *OZ* системи координат *OXYZ*. У реальних умовах вісь ролика зміщена щодо осі деталі, як по відстані, так і по куту, через необхідність повороту на кут

входження і самозатягування. Зберігши напрямок осі ролика співпадаючим з віссю *OZ*, як більш складної поверхні стосовно прямого кругового циліндра, приходимо до необхідності привести запис рівняння поверхні деталі в тій же системі координат до відповідного виду через формули перетворення координат, що реалізується за допомогою перетворення координат при рівнобіжному переносі і повороті осей. Нехай система координат, у якій записане рівняння прямого кругового циліндра, має координати $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ і розташована стосовно системи координат *x, y, z* у якій записане рівняння поверхні ролика таким чином, що її початок зміщений на відстань, обумовлену координатами x_0, y_0, z_0. Вісі $O\bar{x}, O\bar{y}, O\bar{z}$ мають направляючі косинуси (t_{11}, t_{21}, t_{31}), (t_{12}, t_{22}, t_{32}), (t_{31}, t_{23}, t_{33}) відповідно. Тоді координати поверхні кругового циліндра в системі координат ролика мають вигляд:

$$\begin{cases} x = t_{11} \cdot \bar{x} + t_{12} \cdot \bar{y} + t_{13} \cdot \bar{z} + x_0, \\ y = t_{21} \cdot \bar{x} + t_{22} \cdot \bar{y} + t_{23} \cdot \bar{z} + y_0, \\ z = t_{31} \cdot \bar{x} + t_{32} \cdot \bar{y} + t_{33} \cdot \bar{z} + z_0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Для визначення контурної лінії перетину поверхонь ролика і деталі необхідно спільно розв'язати систему, що складається з рівнянь (2.2), (2.3) і (2.4).

Внаслідок складності цієї системи координат, її рішення не можливо привести до простого вигляду. Крім того, для кожного конкретного за формою зовнішньої поверхні деформуючого елементу зазначене рішення буде відрізнятися. Це значно ускладнить аналіз дії геометричних параметрів деформуючого інструмента на геометрію контактної зони. Таким чином, методи перебування контурної лінії як безлічі точок перетинання двох поверхонь, заданих аналітично в одній і тій же системі координат є не перспективними для практичної реалізації, тому було запропоновано як рішення задачі використовувати метод перетинів.

На рис. 2.2 приведене входження деформуючого елементу в поверхню вала. У перетині *А-А*, проведеному перпендикулярно до вісі ролика на довільній

відстані від початку контактної зони і не вихідним за її межі, утворяться пересічні: коло, що відповідає роликові й еліпс, що відповідає циліндричної деталі.

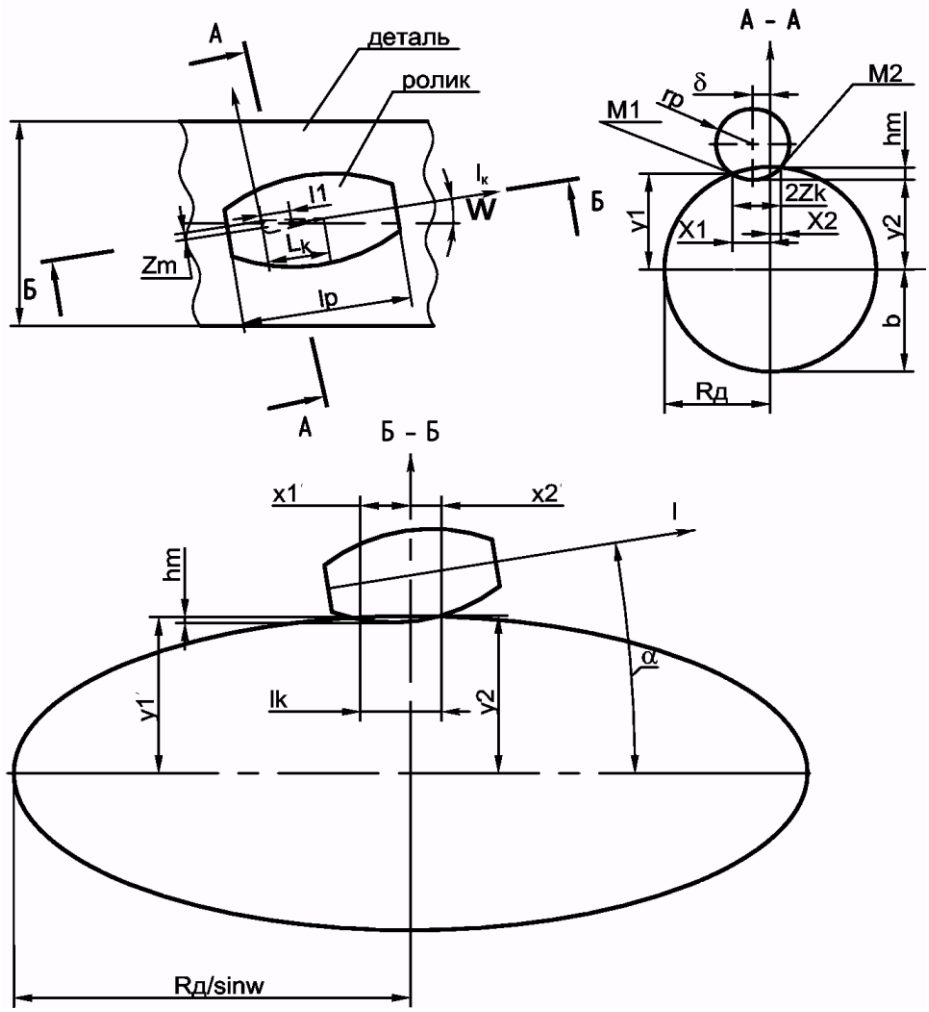


Рис. 2.2. Взаємодія ролика та деталі при ПДД

Ширина контакту буде дорівнює відстані між точками M_1 і M_2 перетинання кола з еліпсом:

$$2 \cdot z_k = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}\,. \tag{2.5}$$

Координати точок перетину M_1 (x_1, y_1) і M_2 (x_2, y_2) отримують з рішення системи рівнянь, що описують перетин кола і еліпсу, віднесені до одній і тої ж системи координат *XOY*:

$$\begin{cases} \left[x-\left(\ell_k-\ell_1\right)\cdot\sin\omega\right]^2+\left[y-\left(\dfrac{R_\partial}{\cos\omega\cdot\cos\gamma}+z_p-h_p\right)^2-z_p^2\right]=0, \\ x^2+y^2\cdot\left(\cos\omega\cdot\cos\gamma\right)^2-R_\partial^2=0, \\ z_p=f\left(\ell_к\right), \end{cases} \tag{2.6}$$

де R_∂ – значення діаметру заготовки,

ω – кут самозатягування,

γ – задній кут ролика (кут входження),

r_p, h_p – зміна глибини входження по довжині контакту,

$\ell_к$ – поточна довжина контакту,

ℓ_1 – координата довжини контактної зони, що відповідає перетину осей ролика і деталі.

Довжину контактної зони можна знайти з рішення рівнянь, що описують лінії перетину, які створюють профіль ролика й еліпс при перетині ролика площиною B, що проходить через вісь, лінію максимального навантаження ролика і перпендикулярну площині А-А:

$$\begin{cases} x'^2\cdot\sin^2\omega-y'^2\cdot R_\partial^2=0, \\ x'=\ell_p\cdot\cos\gamma-r_p\cdot\sin\gamma-x'_0, \\ y'=-\ell_p\cdot\sin\gamma-r_p\cdot\cos\gamma-y_0'. \end{cases} \tag{2.7}$$

Спільний розв'язок системи рівнянь (2.5), (2.6) і (2.7) дозволяє отримати зміну напівширини як функцію таких параметрів:

$$z_k=f\left(R_\partial,\omega,\gamma,r_p,\ell,h_p\right). \tag{2.8}$$

Внаслідок складності розв'язок отриманої системи у може бути здійснений тільки чисельними методами за допомогою комп'ютера.

Проте, при подальшому аналізі з'ясувалось, що такий параметр, як кут самозатягування ω, практично не впливає на напівширину контакту (максимальна похибка складає менш одного відсотка). Ще меншу похибку дає заміна ділянки еліпса між точками L_H і L_K відрізком прямої лінії. Тому, якщо прийняти кут самозатягування рівним нулеві, то рішення системи рівнянь (2.5), (2.6) і (2.7) для напівширини контакту, при входженні деформуючого елементу у поверхню вала буде:

$$z_k = \sqrt{R_\partial^2 - \left[\frac{(R_\partial \pm r_\partial)\cdot(R_\partial \mp h_k)}{R_\partial \pm (r_p \mp h_k)}\right]^2}, \qquad (2.9)$$

де верхній знак потрібно застосовувати при входженні ролика в поверхню вала, а нижній – у поверхню отвору.

Отримані залежності для визначення геометричних параметрів контактної зони дозволяють також врахувати вплив хвилі, утвореної перед деформуючим елементом, на напівширину контакту, для чого в залежності (2.9) достатньо збільшити радіус деталі на висоту хвилі (рис. 2.3):

$$z_k = \sqrt{(R_\partial \pm h_{хв})^2 - \left[\frac{((R_\partial \pm h_{хв}) \pm r_p)\cdot((R_\partial \pm h_{хв}) \mp h_k)}{(R_\partial \pm h_{хв}) \pm (r_p \mp h_k)}\right]^2}. \qquad (2.10)$$

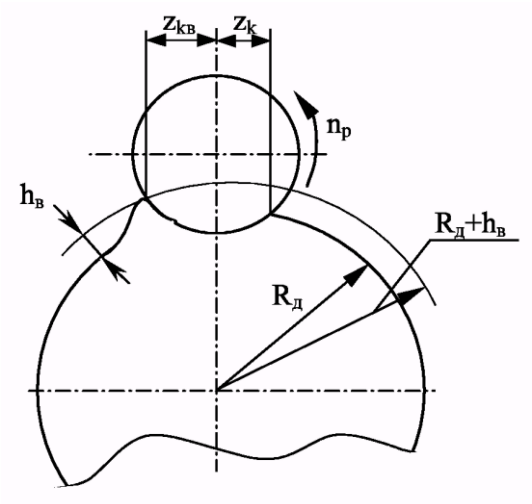


Рис. 2.3. Схема визначення напівширини контакту з врахуванням хвилі деформації

Залежності зміни поточних значень радіуса деформуючого елементу $r_p = r_p(\ell_k)$ і глибини входження $h_k = h_k(h_m,\ \gamma,\ \ell_k)$ встановлюються для кожного конкретного виду деформуючого елементу з врахуванням особливостей його входження в оброблювану деталь.

Розглянемо, розрахункові схеми і залежності для визначення зміни поточних значень радіуса деформуючого елементу і глибини входження від довжини контакту для деформуючих елементів типу: конічний ролик; профільний ролик (має робочу поверхню – тор); куля.

Деформуючий елемент – типу конічний ролик (рис. 2.4).

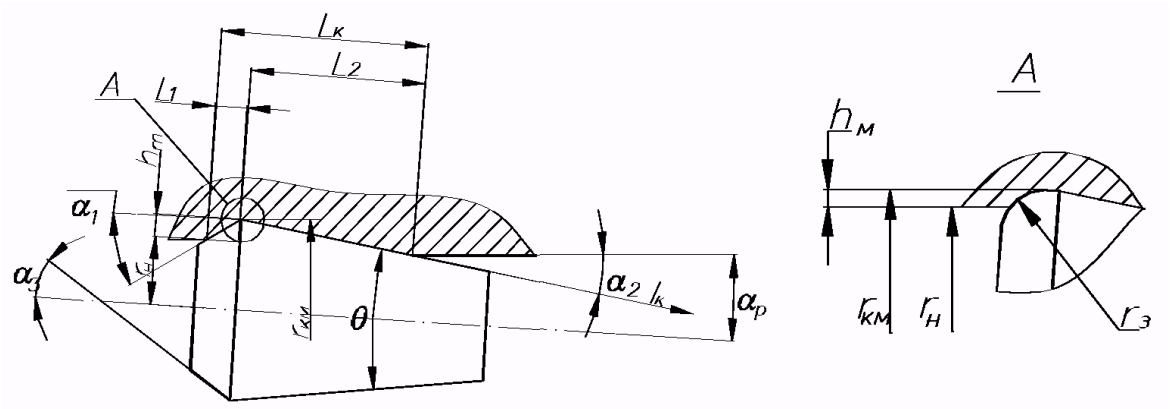


Рис. 2.4. Схема для розрахунку деформуючого елементу типу конічний ролик

$$\alpha_1 = \alpha_3 - \alpha_2;$$

Для конусного елементу *А* рис. 2.4.

$$L_k = L_1 + L_2 = \frac{h_m}{tg\alpha_1} + \frac{h_m}{tg\alpha_2};$$

$$r_p = r_н + \ell_k \cdot tg\alpha_3 \text{ при } 0 \le \ell_k \le L_1;\ r_p = r_{km} \mp (\ell_k - L) \cdot tg\theta \text{ при } L_1 \le \ell_k \le L_k$$

$$h_k = \ell_k \cdot \alpha_1 \text{ при } 0 \le \ell_k \le L;\ h_k = h_m - (\ell_k - L_1) \cdot tg\alpha_2 \text{ при } L_1 \le \ell_k \le L_k$$

Для елементу *А* радіусного закруглення рис. 2.4.

$$L_k = L_{13} + L_2 = \sqrt{r_3^2 - (r_3 - h_m)^2} + \frac{h_m}{tg\alpha_2}$$

$$r_p = r_{km} - \sqrt{r_3^2 - (L_{13} - \ell_k)^2} \text{ при } 0 \le \ell_k \le L_3;$$

$$r_p = r_{km} \mp (\ell_k - L) \cdot tg\theta \text{ при } L_1 \le \ell_k \le L_k$$

$$h_k = r_3 - \sqrt{r_3^2 - \ell_k^2} \text{ при } 0 \le \ell_k \le L_1$$

Деформуючий елемент – профільний ролик (рис. 2.5).

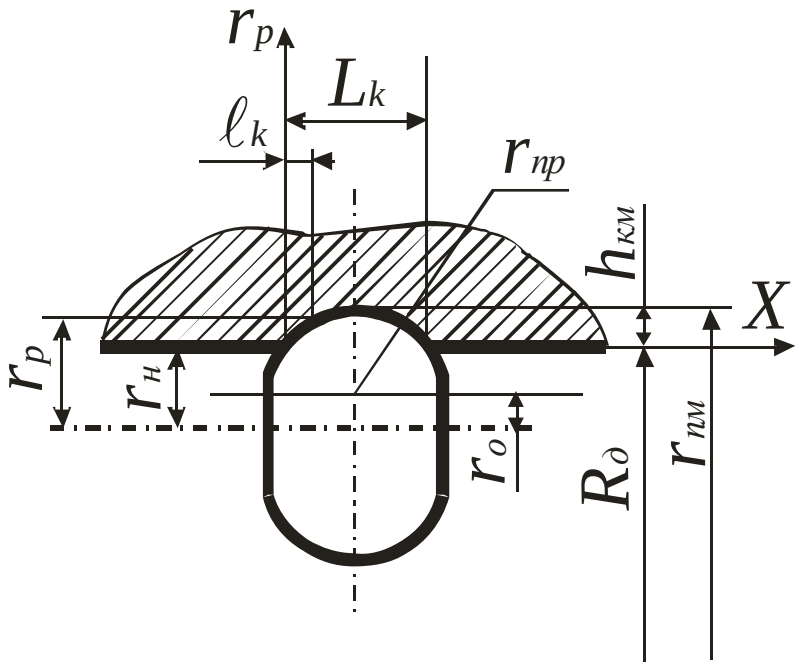


Рис. 2.5. Схема для розрахунку деформуючого елементу типу профільний ролик

$$h_k = h_m - (\ell_k - L) \cdot tg\alpha_2 \text{ при } L_1 \le \ell_k \le L_k$$

$$L_k = 2 \cdot \sqrt{r_{пр}^2 - (r_{пр} - h_{км})^2},$$

$$r_p = r_0 + \sqrt{r_{пр}^2 - \left(\ell_k - \frac{L_k}{2}\right)^2},$$

$$h_k = r_p - r_н,$$

$$r_н = r_{рт} - h_{кт}.$$

Деформуючий елемент – куля (рис. 2.6).

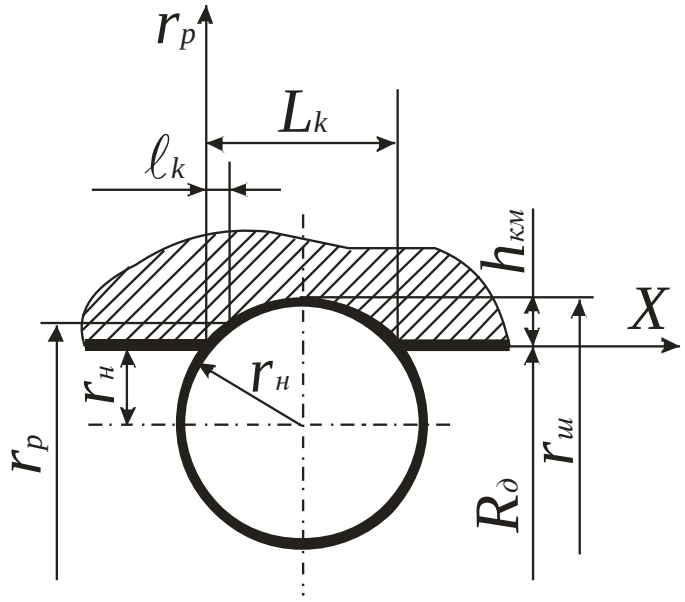


Рис. 2.6. Схема для розрахунку деформуючого елементу типу куля

$$L_k = 2 \cdot \sqrt{r_ш^2 - (r_ш - h_{км})^2},$$

$$r_p = \sqrt{r_ш^2 - \left(\ell_k - \frac{L_k}{2}\right)^2},$$

$$h_k = r_p - r_н,$$

$$r_н = r_ш - h_{кт}.$$

Аналогічні залежності можуть бути отримані для будь-яких деформуючих елементів типу ролик, що відрізняються як по розмірах, так і за формою. На підставі отриманих результатів знаходимо формулу для розрахунку об'єму контактної зони, який може бути визначений як інтеграл від зміни площі сегмента *acb* по довжині контакту (рис. 2.7):

$$V_k = \int_0^{L_k} \left[r_p^2 \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{r_p}\right) - 2 \cdot z_k \cdot \left(r_p - h_k\right) \right] \cdot d\ell_k; \qquad (2.11)$$

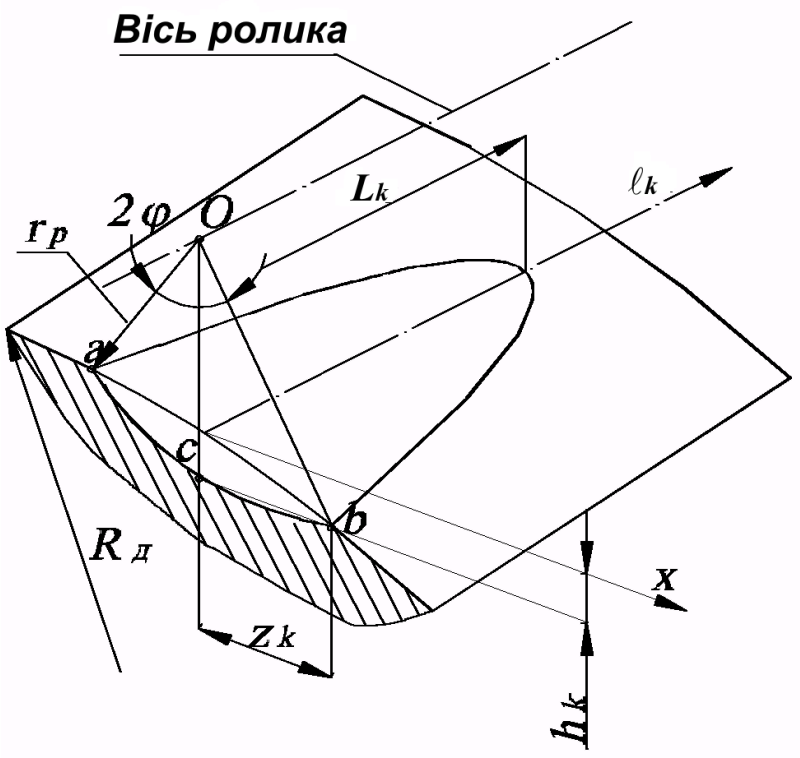


Рис. 2.7. Схема визначення площі поверхні контакту та об'єму контактної зони

Для визначення площі контакту деформуючого елементу з оброблюваною деталлю обертання формула має вигляд:

$$S_k = \int_0^{L_k} \sqrt{R_\partial^2 - \left[\frac{\left(R_\partial \pm r_p\right) \cdot \left(R_\partial \mp h_k\right)}{R_\partial \pm \left(r_p \mp h_k\right)} \right]} d\ell_k . \qquad (2.12)$$

Подібно можна знайти і площу поверхні контакту (площа частини ролика, що знаходиться в контакті з оброблюваною поверхнею).

$$S_{пк} = 2 \cdot \int_0^{L_k} r_p \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{r_p}\right) \cdot d \cdot \ell_k \,. \qquad (2.13)$$

Таким чином, на основі застосування методу перетинів ролика й оброблюваної деталі двома перпендикулярними площинами отримані математичні залежності для визначення всіх геометричних параметрів контактної зони при обробці деталей ППД роликами будь-яких типорозмірів. Це дозволяє робити порівняльний аналіз впливу конструктивно-технологічних параметрів і режимів обробки на якість і продуктивність за єдиною методикою.

2.2. Напруження в контактній зоні деформуючого елементу та деталі

На якість обробленої поверхні в основному впливають інтенсивність і характер розподілу напруг по площі контакту. У зв'язку з цим при дослідженні процесу ППД визначення напруженого стану у зоні деформації є однієї з основних задач. Це пояснює чому цьому питанню присвячена велика кількість робіт [6, 15, 17, 23, 29, 38, 41].

Однак при аналізі вказаних робіт з’ясувалось, що до кінця задача не вирішена. Це зв'язано з тим, що при деформуванні поверхні деталі обкочуючим роликом, необхідно одночасно враховувати багато факторів, що впливають на напружений стан у контакті: форму і розміри контактної зони, глибину входження ролика в поверхню деталі, швидкість процесу деформування, стан і механічні властивості матеріалу деталі, наявність твірної хвилі, що утвориться навколо зони контактну, температуру в контакті, зміцнення та втрату міцності поверхневого шару, наявність нормальних і дотичних напружень і т.п. Бажання врахувати всі особливості деформування приводить до створення складного математичного апарата для вирішення задачі, не завжди зручного для розрахунків. При рішенні

контактної пружної-пластичної задачі варто враховувати, що не усі фактори впливають на зміну якісного стану поверхні, у зв'язку з чим можна відкинути мало впливаючі складові.

З аналізу літературних джерел виходить, що можливо застосування для опису пружно-пластичної задачі методу визначення напруженого стану при пружному зближенні тіл під впливом нормально діючих навантажень. При цьому приймають, що максимальні напруги в найбільш навантаженій точці контактної зони перевищують межу пружності. Величина максимальної напруги по різних джерелах [4, 18] може перевищувати межу пружності від 2 до 12 разів. У зв'язку з такою розбіжністю в припущеннях про величину максимальної напруги необхідно визначати для кожного випадку. Також особливістю застосування пружної контактної задачі є те, що вона застосовна для обмеженої кількості деформуємих тіл: куль, циліндрів, площин і поверхонь, що мають довільну кривизну, що спочатку при відсутності навантаження стикаються в точці. Форми контурних ліній контактів при навантаженні зазначених тіл представляють собою еліпси і прямокутники. Для інших форм контактів, зокрема каплеподібного, що часто застосовується у виробничій практиці при ППД конічними роликами, задача взагалі не вирішена.

Ідея досягнення необхідного результату полягає в тому, щоб перенести рішення пружної задачі при контактуванні двох деформуємих циліндрів з рівнобіжними осями, що дають прямокутний контакт, на вирішення задачі, коли форма контакту є більш складною.

При виборі конструктивних параметрів обкатника доцільно виходити з заданої площі і форми контактної зони для того, щоб, визначивши характер розподілу напруг, перейти до визначення зусилля деформування, а потім вибрати необхідний деформуючий ролик, за допомогою якого забезпечується необхідна контактна зона і розподіл напруг.

Як вихідну інформацію приймемо рішення задачі для деформування вала з площиною (рис. 2.8).

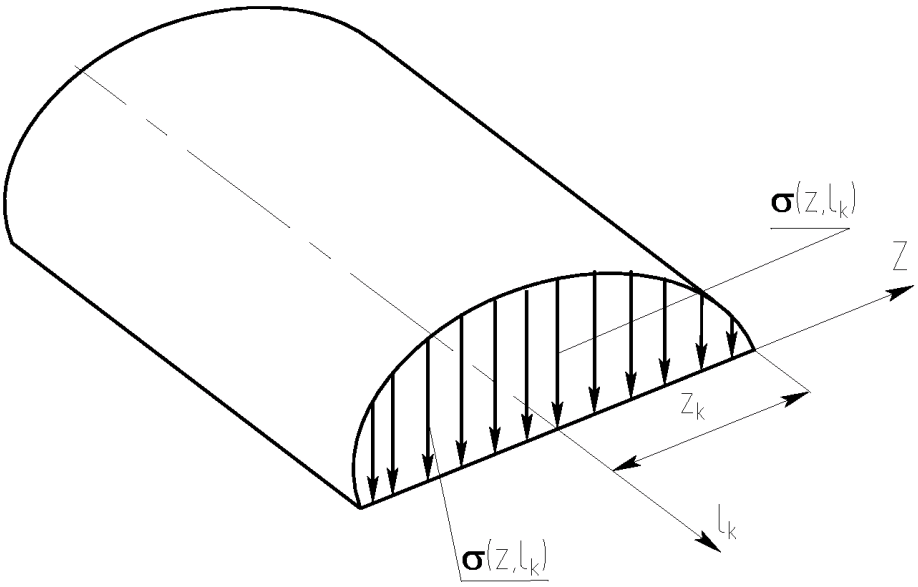


Рис. 2.8. Розподіл напружень по площині контакту при деформуванні площини валом

Розподіл напруг по ширині контактної зони в цьому випадку визначається по формулі:

$$\sigma(\ell_k, z) = \sigma_m(\ell_k) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z}{z_k(\ell_k)}\right)^2}, \qquad (2.14)$$

де z – поточна координата напівширини контакту ($0 \le z \le z_k(\ell_k)$);

$z_k(\ell_k)$ – зміна напівширини контакту по його довжині;

$\sigma_m(\ell_k)$ – зміна напруг по лінії максимального навантаження ролика.

Розіб'ємо тіло ролика по довжині контакту рівнобіжними площинами, розташованими перпендикулярно його осі, на відстані $\Delta\ell_k$ між собою. Ролик в цілому буде складатися як би з набору тонких дисків, що мають постійні радіуси, які змінюються для кожного виділеного диска по довжині ролика відповідно до закону зміни його твірної. Для кожного з цих дисків застосуємо формулу (2.14) для розрахунку напруженого стану. Очевидно, напружений стан на всій площі контакту буде складатися із суми елементарних рішень для кожного диска окремо.

Для того щоб мати можливість користуватися формулою (2.14), необхідно визначити закон зміни максимальних напруг $\sigma_m(\ell_k)$ по лінії найбільшого навантаження ролика. Це лінія, вздовж якої ролик максимально введений у поверхню оброблюваної деталі. При пружному контакті дана залежність може бути записана у такому виді:

$$\sigma_m = 0{,}564 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot P_{y\ell} \cdot (r_p + r_\partial)}{(1-\mu^2) \cdot r_p \cdot r_\partial}} \tag{2.15}$$

$$P_{y\ell} = \frac{2 \cdot z_k(\ell_k)^2 \cdot (r_\partial - r_p) \cdot E}{(1{,}08)^2 \cdot r_p \cdot r_\partial} \tag{2.16}$$

Складніше визначити функцію $\sigma_m(\ell_k)$ при пружнопластичному деформуванні, внаслідок відсутності такого рахунку у літературі. Для знаходження закону зміни функції $\sigma_m(\ell_k)$ можливі два підходи. Перший полягає у тому, що на основі апріорних міркувань запропонувати залежність, а потім підтвердити її експериментально. Припустимо, що вдалося знайти потрібну функцію $\sigma_m(\ell_k)$. Тоді для повного зусилля деформування можна записати вираз:

$$P_y = \int_0^{L_k} \int_{-z_k}^{z_k} \sigma_m(\ell_k) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z}{z_k(\ell_k)}\right)^2}\, dz dk. \tag{2.17}$$

Якщо визначити значення сили деформування P_y, зміну напівширини контакту $z_k(\ell_k)$, довжину контактної зони L_k, і підставити їх у залежність (2.17), то, при правильно обраній формулі зміни максимальної напруги по лінії найбільшого входження ролика, отримана рівність повинна перетворитися в тотожність.

У результаті було встановлено, що найбільш відповідним є закон зміни функції $\sigma_m(\ell_k)$. у виді:

$$\sigma_m(\ell_k) = A \cdot \varepsilon^m;\ A = \frac{E \cdot \varepsilon_T}{\varepsilon_T^m} = E \cdot \varepsilon_T^{1-m};\ m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_в}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_в}\right)}, \tag{2.18}$$

де ε – відносна деформація точок поверхні деталі, розташованих на лінії найбільшого навантаження ролика;

$\varepsilon_г$, $\varepsilon_в$ – відносні деформації, що відповідають границі текучості σ_m межі тимчасового опору $\varepsilon_в$.

Траєкторіями точок поверхні деталі є циклоїди. Для цього випадку відносна деформація буде розраховуватися по формулі:

$$\varepsilon_y = \frac{(z_k - z)}{r_p \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z_k - z}{r_p}\right)^2}}. \tag{2.19}$$

Підставивши вираз (2.19) при $z = 0$ у формулу (2.18) отримаємо формулу для розрахунку розподілу напруг по лінії максимального навантаження у випадку довільного контакту.

В окремому випадку відомі аналітичні залежності розрахунку геометричних параметрів контактної зони при обробці циліндричних поверхонь кульками і профільними роликами, у результаті чого утвориться еліпсна форма контакту. Формально доцільно стверджувати, що закон зміни напруг у зоні контакту при пружно-пластичному деформуванні кульками і профільними роликами буде мати той же вид, що і при пружному контакті. Для еліпсного контакту ця залежність:

$$\sigma(\ell_k, z) = \sigma_m(\ell_k) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}5 \cdot L_k - \ell_k}{0{,}5 \cdot L_k}\right)^2 - \left(\frac{z}{z_{km}}\right)^2}. \tag{2.20}$$

При цьому максимальна напруга σ_m у центрі площадки контакту, повинне перевищувати напруга плинності $\sigma_т$. Ця напруга визначається експериментально, тому що сумарне радіальне зусилля P_y дорівнює інтегралові

$$P_y = \sigma_m \cdot \int_0^{L_k} \int_{z_k}^{z_k} \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}5 \cdot L_k - \ell_k}{0{,}5 \cdot L_k} \right)^2 - \left(\frac{z}{z_{km}} \right)^2} \, d\ell_k dz, \tag{2.21}$$

то з цього виразу отримаємо

$$\sigma_m = \frac{P_y}{\int_0^{L_k} \int_{z_k}^{z_k} \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}5 \cdot L_k - \ell_k}{0{,}5 \cdot L_k} \right)^2 - \left(\frac{z}{z_{km}} \right)^2} \, d\ell_k dz} \tag{2.22}$$

Коли відбувається обробка конічними деформуючими роликами, контакт є каплеподібним, а дійсна форма його контурної лінії представляє собою поєднання дуг еліпса як на початковій ділянці, так і на ділянці збігу. Тому для цих ділянок контакту можна застосувати розрахункову формулу (2.20).

Отже, на початковій ділянці каплеподібного контакту можна записати наступні залежності (рис. 2.9).

$$\sigma_1 = \sigma_m \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}5 \cdot L_k - \ell_k}{0{,}5 \cdot L_k} \right)^2 - \left(\frac{z}{z_k} \right)^2}, \text{ при } 0 \le \ell_k \le L_1, \tag{2.23}$$

для ділянки збігу

$$\sigma_2 = \sigma_m \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\ell_{k2}}{L_2} \right)^2 - \left(\frac{z_{k2}}{z_{km}} \right)^2}, \text{ при } L_1 \le \ell_k \le L_k \tag{2.24}$$

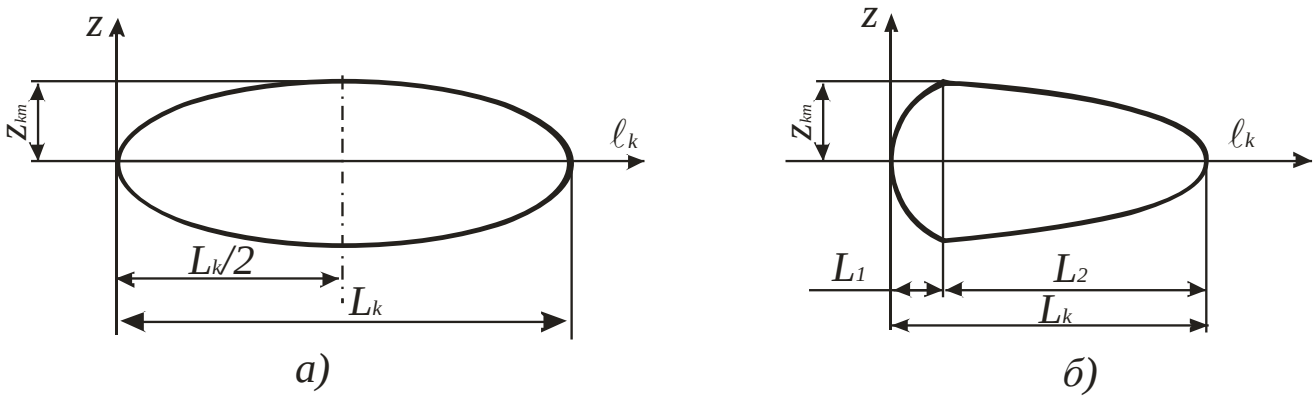


Рис. 2.9. Контакти, що утворюються при обробці циліндричних поверхонь роликами:

а) профільними, кульковими – еліпсний контакт;

б) конічними – каплеподібний контакт

Радіальна сила деформування буде відповідно дорівнювати

$$P_y = \sigma_m \cdot \int_0^{L_k} \int_{z_k}^{z_k} \sqrt{1 - \left(\frac{0{,}5 \cdot L_k - \ell_k}{0{,}5 \cdot L_k}\right)^2 - \left(\frac{z}{z_k}\right)^2}\, d\ell_k dz + \int_0^{L_k} \int_{z_k}^{z_k} \sqrt{1 - \left(\frac{\ell_{k2}}{L_k}\right)^2 - \left(\frac{z_{k2}}{z_{km}}\right)^2}\, d\ell_k dz \quad (2.25)$$

2.3. Означення факторів, що впливають на якість обробки ППД

На показники якості поверхневого шару в процесі обробки діє велика кількість незалежних і взаємозалежних між собою факторів. Тому для визначення раціональних конструктивних параметрів обкатників і технологічних факторів процесу обробки. У якості основних варійованих конструктивно-технологічних параметрів, що діють при обробці, були прийняті наступні величини і діапазони їхньої зміни (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Діапазони зміни конструкторсько-технологічних параметрів при обкочуванні

№	Величина	Діапазон зміни
1	Діаметр деформуючого елементу, d_p, *мм*	10...150
2	Діаметр заготовки *D*, *мм*	100...400
3	Профільний радіус деформуючого елементу r_p, *мм*	2...50
4	Кут входження (задній кут), градуси	0...2
5	Глибина входження деформуючого елементу в деталь h_m, *мм*	0,05...0,3
6	Частота обертання інструменту *n*, $хв^{-1}$	500...2500
7	Подача s_0, *мм/об*	0,1...3

Вибір середніх значень і діапазону зміни варійованих параметрів здійснювався з врахуванням призначуваних у реальних умовах експлуатації і використання обладнання, яке випускається серійно. Крім того, приймаючи до уваги теоретичний характер досліджень, діапазони варійованих параметрів, з метою розширення області застосування обкатника обрані більшими межі діапазону значень зазвичай застосовуваних у виробництві.

Діаметри деталей, що оброблялися отвору, приймалися з нормального ряду розмірів, найбільше широко використовуваних у різних галузях промисловості. Частота обертання обкатника регламентувалася мінімальним значенням, при якому досягається необхідне значення сили деформування.

Середнє значення величини подовжньої подачі приймалося, виходячи з роботи реально діючих обкатних інструментів, а максимальне значення – виходячи з можливості забезпечення найбільшої продуктивності, при мінімальній шорсткості обробленої поверхні.

Для обчислення значень функцій і аналізу використовувся математичний пакет MathCAD.

2.4. Дослідження впливу конструктивних параметрів деформуючих елементів на геометрію контактної зони

Призначення раціональних параметрів поверхнево-пластичного деформування потребує врахування багатофакторного характеру цього процесу. Остаточна якість поверхневого шару визначається не лише окремими режимними параметрами, а їх сумісною дією. На результат обробки впливають сила деформування, подача, кількість проходів, геометрія ролика, його положення відносно деталі, початкова шорсткість, твердість і пластичність матеріалу, умови тертя та інші чинники. При цьому зазначені параметри можуть бути як умовно незалежними, так і взаємопов’язаними між собою.

Саме тому під час математичного опису процесу ППД показники якості поверхні доцільно розглядати як функції багатьох змінних. Такий підхід дозволяє врахувати складний характер формування поверхневого шару та встановити зв’язок між конструктивно-технологічними параметрами обробки і кінцевими властивостями деталі. Для випадку поверхнево-пластичного деформування роликовим інструментом узагальнену залежність показника якості поверхні можна записати у такій формі:

$$y_i = f(P_{oy}, S_o, r_{np}, D_o, d_p, r_p(\ell_k), h_m, h_p(\ell_k), \alpha, \omega, HB, R_{вих}), \qquad (2.26)$$

де y_i – якісний показник шару поверхні заготовки (глибина зміцнення, ступінь зміцнення, шорсткість і т.д.),

P_{oy} – радіальна сила деформування,

S_0 – оборотна подача,

$r_{пр}$ – значення профільного радіусу для ролика,

D_0 – значення розміру діаметру заготовки,

d_p – величина початкового діаметру деформуючого ролику (відноситься до початку контактної зони),

$r_p(\ell_k)$ – змінна величина значення радіуса ролика взовж контактної зони,

h_m – максимальна глибина входження ролика в оброблювану деталь,

$h_p(\ell_k)$ – зміна глибини впровадження ролика по довжині контактної зони,

α, ω – кути входу і самозатягування,

HB – твердість вихідного матеріалу заготовки,

$R_{вих}$ – вихідна шорсткість заготовки.

Для визначення окремих показників якості існують аналітичні залежності. Наприклад, у літературних джерелах приводяться формули для розрахунку шорсткості в залежності від профільного радіуса і подачі, глибини зміцнення від зусилля деформування і приведеного радіуса ролика і деталі [10, 31, 45]. Багато інших показників якості не вдається визначити. В зв'язку з тим, що при пружному-пластичному деформуванні в контактній зоні протікають складні фізико-механічні процеси, вивчення яких на теоретичному рівні ускладнене, то задача математичного опису процесів деформування при пружно-пластичній течії металу цілком не вирішена. Тому вплив конструктивно-технологічних параметрів, зокрема, сили деформування, геометричних параметрів деформуючих роликів на шорсткість, залишкові напруги, зміни структури металу, корозійну стійкість і т.д. вивчають переважно експериментально. У зв'язку з наявністю великої кількості незалежних перемінних, що беруть участь у процесі обробки, багато авторів із усієї сукупності аргументів, що впливають на якість поверхні, виділяють найбільш істотні і, у першу чергу, це відноситься до сил деформування і площин контакту.

Як було встановлено в першому розділі, сила деформування і площа контакту при тих самих значеннях величин по-різному впливають на якість поверхневого шару, якщо дослідження проводять різними деформуючими роликами, як за формою, так і по розмірі.

У зв'язку з цим важливим є з'ясування питання про співвідношення результатів досліджень, отриманих при обробці валів і отворів тих самих параметрів. Це можливо тільки на основі аналізу між різними умовами деформування з урахуванням порівняння геометричних параметрів контактної зони і їхнього взаємозв'язку з якістю поверхневого шару. У першому наближенні можна порівнювати між собою контактні зони, припустивши, що однакові за

формою і розмірами контактні зони при одній і тій же глибині входження деформуючого ролика формують однакову якість поверхні. Однак при такому підході постає питання: що вважати однаковими контактними зонами?

Візьмемо, наприклад, два елліпсних контакти з однаковою площею й однаковими по розмірах півосями. Вони можуть мати різну орієнтацію стосовно осі оброблюваної деталі (рис. 2.10). Незважаючи на те, що геометричні параметри цих контактів однакові, отримані результати по якості обробки будуть різні. Перша пляма контакту утвориться великим по розміру тороїдальним роликом і меншим профільним радіусом. Другий контакт утвориться роликом невеликих діаметральних розмірів з порівняно великим профільним радіусом. Цей приклад показує, що необхідно порівнювати контактні зони, одержувані при обробці тим самим роликом.

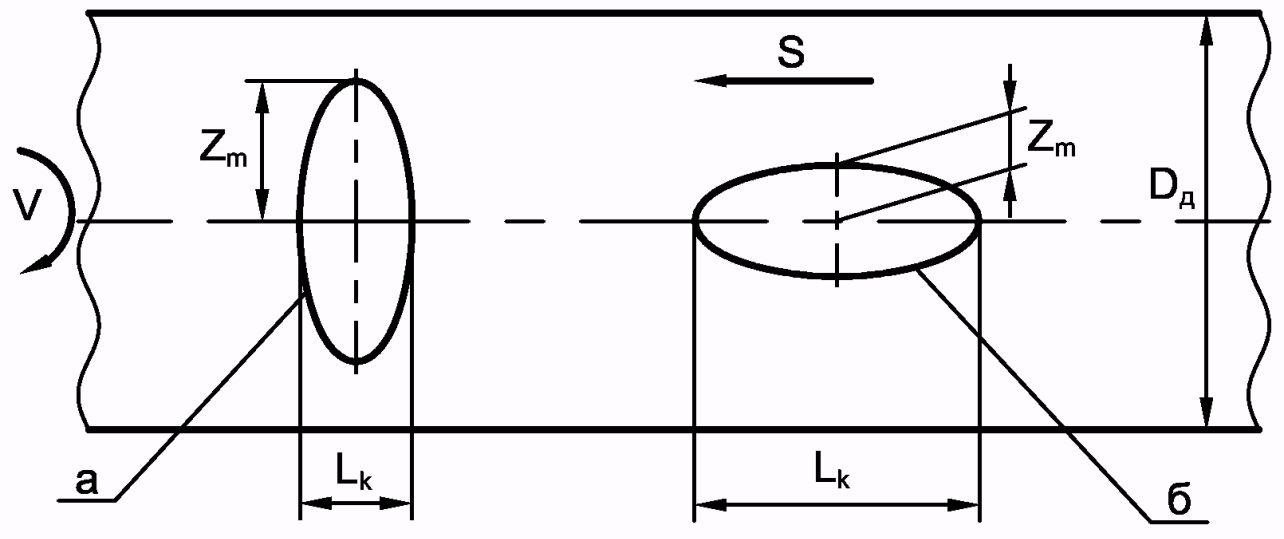
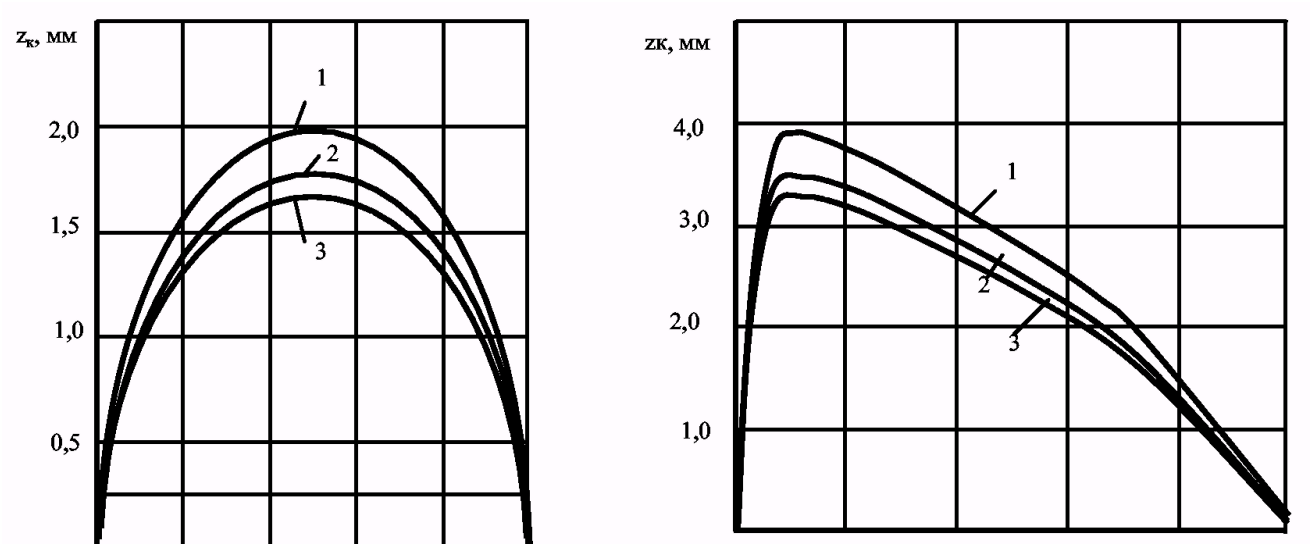


Рис. 2.10. Різні варіанти розташування еліпсного контакту відносно деталі:
а) більшою віссю в напрямку швидкості обертання ролика;
б) більшою віссю в напрямку подачі

Проаналізував отримані аналітичні залежності для визначення геометрії контакту, можна зробити висновок, що на розміри контактної зони впливають конструктивні параметри деформуючих роликів, орієнтація ролика стосовно осі деталі, розміри оброблюваної поверхні, вид обробки (вал чи отвір), глибина входження ролика й ін.

З графіків зміни напівширини контактної зони в залежності від її довжини, представлених на рис. 2.11 виходить при збільшенні значення діаметру заготовки, площа контакту при одній і тій же глибині входження ролика збільшується. Максимальні напруги в центрі площадки залишаться тими ж, у той час як сумарна сила буде зростати. Таким чином, можна зробити висновок, що порівнювати між собою потрібно площі контакту, отримані при обробці однаковими роликами, які ввійшли в поверхню деталі на ту саму глибину.



а) б)

Рис. 2.11. Зміна напівширини контакту по його довжині:
а) – при обробці профільним роликом; б) – при обробці конічним роликом; 1, 2 – радіус деталі 160 мм; 3 – радіус деталі 40 мм; 1 — при обробці отворів; 2 – при обробці вала діаметра 120 мм; 3 – при обробці вала h_m = 0,12 мм

Аналіз впливу геометричних параметрів деформуючих роликів на геометрію контактної зони при розкочуванні (обкочуванні) повинен відбуватись з урахуванням співвідношень розмірів роликів і деталей. Тому радіуси роликів за прямою схемою розкочування (обкочування) будемо визначати по формулі:

$$r_p = \frac{(R-\delta)\sin\psi}{1+\sin\psi}, \qquad (2.27)$$

а по другій схемі розкочування (обкочування) через проміжні опорні катки з залежності:

$$r_{p2} = \frac{R^2 + R_{ok} - 2R \cdot R_{ok} \cos\psi - r_k}{2\left(R - r_k - R_{ok} \cos\psi\right)}. \qquad (2.28)$$

При прямій схемі розкочування найбільша сила при одній і тій же частоті обертання деталі й однакових за формою і довжиною роликів буде створюватися двухроликовим розкатником, тому що тільки в цьому випадку можна установити в інструменті два урівноваженому і найбільших по розмірі ролика. Порівняння методів за прямою схемою деформування і деформування через проміжні опорні катки будемо розглядати між двухроликовим і п’ятироликовым разкатниками, тому що п’ятироликовый інструмент при другій схемі обробки має найбільший розмір опорних катків, а, отже, і найбільшу силу деформування.

Для аналізу співвідношення площ контактів була прийнята методика розрахунку геометричних параметрів контактної зони, приведена в підпункті 2.1.

Цінність наведеної приведеної методики полягає в її універсальності, тому що вона дозволяє розраховувати геометрію контакту, як при обробці вала, так і при обробці отвору, а також для різних конфігурацій і розмірів деформуючих роликів. Це дозволяє проводити порівняння процесу ППД при різних умовах обробки.

На основі запропонованої методики розрахунку геометричних параметрів контактної зони з застосуванням комп’ютера були побудовані залежності, показані на рис. 2.11. Графіки залежностей площ контактної зони від зміни радіуса оброблюваної поверхні при обробці тіл обертання (отворів і валів) побудовані з урахуванням зміни діаметрів деформуючих роликів, розрахованих за формулами (2.27) і (2.28), і наведені на рис. 2.12.

Аналіз отриманих графіків дозволяє зробити такі висновки. Площа контакту при обробці отворів при одній і тій же глибині входження і тих самих конструктивних параметрах деформуючого ролика більше, ніж при обробці валів, що мають ті ж діаметри. Причому, за схемою прямого розкочування різниця в площах досягає значної величини, більш ніж у 10 разів, і зростає пропорційно збільшенню діаметра оброблюваної деталі (рис. 2.13).

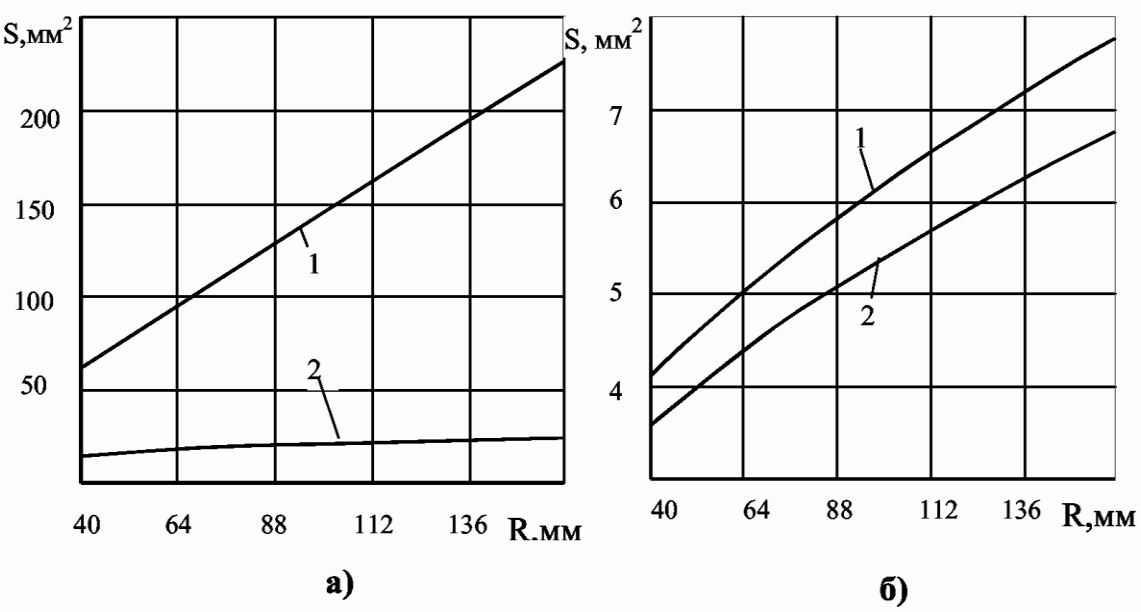


Рис. 2.12. Залежності площ контактної зони від змінирадіуса деталі при обробці тіл обертання (валів і отворів): а) розкочування за прямою схемою; б) розкочування через проміжні опорні катки;
1 – при обробці отворів; 2 – при обробці валів; h_m = 0,12 мм; $r_{пр}$ = 5 мм

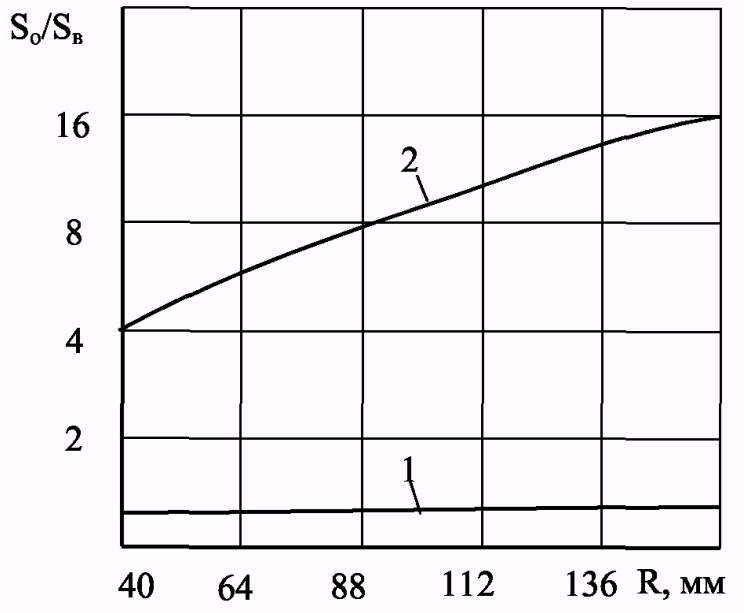


Рис. 2.13. Відношення площ контактних зон у залежності від діаметра оброблюваної деталі при обробці тіл обертання(отворів і валів):
1 – обробка через проміжні опорні ковзанки,
2 – обробка за прямою схемою двома роликами

Як видно з графіка, відношення площ контакту при обробці за прямою схемою зі збільшенням діаметра деталі росте по параболічному законі, а залежність при обробці отворів – практично постійна і має лінійний характер.

Що виходить з аналізу схеми, поданої на рис 2.14, де приведені особливості впровадження деформуючого ролика в поверхню вала й отвору рівних діаметрів.

Для пояснення отриманих висновків проведемо аналітичні дослідження впливу розмірів деформуючих роликів і деталі на напівширину контакту. Якщо припустити, що при входженні ролика в поверхню деталі на величину h_m, розмір ролика збільшується до розмірів оброблюваного отвору, то в межі в розглянутому перетині коло ролика стане концентрично колу приналежної деталі.

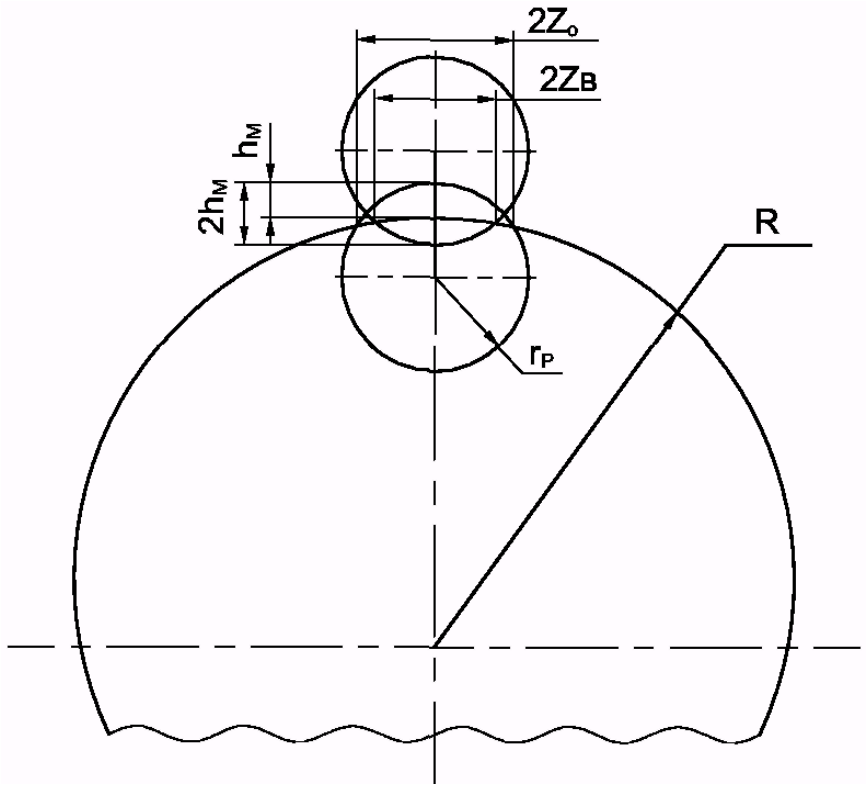


Рис. 2.14. Схема деформування отвору і вала рівних діаметрів роликом, увідшедшим на однакову глибину: r_p– радіус деформуючого ролика; R – радіус оброблюваної поверхні; h_m – максимальна глибина входження ролика в поверхню деталі, z_0, $z_в$ – напівширина контакту при обробці відповідно отвору і вала

Ширина контакту в площині перетину ролика з деталлю, що проходить через контурну лінію, буде прагнути до діаметра деталі. Якщо ролик війшов у поверхню вала і збільшується в розмірах до нескінченності ($R \to \infty$), напівширина контакту буде менше або дорівнювати значенню

$$z_в \le r_p^2 - \sqrt{r_p^2 - h_m^2}\ . \qquad (2.29)$$

Складемо відношення напівширини контактів, отриманих при обробці валів і отворів

$$\frac{z_0}{z_в} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{(R - r_p)\cdot(R + h_m)}{R + r - h_m}\right)^2} \Big/ r_p^2 - \sqrt{r_p^2 - h_m^2}\,. \qquad (2.30)$$

Знайдемо межу цього відношення при прагненні радіуса ролика до радіуса деталі. Очевидно, у цьому випадку чисельник у залежності (2.30) прагне до радіуса деталі, а знаменник до виразу ($R - \sqrt{R^2 - h_m^2}$). Таким чином, шукана межа буде дорівнювати:

$$\lim_{r_p \to R} \frac{z_0}{z_в} = \frac{R}{R^2 - \sqrt{R^2 - h_m^2}} = \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{h_m^2}{R^2}}}\,. \qquad (2.31)$$

Знаменник представленого виразу близький до нуля по абсолютній величині, а функція є монотонно зростаючої, тому що напівширина контакту при обробці отвору більше напівширини контакту при обробці вала і збільшується зі змінами радіуса ролика випереджальним темпом. Таким чином, зі зміною радіуса ролика при тому самому значенні діаметра отвору і глибини впровадження, напівширина контакту, а, отже, і площа контакту істотно збільшується.

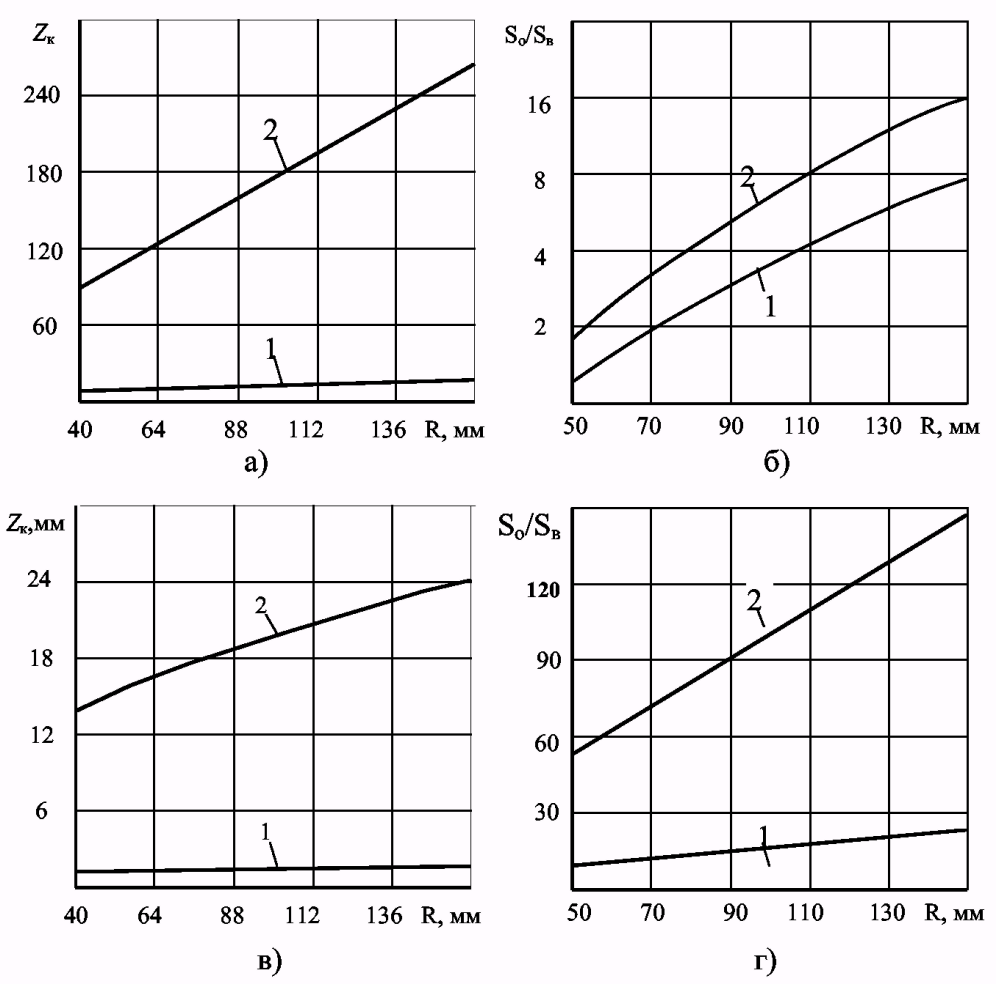


Рис. 2.15. Залежності напівширини площ контактів і радіусів роликів від радіуса оброблюваної деталі, отриманих на основі розрахункових залежностей для пружного контакту: а) за схемою прямого розкочування; б) розкочування через проміжні опорні катки; в) відношення площ контактів при обробці отворів і валів г) зміна радіусів роликів у залежності від радіуса обробки; 1 – для отворів; 2 – для валів; $L_р$ = 10 мм; погонне навантаження р = 850 МПа

Розглянемо аналогічне порівняння площ контактів, розрахованих по відомих залежностях рішення пружної контактної задачі. При паралельному розташуванні осей деталі і ролика відповідні формули будуть мати вигляд:

– при обробці вала

$$z_{в2} = 0{,}8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D + d_p} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)}; \qquad (2.32)$$

– при обробці отвору

$$z_{o2} = 0{,}8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D + d_p} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)}. \quad (2.33)$$

З побудованих графічних залежностей (рис. 2.15) видно, що співвідношення напівширин і площ контактних зон при пружному деформуванні поверхонь валів і отворів мають той же характер, що і при пружно-пластичному деформуванні (див. рис. 2.12. і 2.13).

2.5. Глибина зміцнення поверхневого шару заготовки в залежності від параметрів деформуючого елемента

Як було з'ясовано у першому розділі метою обробки ППД є зміна якісного стану поверхневого шару: зміцнення матеріалу деталі, створення сприятливих залишкових напруг, дрібнозернистої структури, зниження висоти мікро-нерівностей та ін. Це відбувається в тому випадку, коли в центрі площини контакту між роликом і деталлю напруження будуть перевищувати границю текучості.

Припустимо, що як критерії порівняння необхідно вибирати рівність максимальних напруг у контактах, утворених при обробці отвору й обробці вала, або однакову глибину впровадження ролика в поверхню деталі.

Геометричні параметри деформуючих роликів необхідно вибирати з урахуванням забезпечення одночасно декількох показників якості і, у першу чергу, шорсткості і глибини зміцнення. На шорсткість поверхні головним чином впливають зусилля деформування і величина профільного радіуса ролика. Чим більше профільний радіус ролика і зусилля деформування, тим нижче буде досягнута при обробці шорсткість. З багатьох відомих залежностей найбільш зручно для розрахунку шорсткості застосовувати формулу

$$R_z = R_{np} - \frac{\sqrt{4 \cdot R_{np}^2 - S_0^2}}{2}. \quad (2.34)$$

При обробці конічними роликами шорсткість залежить від заднього кута встановлення ролика відносно осі деталі. Його призначають у межах (0,5...0,8) град. Значення його не так істотно впливає на шорсткість у позначених межах, тому що при цих задніх кутах довжина стоку каплеподібного контакту досить велика. Аналітичні залежності для вибору зусилля деформування з метою досягнення необхідної шорсткості відсутні, через надзвичайну складність виявлення математичної моделі, у зв'язку з чим його вплив на шорсткість визначається експериментально для конкретних умов обробки. Продуктивність визначається подачею і швидкістю обертання інструмента. Швидкість обертання інструмента (колова швидкість обкочування) практично не впливає на якість обробленої поверхні й обмежується тільки можливостями обладнання, тому призначається довільно. Обмеженням є граничне значення, при якому можливе виникнення неприпустимих вібрацій. Ця задача вирішується усуненням дисбалансу інструменту (динамічним балансуванням) і за рахунок точного виконання деталей інструменту. Зокрема, маси всіх деформуючих елементів разом з вузлами, у яких вони встановлені, повинні мати мінімально можливі допуски на відхилення, що досягається зважуванням і видаленням зайвого металу.

Інший конструктивний параметр деформуючого елемента ролика – максимальний діаметр визначають, виходячи з добре зарекомендувавшої себе на практиці залежності для визначення глибини зміцнення при обробці валів [29]:

$$h_y = \frac{1}{1 + 0{,}7 \cdot \left(\frac{1}{R_в} + \frac{1}{r_{рв}} + \frac{1}{r_{пр}} \right)} \cdot \sqrt{\frac{P_y}{2 \cdot \sigma_m}} \qquad (2.35)$$

де $R_в$ – радіус оброблюваного вала,

$r_{рв}$ – радіус ролика, призначуваний при обробці валів для досягнення заданої глибини зміцнення,

$r_{пр}$ – профільний радіус ролика,

P_y – радіальна складового зусилля деформування,

σ_m – межа пружності матеріалу оброблюваної деталі.

З приведеної формули видно, що зі збільшенням радіуса деталі, профільного радіуса і діаметра ролика глибина зміцнення зменшується. Таким чином, збільшення діаметра ролика, що має метою підвищення зусилля деформування, не вирішує питання збільшення глибини зміцнення, навпаки необхідно зменшувати діаметр ролика при збереженні заданого зусилля.

При обробці валів існують рекомендації з вибору розмірів деформуючих роликів і профільного радіуса, з яких випливає, що діаметри роликів вибираються в межах d_p = (40...150) мм. При цьому для досягнення однієї і тої ж самої якості обробки, рекомендуюємі зусилля деформування пропорційні діаметрам. Виникає питання: якщо в зоні контакту при застосуванні різних по розмірах роликів і відповідних зусиль деформування умови обробки забезпечують ту саму якість, то чим пояснюється таке велике розшарування розмірів і з яких міркувань обирати той або інший ролик?

Розмір ролика залежить від несучої здатності підшипника, на якому він установлений: чим більше діаметр ролика, тим з більшою несучою здатністю можна установити підшипник усередині ролика. Тому для збільшення зусилля деформування необхідно збільшувати діаметр ролика, а збільшення діаметра ролика викликає збільшення площі контакту і зменшення глибини зміцнення відповідно до формули (2.35), при цьому середня напруга залишається постійною, у зв'язку з чим глибина зміцнення теж не буде мінятися.

При обробці отворів відцентровим розкочуванням, як було встановлено в підпункті 2.1, діаметри деформуючих роликів вибираються в залежності від їхньої кількості і діаметра оброблюваного отвору, причому характер зміни є дискретним. Тому, подальший розрахунок по визначенню глибини зміцненого шару необхідно починати з визначення діаметра ролика при обробці отвору, а потім установлювати відповідний йому діаметр ролика, що забезпечує ту ж глибину зміцнення, обумовлену з формули (2.35). Відповідно до цього алгоритм розрахунку повинний здійснюватися в наступному порядку. Визначають радіус ролика при обробці отвору:

– за схемою прямого розкочування:

$$r_{po1} = \frac{R \cdot \sin\psi - a}{1 + \sin\psi}; \tag{2.36}$$

– за схемою розкочування через проміжні опорні катки:

$$r_{po2} = \frac{R^2 + R_{ok}^2 - 2 \cdot R \cdot R_{ok} \cdot \cos\psi - r_k^2}{2 \cdot \left(R + r_k - R_{ok} \cdot \cos\psi\right)}, \tag{2.37}$$

де радіуси катків $r_к$ і осей розташування катків R_{ok} знаходять по формулах:

$$r_k = \frac{\left(R - \delta\right) \cdot \sin\psi - a}{1 + \sin\psi} \text{ та } R_{ok} = R - r_k - \delta \tag{2.38}$$

Вважаючи, що при обробці як отворів, так і валів глибина входження деформуючого ролика і максимальна напівширина контакту повинні бути рівні для забезпечення однакових законів розподілу й інтенсивності напруг, можна стверджувати, що максимальні величини напівширини контакту в обох випадках повинні дорівнювати один одному, тобто:

$$z_{кв} = z_{ко}$$

або

$$\sqrt{R_o^2 - \left[\frac{\left(R_o - r_{рв}\right) \cdot \left(R_o + h_k\right)}{R_o - \left(r_{ро} + h_k\right)}\right]^2} - \sqrt{R_в^2 - \left[\frac{\left(R_в + r_{рв}\right) \cdot \left(R_в - h_k\right)}{R_в + \left(r_{рв} - h_k\right)}\right]^2} = 0, \tag{2.39}$$

де $R_о$, $R_в$ – радіуси отвору і вала;

$r_{ро}$, $r_{рв}$ – радіуси роликів при обробці отворів і валів відповідно, що забезпечують рівні по формах і площам контактні зони.

Так як радіуси отвору і вала рівні один одному, то з цього виразу знаходимо значення радіуса деформуючого ролика, при якому у випадку обробки вала буде досягнута така ж глибина зміцнення, що і при обробці отвору:

$$r_{рв} = \frac{(R-c)\cdot(R-h_m)}{c-R+h_m}, \tag{2.40}$$

де

$$c = \frac{(R-c)\cdot(R+h_m)}{R-r_{ро}+_m}. \tag{2.41}$$

Силу деформування можна розрахувати по формулі:

$$p_y = 2\int_{0}^{L_k}\int_{-z_k}^{z_{kв}} \sigma_m \cdot f(\ell_k)\cdot\sqrt{1-\left(\frac{z}{z_k}\right)^2}\,dz d\ell_k\,, \tag{2.42}$$

де $f(\ell_к)$ – закон зміни напруг по лінії максимального входження ролика при припущенні, що максимальна напруга в зоні контакту $\sigma_m = 1$.

Для еліпсного контакту будемо мати:

$$f_e(\ell_k) = \sqrt{1-\left(\frac{0{,}5\cdot L_k-\ell_k}{0{,}5\cdot L_k}\right)^2}\,. \tag{2.43}$$

Для каплевидного контакту, що складається з заходної ділянки і ділянки збігу, визначаємо величину зміни напруги на західній ділянці

$$f_k(\ell_{k1}) = \sqrt{1-\left(\frac{\ell_k}{0{,}5\cdot L_k}\right)^2} \tag{2.44}$$

і на ділянці збігу, де приймаємо зміну напруг по лінійно мінливому законі

$$f_{сб}(\ell_{k2}) = \frac{K \cdot \sigma_m}{h_m} \cdot (L_k - \ell_k) \cdot tg\alpha, \tag{2.45}$$

де K, σ_m – величини, чкі обумовлюються експериментально.

Підстановка отриманих значень для радіуса ролика $r_{рв}$ і сили деформування P_y у формулу (2.35) дає значення глибини, що досягається при даних умовах, зміцнення. Якщо її значення не відповідає заданій величині, то збільшують або зменшують глибину входження ролика в деталь у залежності від знака необхідного виправлення і перераховують глибину зміцнення. Досягши необхідної розрахункової глибини зміцнення, знаходять відповідну їй частоту обертання розкатника (обкатника)

$$n = \sqrt{\frac{10 \cdot P_y \cdot \sin\eta}{0{,}034 \cdot p \cdot \left(1{,}1 \cdot L_k \cdot r_k^2 \cdot R_{ok} \cdot \cos\beta + L_p \cdot r_{po}^2 \cdot R_{op} \cdot \sin\eta\right)}}, \tag{2.46}$$

де кути β і η визначають із залежностей

$$\beta = \arccos\left(\frac{(r_{po} + r_k)^2 + R_{op}^2 - R_{ok}^2}{2 \cdot (r_{po} + r_k) \cdot R_{op}}\right), \tag{2.47}$$

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \psi - \beta. \tag{2.48}$$

На рис. 2.16 приведені графіки зміни радіусів деформуючих роликів при обробці отворів і валів, що забезпечують однакову глибину зміцнення в залежності від діаметрів оброблюваних отворів і валів та їх співвідношення.

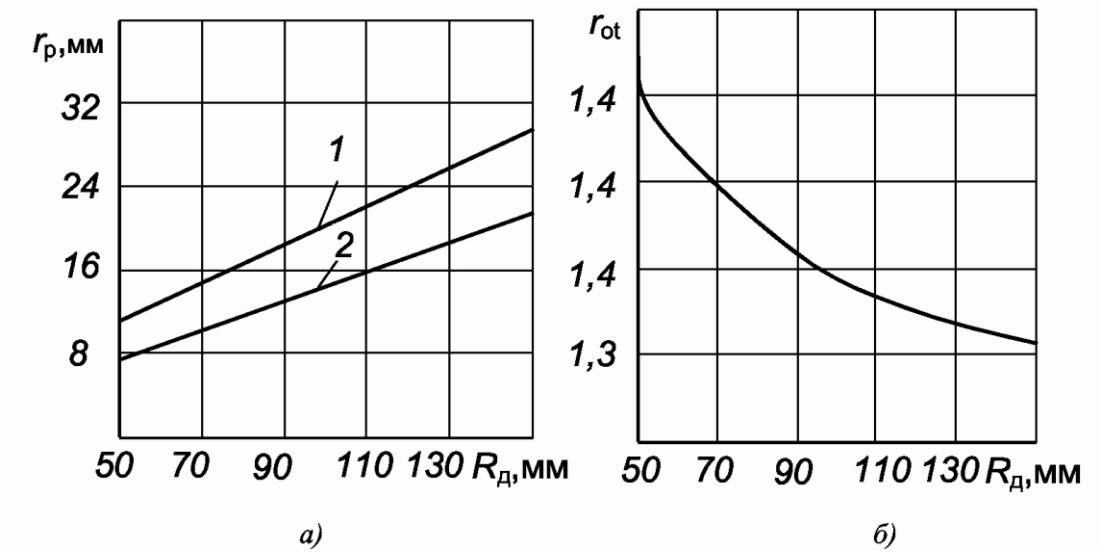


Рис. 2.16. Залежність зміни радіусів деформуючих роликів:а) від радіуса оброблюваної деталі, при забезпеченні однакової глибини зміцнення; 1 - при обробці вала; 2 - при обробці отвору; б) залежність співвідношення радіусів роликів при обробці валів і отворів

З приведених графіків виходить, що діаметри роликів при обробці валів у діапазоні зміни діаметральних розмірів оброблюваних деталей від 100 до 320 мм із точністю до 1,6 % більше в 1,4 рази в порівнянні з діаметрами деформуючих роликів, призначених для обробки отворів. Це означає, що, визначивши значення діаметра деформуючого ролика при обробці вала при необхідній глибині зміцнення, і, розділивши його на коефіцієнт, рівний 1,4, одержимо значення діаметра ролика для обробки отвору і досягнемо тієї ж глибини зміцнення.

Відповідно до формули (2.35), зі збільшенням радіусів ролика і оброблюваної деталі глибина зміцнення зменшується. Оскільки, при збільшенні радіуса оброблюваного отвору, одночасно збільшується і радіус ролика, то при одній і тій же частоті обертання розкатника (обкатника) то глибина зміцнення повинна зменшуватися. Однак, якщо збільшити кількість деформуючих елементів роликів до 5-7, то як видно з графіків, представлених на рис. 2.17, глибини зміцнення збільшуються. Це пояснюється тим, що одночасно збільшуються і сили деформування, викликані збільшенням розмірів опорних катків і роликів, а також збільшенням їх мас.

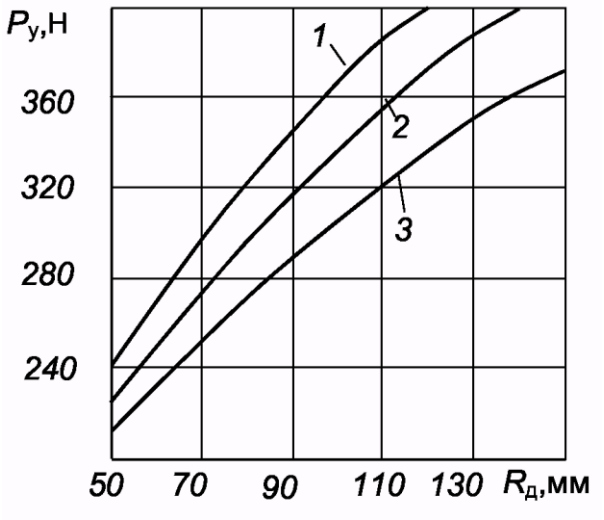


Рис. 2.17. Залежності глибини зміцнення від радіуса оброблюваного отвору:
1 – п'ять роликів; 2 – шість роликів; 3 – сім роликів;
n = 550 об/хв; $r_{пр}$ = 5 мм; $L_К$ = 80 мм; $L_р$ = 80 мм

Таким чином, можна зробити висновок, що для досягнення однієї і тієї ж глибини зміцнення частота обертання розкатника зі збільшенням діаметра оброблюваного отвору повинна зменшуватися. Крім того, із графіків залежностей глибини зміцнення від радіуса деталі (рис. 2.17) видно, що максимальна сила деформування і глибина зміцнення при одній і тій же частоті обертання розкатника досягаються, коли в розкатнику встановлено п'ять роликів.

3. КОНСТРУКЦІЯ ТА КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ОБКАТНИКА

3.1. Обкатник для обробки зовнішніх поверхонь тіл обертання

Спираючись на проведений у першому розділі аналіз та на отримані результати другого розділу, запропонована конструкція обкатника для зовнішніх циліндричних поверхностей (рис. 3.1.) в якій застосований деформуючий елемент куля, обкатник знаходиться у пружій державці, у яку вбудована замкнена система адаптації. Це дозволяє підвищити точність шляхом застосування елементів САУ пружною деформацією технологічної системи, і таким чином стабілізації розміру обробки.

Розроблена конструкція обкатника показана на рис. 3.1.

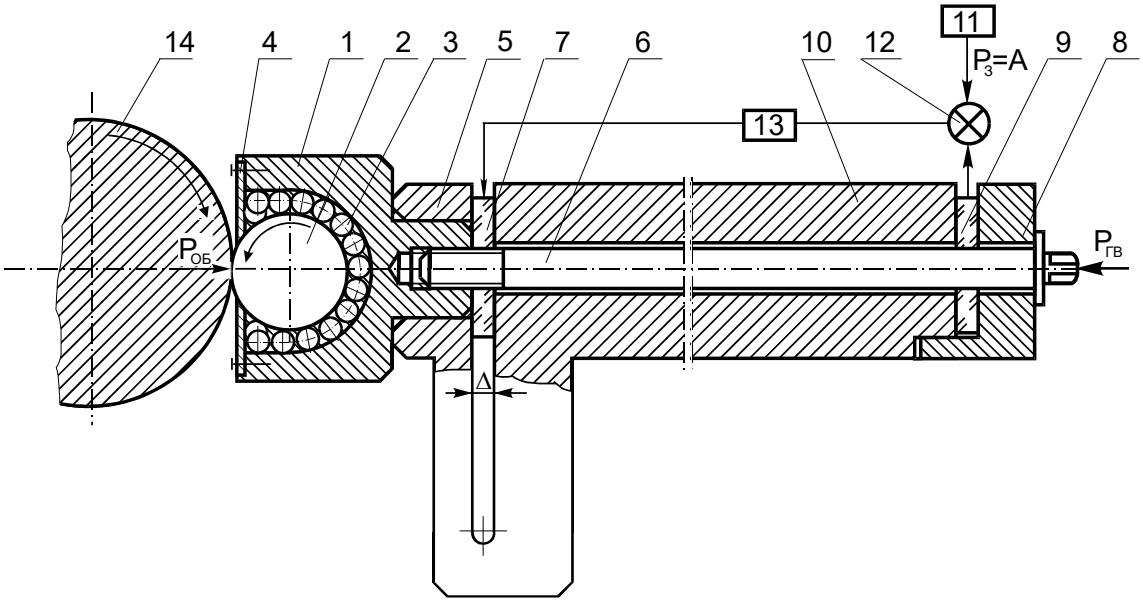


Рис. 3.1. Обкатний інструмент з інтегрованою системою управління

У корпусі обкатника 1 розміщено деформувальну кулю 2, яка спирається на кульки 3 меншого діаметра та закривається кришкою 4. Корпус 1 за допомогою виступу встановлюється в отвір державки 5 і фіксується гвинтом 6. У державці передбачено поперечний паз, у якому розташований механізм малих переміщень,

виконаний у вигляді п’єзоелемента 7. У поздовжньому отворі державки розміщено гвинт 6, який через шайбу 8 передає зусилля на датчик 9, наприклад п’єзоелектричного типу, та одночасно забезпечує з’єднання корпуса обкатника 1 з державкою 5. Система керування процесом містить задавальний пристрій 11, пристрій порівняння 12, перетворювач 13 і механізм малих переміщень 7.

Перед початком виконання обробки здійснюють налаштування системи керування. Для цього порівняльний пристрій 12 узгоджують із датчиком зусилля 9 та задавальним пристроєм 11, після чого на п’єзоелемент 7 від перетворювача 13 подається початковий керуючий сигнал. Попереднє зусилля $P_{ГВ}$, яке фіксується датчиком 9, встановлюють шляхом регулювання положення гвинта 6. У процесі початкового налаштування до порівняльного пристрою 12 надходять два сигнали: сигнал, що відповідає вихідній силі навантаження державки 5 інструмента $P_{ВИХ} = P_{ГВ}$, а також опорний сигнал постійного значення $P_З = A$, який формується задавальним пристроєм 11.

У процесі обробки деталі 14 у зоні контакту виникає сила обкочування $P_{об}$, яка передається на датчик зусилля 9. Датчик реєструє зміну навантаження та формує відповідний сигнал, що надходить до порівняльного пристрою 12. Якщо значення сили Роб разом із пружними деформаціями технологічної оброблювальної системи перевищує допустимий рівень, заданий пристроєм 11, відбувається зміна сумарного навантаження на датчик 9.

У цьому випадку сумарне зусилля вже не дорівнює вихідному значенню, тобто $P_{\Sigma} \neq P_{вих}$, і визначається як різниця між попередньо встановленим навантаженням та силою обкочування: $P_{\Sigma} = P_{гв} – P_{об}$.

Відхилення фактичного значення зусилля від заданого фіксується датчиком 9 і через порівняльний пристрій 12 передається до перетворювача 13. Перетворювач формує керуючий сигнал, який надходить на механізм малих переміщень – п’єзоелемент 7. Під дією цього сигналу п’єзоелемент змінює розмір $Δ$, унаслідок чого відбувається поворот корпусу обкатника 1. Такий поворот забезпечує компенсацію пружних деформацій технологічної оброблювальної системи та сприяє стабілізації розміру оброблюваної поверхні.

У разі ввімкнення механізму малих переміщень 7 п’єзоелемент змінює свій розмір на величину Δ, що спричиняє коригування положення корпусу обкатника та поступове збільшення зусилля $P_{гв}$. Регулювання відбувається до моменту, коли сумарна сила, яка діє на датчик 9, зрівнюється з попередньо встановленим вихідним навантаженням $P_{вих}$:

$$P_{\Sigma} = P_{ГВ} - P_{ОБ} = P_{ВИХ}, \quad (3.1)$$

де $P_{ГВ}$ – сила, яка генерується гвинтом 7;

$P_{ОБ}$ – значення технологічного навантаження у процесі обробки;

$P_{ВИХ}$ – попередня сила, задана гвинтом 6, перед обробкою.

У разі зміни сили обкочування змінюється і величина пружної деформації технологічної оброблювальної системи, унаслідок чого умова (3.1) порушується. Відхилення сумарного зусилля P_{Σ} реєструється датчиком 9. Сформований ним сигнал через порівняльний пристрій 12 і перетворювач 13 надходить до механізму малих переміщень 7.

Після отримання керуючого сигналу механізм малих переміщень змінює величину Δ у відповідному напрямку – збільшуючи або зменшуючи її залежно від характеру відхилення. Регулювання триває доти, доки система знову не досягне стану рівноваги, за якого виконується умова (3.1). Отже, для цього процесу можна записати такий вираз:

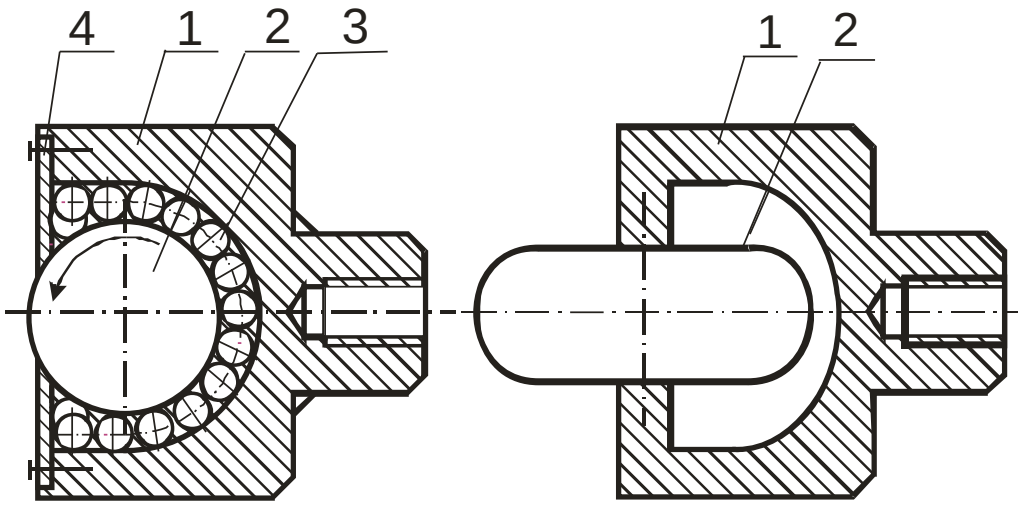
$$P_{\Sigma} = P_{ГВ} - P_{ОБ} = \text{const} = A. \quad (3.2)$$

Якщо в процесі обробки забезпечити незмінність пружного зміщення елементів технологічної системи $\Delta_{об} = \text{const}$, то положення деформувального інструмента відносно оброблюваної поверхні буде більш стабільним. Це дозволяє зменшити похибки, пов’язані з пружними відтисканнями системи, і, відповідно, підвищити точність отриманих розмірів деталі.

3.2. Особливості конструкції обкатного інструменту

У пружній державці обкатного інструменту з інтегрованою САУ розміром обробки, відповідно до технологічної необхідності можна використовувати обкатники як з деформуючим елементом куля (рис. 3.2, *а*), так і обкатники з будь-якими іншими деформуючими елементами, наприклад з профільним роликом (рис. 3.2, *б*).

Запропонований обкатник (рис. 3.2) складається з корпуса 1, внутрішня порожнина якого утворена циліндричним отвором і сферичною опорною поверхнею. Така форма корпуса забезпечує розміщення деформувальної кулі 2 та створює умови для її опори під час роботи інструмента. Деформувальна куля 2, показана на рис. 3.2, а, встановлена всередині отвору на кульках 3 меншого діаметра. Опорні кульки заповнюють проміжний простір між робочою кулею, стінками отвору корпуса і кришкою 4, забезпечуючи передавання навантаження та зменшення опору її переміщенню.



а) б)

Рис. 3.2. Конструктивні особливості обкатника: а – з деформуючим елементом куля; б – з деформуючим елементом ролик профільний

У процесі деформаційної обробки силове навантаження від робочого елемента передається на систему опорних кульок 3, розташованих уздовж

внутрішньої сферичної поверхні корпусу 1. Така схема забезпечує сприйняття та перерозподіл зусиль у конструкції інструмента. При цьому навантаження між кульками розподіляється нерівномірно, оскільки найбільші контактні сили виникають у тих кульках, що знаходяться на лінії дії прикладеної сили *P* (рис. 3.3).

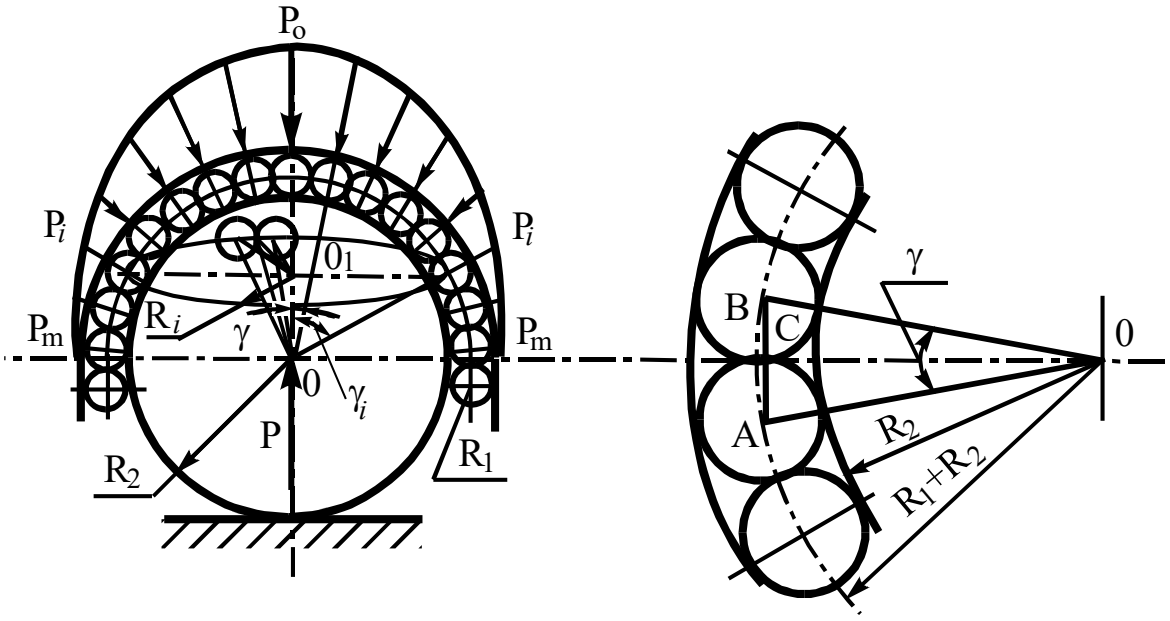


Рис. 3.3. Розрахункова схема деформуючого елемента по статичним навантаженням

Теоретичний аналіз конструкції інструмента по статичним навантаженням дозволили визначити емпіричну залежність для сили P_O, яка діє на максимально навантажену кульку в залежності від геометричних параметрів співвідношення радіусів опорної кулі та кулі деформуючої $R_1/R_2 = k$:

$$P_O = \frac{P}{1 + \pi \frac{k+1}{k} \sum_{i=1}^{m} \sin \frac{i \cdot 2k}{k+1} \cdot \cos^{5/2} \frac{i \cdot 2k}{k+1}}, \qquad (3.3)$$

де $m = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{k+1}{k}$ – кількість прошарків опорних кульок, які знаходяться у порожнині між деформуючою кулею, і півсферою отвору корпуса.

Кількість опорних кульок, на які діють навантаження, розташовані у півсфері отвору корпуса, визначалося за формулою:

$$N = 1 + \pi \frac{k+1}{k} \sum_{i=1}^{m} \sin \frac{i \cdot 2k}{k+1} = 1 + \pi \frac{k+1}{k} \cdot \sin \frac{k(m+1)}{k+1} \sin \frac{k \cdot m}{k+1} \operatorname{cosec} \frac{k}{k+1}. \qquad (3.4)$$

За допомогою отриманих рівнянь (3.3) і (3.4) були зроблені обчислення і отримані залежності величини кульок N і сили P_O на найбільше навантажену кульку від співвідношення розмірів опорних і деформиуючих кульок (R_1/R_2), приведені на рис. 3.4.

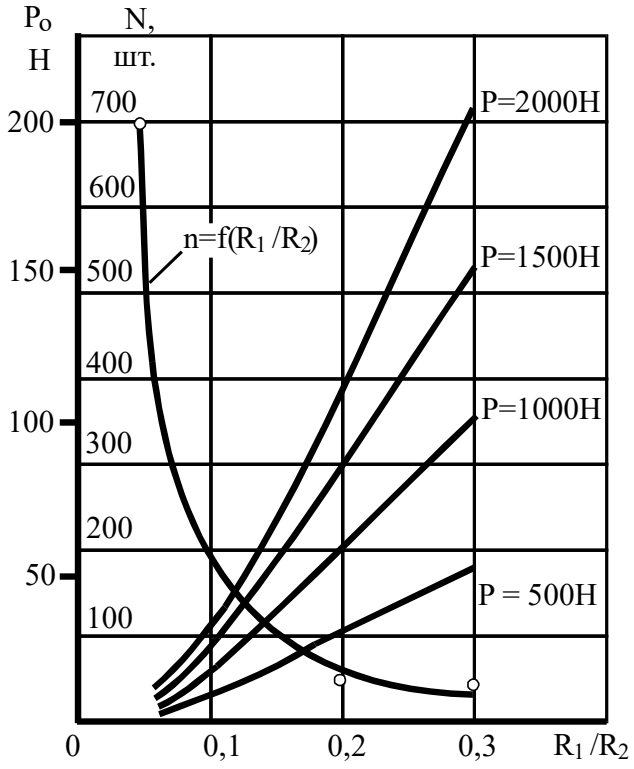


Рис. 3.4. Залежність N величини кульок і сили P_O на найбільше навантажену кульку від співвідношення розмірів опорних і деформуючих куль (R_1/R_2)

З графіків виходить, навантаження P_O на найбільше навантажену кульку, а отже, і контактні напруги зменшуються внаслідок збільшення їхньої кількості N і розподілу сили обкатування P на більшу кількість навантажених кульок.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБКАТНИКА

4.1. Загальні вихідні дані до розрахунку

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції необхідно вибрати "базу", яку приймаємо за основу для виявлення техніко-економічних переваг нового конструкторського рішення та визначення економічного ефекту при впроваджені нової конструкції інструменту у виробництво.

В якості бази для порівняння приймаємо тонке шліфування шліфувальним кругом на верстаті моделі 6Р82.

Впровадження методу обробки обкатником на токарному автоматі мод. 16К20Ф3 дозволить підвищити продуктивність праці, покращити якість обробки та експлуатаційні властивості виготовлених деталей.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$k_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e(1+p)}, \qquad (4.1)$$

де $N_д$ – річна програма виробництва деталей, шт./рік;

$T_{нор}$ – штучний час обробки однієї деталі, хв.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Потреба у шліфувальних кругах:

$$\kappa_б = \frac{20000 \cdot 2{,}1 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}01}{480 \cdot (20+1)} = 8 \text{ шт.}$$

Оскільки в обкатнику зношується тільки кулька, економічна стійкість якої складає t_e=180 хв., річна потреба в них складає:

$$к_{пр} = \frac{20000 \cdot 1,2 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{180} = 220 \text{ шт.}$$

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

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

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

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

Потреба у верстатах 6Р82 в базовому варіанті:

$$Q_р = \frac{20000 \cdot 2,1}{3980 \cdot 60 \cdot 1,1} = 0,4 \text{ (приймаємо 1 верстат)}$$

Потреба у токарному автоматі 16К20 в проектному варіанті:

$$Q_{пр} = \frac{20000 \cdot 1,2}{3980 \cdot 60 \cdot 1,1} = 0,23 \ (Q_{пр}=1)$$

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

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового вузлів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	50000	50000
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,1	1,2
4.	Площа, яку займає верстат	$м^2$	4,49	4,75
5.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	7,5	10,0
6.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	18/14	11/12
7.	Розряд роботи верстатника	розряд	3	3
8.	Оптова ціна верстата	грн.	632500	593000

4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

4.2.1. Витрати на проектування обкатника визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot З^{к}_{сг} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \quad (4.3)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$З^{к}_{сг}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

$к_{д}$ – додаткова заробітна плата конструктора, %;

$B_{с}$ – єдиний соціальний внесок (ЄСВ) від заробітної плати конструкторів, %;

$H_{в}$ – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{пк} = 10 \cdot 19 \cdot 102,56 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 10 \cdot 19 \cdot 102,56 \cdot \frac{45}{100} = 34920,0 \text{ грн.}$$

4.2.2. Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_{т} = H_{ор} \cdot T_{тех} \cdot З^{т}_{сг} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \quad (4.4)$$

де $T_{тех}$ – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$З^{т}_{сг}$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_{т} = 10 \cdot 21 \cdot 101,41 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 10 \cdot 21 \cdot 101,41 \cdot \frac{55}{100} = 40292,0 \text{ грн.}$$

4.3. Визначення витрат на виготовлення інструменту

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного інструменту розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{ор} = \sum_{i=1}^{n} C_{г_i} \cdot T_i \,, \tag{4.5}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$C_{г_i}$ – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i-й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$З_{ор} = 10,5 \cdot 92,015 = 966,16 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$В_о = \sum_{i=1}^{n} З_{ор_i} \cdot \frac{П_{рр_i}}{100} \,, \tag{4.6}$$

де $П_{рр_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

$$В_о = 966,16 \cdot \frac{280}{100} = 2705,24 \; грн.$$

в) цехові витрати:

$$В_{цех} = \sum_{i=1}^{n} З_{ор_i} \cdot \frac{П_{цр_i}}{100} \,, \tag{4.7}$$

де $П_{цр}$ – процент цехових витрат по кожному i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$В_{цех} = 966,16 \cdot \frac{232}{100} = 2241,49 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості інструменту

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $В_о$, грн.		Загальноцехові витрати $К_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,1	4	92,015	9,20	245	22,54	132	12,15
Механічні	10,5	4	92,015	966,16	280	2705,24	232	2241,49
Термічні	1,5	3	102,716	154,07	285	439,11	250	385,19
Гальванічні	1,3	3	92,754	120,58	280	337,62	150	180,87
Слюсарсько-складальні	1,1	4	92,015	101,22	210	212,55	142	143,73
Всього	14,5	–	–	1351,23	-	3717,07	-	2963,41

Виробничу собівартість обкатника розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{вир} = М_о + М_д + П_н + В_и + Т_в - В_{зв} + Е_{тех} + П_{тех} + \\ + З_{ор} + З_{др} + В_с + З_{цп} + В_о + В_{цех} + В_{зав} + В_{ін}, \quad (4.7)$$

де $М_о$, $М_д$ – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

$П_н$ – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні напівфабрикати зведено до табл. 4.3.

$Т_в$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$В_н$ – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

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

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

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

$B_с$ – єдиний соціальний внесок, грн.;

$З_{цп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$B_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на інструмент

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Сталь 45	кг	5,0	45,70	228,50
Покупні комплектуючі вироби					
1.	Підшипники	шт.	4	249,73	998,92
2.	Кульки	кг	0,2	118,62	23,72
Всього покупних виробів		–	–	–	1022,64

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Виробнича собівартість обкатника

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	$М_о$	табл. 3	228,50
2.	Матеріали допоміжні	$М_д$	4% від $М_о$	9,14
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги підприємств	$П_н$	табл. 3	1022,64
4.	Зворотні відходи	$– В_{зв}$	5% від $М_о$	13,71
5.	Транспортно-заготівельні витрати	$Т_в$	6% від ($М_о + М_д$)	50,41
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $Е_{тех}$	59,8% від $З_{ор}$	808,04
7.	Всього матеріальні витрати			2105,02

Продовження табл. 4.4

1	2	3	4	5
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 2	1351,23
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	135,12
10.	Відрахування в фонд соціального страхування	$В_{сс}$	22% від ($З_{ор}$ + $З_{др}$)	327,00
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	12,2% від $З_{ор}$	164,85
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_{о}$	табл. 2	3717,07
13.	Цехові витрати	$К_{цех}$	табл. 2	2963,41
14.	Загальнозаводські витрати	$К_{зав}$	221% від $З_{ор}$	2986,22
15.	Інші виробничі витрати	$В_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	45,94
16.	Виробнича собівартість	$С_{вир}$	Σ(7 ÷ 15)	13796,00

4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок виконуємо за формулою:

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

де $В_м$ – витрати на основні матеріали, грн. (не розраховуються, оскільки співпадають у базовому та проектному варіантах);

$В_з$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн.;

$В_е$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

$В_{мд}$ – витрати на допоміжні матеріали. грн.;

$В_р$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$В_п$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$В_{ір}$ – витрати на ріжучий інструмент, грн.;

$В_а$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування:

$$B_{з} = C_{г} \frac{T_{нор}}{60} \cdot (1 + K_{д}) \cdot (1 + K_{с}), \tag{4.9}$$

де $T_{нор}$ – час обробки деталі, хв.;

$K_{д}$, $K_{с}$ – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

В базовому варіанті:

$$B_{зб} = 82,810 \cdot \frac{2,1}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 3,8896 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{зп} = 82,810 \cdot \frac{1,2}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 2,2226 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$P_{е} = \frac{N_{в} \cdot K_{о} \cdot K_{N} \cdot K_{д}}{\eta_{м} \cdot \eta_{с}} \cdot \frac{T_{нор}}{60} \cdot Ц_{ел}, \tag{4.10}$$

де $N_{в}$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

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

K_{N} – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для токарних верстатів K_{N}=0,5...0,6, для шліфувальних K_{N}=0,4...0,5);

$K_{д}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом($K_{д}$=0,3...0,5);

$\eta_{с}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів($\eta_{с}$=0,86...0,9);

$\eta_{м}$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства($\eta_{м}$=0,92...0,96);

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

$$B_{ел}^{баз} = \frac{7,5 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,1}{60} \cdot 18,1 = 1,1936 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{10 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{1,2}{60} \cdot 18,1 = 0,8484 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

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

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 $K_{\text{п}}$ = 1,0).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 18,0 \cdot 2,1}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,5010 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 11,0 \cdot 1,2}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,1749 \text{ грн.}$$

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 вузла, грн./рік;

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

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{18 \cdot 980 + 14 \cdot 790}{3950} \cdot \frac{2,1}{60} = 0,2543 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{11 \cdot 980 + 12 \cdot 790}{3950} \cdot \frac{1,2}{60} = 0,1026 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{пер}) \cdot \gamma \cdot T_{нор}}{t_e (p+1)} K_{вт}, \qquad (4.13)$$

де S_u – первісна вартість універсального ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточувань ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані;

$S_{пер}$ – вартість однієї переточувань, грн.;

γ – питоме значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи;

$t_е$ – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{вт}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ір}^{б} = \frac{(490,5 + 20 \cdot 23,13) \cdot 0,7 \cdot 2,1}{480 \cdot (1 + 20)} \cdot 1,01 = 0,1408 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті вартість змінних кульок увійшла до собівартості обкатника. Витрати на його експлуатацію розраховуємо за формулою:

$$B_{ір}^{пр} = \frac{(0,6...0,7) \cdot C_{вир} \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot \eta_{зн}}, \quad (4.14)$$

де 0,6…0,7 – числове значення коефіцієнта, який враховує норму амортизації та експлуатаційні витрати;

$\eta_{зн}$ – нормативний коефіцієнт завантаження обладнання (для серійного типу виробництва $\eta_{зн}$=0,85).

$$B_{ір}^{пр} = \frac{0,6 \cdot 13796 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60 \cdot 0,85} = 0,0491 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.15)$$

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.

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{4,49 \cdot 3,0 \cdot 2,1}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,0999 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{4,75 \cdot 3,0 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,0604 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.16)$$

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

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

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\Ф}\right), \quad (4.17)$$

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

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

Таким чином, балансова вартість:

– 6Р82:

$$Ф_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 632500 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 752675 \text{ грн.},$$

– 16К20:

$$Ф_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 593000 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 705670 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{б}} = \frac{752675 \cdot 20 \cdot 2,1}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 1,3339 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{пр}} = \frac{705670 \cdot 20 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,7146 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне познач.	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	$B_з$	3,8896	2,2226
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	1,1936	0,8484
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,5010	0,1749
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	0,2543	0,1026
5.	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{ір}$	0,1408	0,0491
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,0999	0,0604
7.	Амортизація обладнання	$B_а$	1,3339	0,7146
Загальна сума		$B_е$	7,4131	4,1726

4.5. Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від проектування, виготовлення та експлуатації обкатника розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{р}} = \left(B_{\text{е}}^{\text{баз}} - B_{\text{е}}^{\text{пр}}\right) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{д}}, \tag{4.18}$$

де $N_д$ – річна програма випуску деталі із застосуванням інструменту, шт.;

$K_д$ – додаткові капітальні витрати, грн.

$$K_д = B_{пк} + B_т + Ф_{\text{бал}}^{\text{пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - Ф_{\text{бал}}^{\text{баз}} \cdot Q_{\text{баз}} + C_{вир} \cdot K_i^{пр} - Ц_i^{б} \cdot K_i^{б}, \tag{4.19}$$

де $B_{пк}$, $B_т$ – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва інструменту, грн.

$Ф_{\text{бал}}^{\text{пр}}, Ф_{\text{бал}}^{\text{баз}}$ – відповідно балансова вартість верстатів у проектному та базовому варіантах, грн.;

$Q_{пр}$, $Q_{баз}$ – потреба у верстатах відповідно в проектному і базовому варіантах;

$C_{вир}$ – собівартість виготовлення обкатника, грн.;

$Ц_i^б$ – вартість інструменту в базовому варіанті, грн.;

$K_i^{пр}, K_i^б$ – потреба в інструменті відповідно в проектному і базовому варіантах, шт./рік.

$$K_д = 34920 + 40292 + 705670 \cdot 1 - 752675 \cdot 1 + 13796 \cdot 1 - 490,5 \cdot 8 = 38079 \text{ грн.}$$

$$E_р = (7,4131 - 4,1726) \cdot 20000 - 0,16 \cdot 38079 = 58700 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_д}{(B_е^{баз} - B_е^{пр}) \cdot N_д}, \quad (4.20)$$

$$T_{ок} = \frac{38079}{(7,4131 - 4,1726) \cdot 20000} = 0,59 \text{ року} = 7,1 \text{ міс.}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проектний варіант	Зміна, % (+, –)
1.	Потреба в інструменті	шт./рік	8	1	+87,5
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	20000	20000	–
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,1	1,2	–42,8
4.	Потреба у верстатах	шт./рік	1	1	–
5.	Оптова ціна верстата	грн.	632500	593000	–6,2
6.	Собівартість виготовлення обкатника	грн.	–	13796,0	–
7.	Оптова ціна шліфувального кругу	грн.	490,5	–	–
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	7,4131	4,1726	–43,7
9.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	–	38079	–
10.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	міс.	–	7,1	–
11.	Річний економічний ефект	грн.	–	58700	–

ВИСНОВКИ

У даній роботі наведене розв’язання важливої науково-технічної задачі підвищення якості поверхонь деталей обертання шляхом збільшення ефективності процесу поверхневого пластичного деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою автоматичного управління процесом обробки

Основні результати роботи:

Поверхневе пластичне деформування застосуванням пружного накатного інструменту з системою автоматичного управління процесом обробки забезпечує необхідну якість обробки, покращує фізико-механічні властивості обробленої поверхні, підвищити продуктивність та стійкість інструмента.

На основі застосування методу перетинів ролика й оброблюваної деталі двома перпендикулярними площинами отримані математичні залежності для визначення всіх геометричних параметрів контактної зони при обробці деталей ППД роликами будь-яких типорозмірів, які дозволяють проводити порівняльний аналіз впливу конструктивно-технологічних параметрів і режимів обробки на якість і продуктивність за єдиною методикою.

Встановлено, що для досягнення однієї і тієї ж глибини зміцнення частота обертання обкатника зі збільшенням діаметра оброблюваного отвору повинна зменшуватися. Максимальна сила деформування і глибина зміцнення при одній і тій же частоті обертання обкатника досягаються, коли в обкатнику встановлено п’ять роликів.

Конструктивна простота обкатника є однією з його важливих технологічних переваг, оскільки вона дає змогу реалізовувати процес обробки з відносно великими подачами без істотного ускладнення оснащення. Завдяки цьому інструмент може бути використаний для продуктивної обробно-зміцнювальної обробки широкої номенклатури деталей обертання. Його застосування є можливим як для зовнішніх, так і для внутрішніх поверхонь, а також за різних схем взаємного руху інструмента і заготовки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аулін В. В., Тихий А. А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький : Лисенко В. Ф.– 2017.– 278 с.

2. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.

3. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Китичок П. О. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.090202 «Технологія машинобудування», 7.090203 «Металорізальні верстати та системи». – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 516 с.

4. Афтаназів І. С., Шевчук Л. І., Строган О. І., Бойко О. О. Моделювання пристрою для вібраційної обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням // Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 3-7 лютого 2020 р. – Львів – Плай, 2020. – С. 51–54.

5. Афтаназів І.С. та ін. Технологічні методи забезпечення надійності машин.- Київ: КИТ, 2004. –148 с.

6. Грушко О. В., Кухарь В. В., Молодецька Т. І. Визначення силових характеристик процесів обробки тиском методом еквівалентної оцінки // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : збірник наукових праць. – Луганськ, 2012. – № 31. – С. 218–226.

7. Грушко О. В., Огороднiков В. А., Побережний М. І., Єленич М. П. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 6. – С. 90–93.

8. Денисенко М. Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. Вісник ТНТУ. 2011. Спецвипуск, Частина 2. С. 201-210.

9. Дерефінка І. С. Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням / І. С. Дерефінка // Вісн. Нац. Ун-ту«Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2007. – № 583. –С. 18-24.

10. Дерібо О. В., Сердюк О. В., Сивак І. О. Електрогідравлічний стежний привод пристрою для обробки поверхневим пластичним деформуванням // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 76–79.

11. Захаркін О.У. Технологічні основи машинобудування: Навчально-методичний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2004. - 98 с.

12. Захарчук В. І., Захарчук О. В. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів [Електронний ресурс] : електронний посібник з дисципліни // Луцький національний технічний університет. – 2018. – Режим доступу: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/11/index.html

13. Зигуля С. М. Сучасний стан і аналіз застосування поверхневого пластичного деформування у поліграфічному машинобудуванні // Технологія і техніка друкарства. – 2013. – № 2(40). – С. 69–82. – DOI: https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(40).2013.30739

14. Іоргачов В. Д. Технологічне забезпечення показників зміцнення поверхневого шару деталей машин методом пластичного деформування : дис. … канд. техн. наук : 05.02.08 / Іоргачов Вадим Дмитрович. – О., 2008. – 179 с.

15. Карватко О. В. Експериментальне дослідження процесу обкатки роликом // Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 29 травня – 1 червня 2006 р. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – С. 126–128.

16. Киричок П. О. Зміцнення поверхонь металевих деталей : навч. посіб. / П. О. Киричок, В. Г. Олійник, Т. Ю. Киричок. — К. : Преса України, 2004.– 240 с.

17. Лебеденко Ю. Ф. Основи обробки матеріалів різанням та інструмент: Навчальний посібник для підготовки молодших спеціалістів та бакалаврів

машинобудівних спеціальностей / Ю. Ф. Лебеденко, С. Є. Сліпченко. – Харків: ФАКТ, 2020. – 344 с.

18. Ляшенко Б. А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. Зб. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль.: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2004. С. 381-386.

19. Марущак М. В. Основні принципи деформаційного зміцнення металів. Аналіз методів та пристроїв, які використовуються для пластичного поверхневого деформування [Електронний ресурс] // Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14–23 березня 2018 р. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2018/paper/download/5230/4405

20. Матвійчук В. А., Драчишин В. І. Вдосконалення методу поверхневого пластичного деформування на основі аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару виробів // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – 2012. – Вип. 10(2). – С. 172-177.

21. Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування // Теорія та практика обробки металів тиском / за ред. В. О. Богуслаєва. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. – С. 339–360.

22. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Добранюк Ю. О. Розробка процесів холодного торцевого розкочування із врахуванням впливу технологічних параметрів на напрям плину металу // Вібрації в техніці та технологіях : Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2015. – Вип. 2(78). – С. 92–96.

23. Матвійчук В. А., Штуць А. А., Явдик В. В. Розвиток технологічних можливостей штампування обкочуванням // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – 2015. – Вип. 1. – С. 27-33.

24. Огороднiков В. А., Гречанюк М. С., Поляков А. П. Енергетичний критерій зносу сідлово-зчіпного пристрою // Вісник машинобудування та транспорту. – 2017. – Вип. 1. – С. 67–76.

25. Огороднiков В. А., Губанов А. В., Поліщук Л. К. Енергія зношування поверхонь тертя деталей машин // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – Вип. 3. – С. 80–83.

26. Олійник В. Г. Алгоритм керування технологічним процесом оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства. – К. : ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 1-2. – С. 188-195.

27. Паливода Ю.Є. Методи підвищення експлуатаційної надійності і довговічності дисків бурякозбиральних машин // Сільськогосподарські машини: збірник наукових статей ЛНТУ № 31 / Левкович М.Г., Гудь В.З., Гупка А.Б. – М., 2015. – С.121 – 127.

28. Пат. 25321 Україна, МПК B24B 39/00. Ролик для обкочування металевих деталей / А. Г. Любченко, В. К. Лобанов, Г. І. Пашкова. – № u200701118 ; заявл. 05.02.2007 ; опубл. 10.08.2007 ; Бюл. № 12. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/308124/

29. Пат. на винахід 50821 Україна, МПК B24B 39/00, B24B 51/00. Інструмент для обробки обкаткою / В. М. Пестунов, О. В. Лисенко. - заявник і патентовласник Кіровоград. держ. техн. ун-т. - № 99105799; заявл. 25.10.1999 ; опубл. 15.11.2002 ; Бюл. № 11. - 3 с. : іл. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/361363/.

30. Пат. на винахід 76462 Україна, МПК B 24 B 39/00. Ролик для обкочування металевих деталей / О. В. Сердюк, Ярошенко, № u 2012 05857, Бюл. №1, заявл. 14.05.2012, опубл. 10.01.2013 ; бюл. № 1. – 4 с. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1190285/.

31. Пестунов В. М., Лисенко О.В. Розробка та дослідження модульних систем адаптації // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Машинобудування. - К. : НТУУ "КПІ", 2000. - № 39. - С. 196-199. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11285.

32. Писаренко В. Г., Берник П. С., Сивак Р. І. Технологічні методи підвищення надійності деталей машин : монографія. – Вінниця : Едельвейс і К, 2008. – 167 с. – ISBN 978-966-2150-45-2

33. Прокопчук О. В. Дослідження та розробка технології і пристроїв для відновлення сталевих деталей поверхневим пластичним деформуванням / О. В. Прокопчук, В. І. Гавриш, Д. Д. Марченко // Перспективна техніка і технології-2016 : матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 20-22 вересня 2016 р., м. Миколаїв / Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв : МНАУ, 2016. - С. 150-162. – URL: https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/5092

34. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні: Навчальний посібник. – Київ: Вища школа, 1993. – 414 с.

35. Сердюк О. В., Сивак І. О., Карватко М. А. Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика // Наукові нотатки : міжвузівський збірник за галузями знань «Технічні науки». – 2013. – Вип. 40. – С. 251–256.

36. Сердюк О. В., Сивак І. О., Савуляк В. В. Напружено-деформований стан в осередку деформації при втисканні тороїдального ролика // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій : матеріали 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції, м. Львів, 30–31 жовтня 2014 р. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2014. – С. 48–49.

37. Сердюк О. В., Сивак І. О., Сухоруков С. І., та Сивак Р. І. Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»), Випуск 54.– 2016.– с. 277-281,

38. Сивак І. О., Сердюк О. В., Шевчук В. Г. Дослідження напружено-деформованого стану при поверхневій пластичній деформації // Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування : матеріали II

Міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 15–16 листопада 2016 р. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – С. 218–220.

39. Сивак Р. І., Нахайчук О. В., Огороднiков В. А. Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому стані // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – 2009. – Вип. 2. – С. 79–83.

40. Сивак Р. І., Огороднiков В. А. Холодне комбіноване видавлювання : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 179 с. – ISBN 978-966-641-397-3.

41. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник. – К: НУХТ, 2010. – 547 с.

42. Штуць А. А., Матвійчук В. А. Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням трубних заготовок // Збірник наукових праць ВНАУ. Серія : Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – № 3(95). – С. 178–184.

43. Becerra-Becerra E., Aguilera Ojeda C. O., Saldaña-Robles A., Reveles-Arredondo J. F., Barco-Burgos J., Vidal-Lesso A. A review of numerical simulation of ball burnishing process. Finite Elements in Analysis and Design. 2023. Vol. 218. Article 103926. DOI: https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.103926.

44. Cagan S. C. Analysis of surface roughness after ball burnishing process under dry and MQL conditions // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 4. – Article 1746. – DOI: https://doi.org/10.3390/app15041746.

45. Cagan S. C., Buldum B. B. та ін. An investigation into ball burnishing process of magnesium alloy on CNC lathe using different environments // Journal of Magnesium and Alloys. – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 1061–1070. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.008.

46. Cagan S. C., Leksycki K. Analysis of surface roughness after ball burnishing of pure titanium under environmentally friendly conditions. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 4. Article 1746. DOI: https://doi.org/10.3390/app15041746.

47. Collins I. F. A simplified analysis of the rolling of a cylinder on a rigid/perfectly plastic half-space // International Journal of Mechanical Sciences. – 1972. – Vol. 14. – P. 1–14. – DOI: https://doi.org/10.1016/0020-7403(72)90002-1.

48. de Oliveira D. A., Martins A. M., de Castro Magalhães F., Abrão A. M. Characterization of the topography generated by low plasticity burnishing using advanced techniques // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 448. – Article 128891. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128891.

49. El-Axir M. H. An investigation into roller burnishing // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2000. – Vol. 40, № 11. – P. 1603–1617. – DOI: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00019-5.

50. Hardy C., Baronet C. N., Tordion G. V. The elasto-plastic indentation of a half-space by a rigid sphere. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1971. Vol. 3, Issue 4. P. 451–462. DOI: https://doi.org/10.1002/nme.1620030402

51. Hassan A. M. The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 72, № 3. – P. 385–391.

52. John M., Menezes P. L. Ultrasonic surface rolling process: Properties, characterization, and applications // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 22. – Article 10986. – DOI: https://doi.org/10.3390/app112210986.

53. Keymanesh M., Ji H., Tang M., Zhang X., Huang K., Wang J., Feng P., Zhang J. Ultrasonic surface treatment techniques based on cold working: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 134, № 11–12. – P. 4949–4979. – DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-024-14365-2.

54. Lavrys S. M., Pohrelyuk I. M., Sheykin S. Ye., Rostotskyi I. Yu. The influence of the initial structure of high-strength titanium alloy on surface hardening and roughness after ball burnishing. Physicochemical Mechanics of Materials. 2024. Vol. 60, No. 6. P. 110-117. DOI: https://doi.org/10.15407/pcmm2024.06.110.

55. Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels // Precision Engineering. – 2005. – Vol. 29. – P. 253–256. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.02.002.

56. Marshall E. A. Rolling contact with plastic deformation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1968. – Vol. 16, № 4. – P. 243–254. – DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5096(68)90032-X

57. Maximov J. T., Duncheva G. V., Anchev A. P., Ichkova M. D. Slide burnishing – review and prospects // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 104, № 1–4. – P. 785–801. – DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-019-03881-1.

58. Maximov J., Duncheva G. Improvements in the surface integrity and operating behaviour of metal components through slide burnishing // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 22. – Article 12182. – DOI: https://doi.org/10.3390/app152212182.

59. Nikitin I., Besel M. Correlation between residual stress and plastic strain amplitude during low cycle fatigue of mechanically surface treated austenitic stainless steel AISI 304 and ferritic–pearlitic steel SAE 1045 // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 491, Issues 1–2. – P. 297–303. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.03.034.

60. Pape F., Coors T., Poll G. Studies on the influence of residual stresses on the fatigue life of rolling bearings in dependence on the production processes // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 6. – Article 56. – DOI: https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00056.

61. Rotella G., Filice L., Micari F. Improving surface integrity of additively manufactured GP1 stainless steel by roller burnishing // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69, № 1. – P. 513–516. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.015.

62. Skoczylas A., Zaleski K., Matuszak J. Evaluation of the effectiveness of surface defect removal by slide burnishing. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 13. Article 7398. DOI: https://doi.org/10.3390/app15137398.

63. Yaman N., Sunay N., Kaya M., Kaynak Y. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 108. – P. 681–686. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.106.

64. Yen Y. C., Sartkulvanich P., Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process // CIRP Annals. – 2005. – Vol. 54, № 1. – P. 237-240.

65. Zhou Zhen-yu, Zheng Qiu-yang, Ding Cong, Yan Ju-yu, Piao Zhong-yu. Effect of surface burnishing process with different strain paths on the copper microstructure // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 71. – P. 653–668. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.058.