

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Вдосконалення процесу комбінованого протягування
глибоких отворів у сталевих деталях»**
**«Improvement of the process of combined broaching
of deep holes in steel parts»**

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ГМ-24М-З
ОПП «Галузеве машинобудування»
Спеціальності
133 «Галузеве машинобудування»
_____ Віталій ПАНОВ

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач
_____ Павло ЄРЬОМІН

Рецензент: к.т.н., доц.
_____ Андрій ТИХИЙ

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-професійна програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

«___» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА
Віталія ПАНОВА**

(прізвище, ім'я, по батькові)

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. Тема роботи: | Вдосконалення процесу комбінованого протягування глибоких отворів у сталевих деталях |
| 2. Керівник роботи: | к.т.н., ст. викл. Павло ЄРЬОМІН |
| 3. Строк подання роботи до захисту | «22» травня 2026 р. |

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: Підвищення ефективності роботи комбінованого протяжного інструмента для забезпечення заданих розмірів та високої якості обробленої поверхні глибоких отворів у деталях типу втулка в умовах дрібносерійного виробництва.

Завдання:

- вивчити механіку процесу поділу (руйнування) стружки за допомогою попередньо сформованої системи регулярних та частково регулярних технологічних канавок;
- визначити засоби та методи одержання регулярних та частково регулярних технологічних канавок за допомогою комбінованого протягування з одночасним вивченням кінематики та механіки робочих елементів при обробці глибоких отворів;
- розробити рекомендації для виготовлення та подальшої експлуатації вдосконаленого комбінованого протяжного інструменту;
- провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання вдосконаленого інструменту;
- розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 2	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 3	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 4	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Лютий 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Лютий 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Лютий-березень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Березень 2026	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Квітень 2026	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Травень 2026	вик.
7	Графічна частина та оформлення	Травень 2026	вик.
8			
9			
10			

Дата видачі завдання «__» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Павло ЄРЬОМІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «__» _____ 2026 р.

Здобувач _____ Віталій ПАНОВ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Панов В.В.

Вдосконалення процесу комбінованого протягування глибоких отворів у сталевих деталях.

Вип. квал. роб. – ЦНТУ, 2026. – 77 с., 16 іл., бібліогр., 10 арк.

В кваліфікаційній магістерській роботі доказана можливість поділу стружки за рахунок взаємодії самообертальних деформуючих та різальних елементів з оброблюваною поверхнею отвору. Вдосконалено метод формування часткового регулярного макрорельєфу, який ґрунтується на кінематичній схемі протягування за допомогою самообертальних блоків. Визначено діапазон оптимальних значень кута нахилу рельєфоутворювальних елементів деформуючих секцій до вектора лінії швидкості протягування, який забезпечує працездатність інструмента і потрібні розміри отриманих канавок рельєфу. За базову конструкцію для розробки комбінованого інструменту обрана така, яка найбільш достатньо вивчена і досконала серед відомих, а саме – секція деформуюче-ріжучої(комбінованої) протяжки.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень при вдосконаленні конструкції, виробництві та подальшій експлуатації запропонованого комбінованого протяжного інструменту складає у виробника 11930 грн., у споживача 145900 грн.

Актуальність: Проведені дослідження процесу протягування глибоких отворів у сталевих деталях дозволили підібрати раціональні параметри комбінованого протяжного інструмента, а саме – геометричні параметри його робочих елементів та їх взаємне розташування у складі модульної конструкції комбінованої протяжки/прошивки.

Практичне значення: Отримані результати дослідження дозволяють вдосконалювати технологічний процес та комбінований протяжний інструмент для даного виду обробки металів, а також оцінити ефективність використання вдосконаленого обладнання для комбінованого протягування за даною схемою.

Ключові слова: комбіноване протягування, регулярний та частковий мікрорельєф, енергосилові параметри, глибокий отвір, утворення стружки, сталь.

Summary

Panov Vitaliy. Improvement of the process of combined broaching of deep holes in steel parts. Graduation thesis for the educational degree «Master»: CNTU, 2026. - 77 p. Presentation materials 10 slides.

In the master's qualification thesis, the possibility of chip segmentation due to the interaction of self-rotating deforming and cutting elements with the machined surface of a hole has been proven. The method for forming a partial regular macrorelief has been improved; this method is based on a broaching kinematic scheme using self-rotating blocks. The range of optimal values of the inclination angle of the relief-forming elements of the deforming sections relative to the velocity vector of the broaching motion has been determined, ensuring tool operability and the required dimensions of the resulting relief grooves. As a basic design for the development of the combined tool, the most thoroughly studied and advanced among the known designs was selected, namely, the deforming–cutting (combined) broaching section.

The expected annual economic effect from the implementation of research results in the improvement of design, production, and subsequent operation of the proposed combined broaching tool is 11930 UAH for the manufacturer and 145900 UAH for the consumer.

Relevance: The conducted studies of the deep-hole broaching process in steel components made it possible to determine rational parameters of the combined broaching tool, namely the geometric parameters of its working elements and their mutual arrangement within the modular structure of the combined broaching/punching tool.

Practical significance: The obtained research results make it possible to improve the technological process and the combined broaching tool for this type of metal processing, as well as to evaluate the efficiency of using the improved equipment for combined broaching according to the proposed scheme.

Keywords: combined broaching, regular and partial microrelief, energy–force parameters, deep hole, chip formation, steel.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень термінів	8
Вступ	9
1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1 Регулярні та частково регулярні мікрорельєфи, їх види та призначення .	11
1.2 Сучасний стан дослідження регулярних та частково регулярних рельєфів, існуючі методи їх отримання	13
1.3 Використання мастильно-охолоджувальних рідин при нанесенні регулярного та частково регулярного рельєфу	19
1.4 Типові протяжні інструменти для обробки глибоких отворів	21
1.5 Висновки, мета і задачі дослідження	26
2 МЕТОДИКА НАНЕСЕННЯ РЕГУЛЯРНОГО ТА ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ОБРОБЛЮВАНІ ПОВЕРХНІ	28
2.1 Призначення регулярного мікрорельєфу	28
2.2 Наукове формулювання механізму подрібнення стружки з використанням рівнянь напружень	30
2.3 Алгоритм утворення нерегулярного рельєфу на внутрішній поверхні глибокого отвору	33
2.4 Оцінка стану отриманого регулярного та нерегулярного мікрорельєфу .	39
3 КОНСТРУКЦІЯ СЕКЦІЇ КОМБІНОВАНОЇ ПРОТЯЖКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ГЛИБОКИХ КРУГЛИХ ОТВОРІВ У СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ	42
3.1 Основні параметри регулярного та частково регулярного рельєфу	42
3.2 Технологічні переваги використання твердосплавних робочих елементів та рекомендації щодо вибору профілю отримуваної канавки	43
3.3 Характеристика конструкції протяжного інструменту та принцип його дії	46
3.4 Розрахунок на міцність деформуючих елементів протяжки	49
3.5 Розрахунок на міцність різьбового з'єднання	52

4 Економічне обґрунтування доцільності використання запропонованого комбінованого інструменту для протягування глибоких отворів у сталевих деталях	57
4.1 Загальні вихідні дані	57
4.2 Витрати на проектування комбінованої протяжки	60
4.3 Витрати на технологічну підготовку виробництва комбінованої протяжки	61
4.4 Визначення витрат на виготовлення інструменту	61
4.5 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	65
4.6 Розрахунок показників економічної ефективності	70
5 Загальні висновки	73
Список літератури	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ ТЕРМІНІВ

- РМР – регулярні мікрорельєфи;
ПРМР – повністю регулярний мікрорельєф;
ЧРМР – частково регулярним мікрорельєфом;
МОР – мастильно-охолоджувальна рідина;
 h_k – глибина канавок;
 S_o – осьовий крок мікрорельєфу;
 S_k – круговий крок мікрорельєфу;
 F_k або $F_{відн}$ – відносна площа заглиблення;
 θ – кут напрямку нерівностей;
ХПД – холодне пластичне деформування;
 γ – кут сітки рельєфу

Актуальність теми

Протягування глибоких отворів у сталевих деталях належить до високоточних і енергоємних процесів механічної обробки, що характеризуються обмеженим простором різання, значною довжиною контакту інструмента з заготовкою та ускладненими умовами відведення стружки. У таких умовах ефективне подрібнення стружки є одним із ключових факторів стабільності, продуктивності та якості технологічного процесу.

У процесі протягування глибоких отворів стружка утворюється в замкненому або напівзамкненому об'ємі стружкових канавок, де відсутні сприятливі умови для її вільного виходу. Формування довгої, суцільної стружки призводить до її накопичення в стружкових канавках протяжки, які мають обмежений об'єм або безпосередньо в отворі деталі, що ускладнює подальший рух інструмента. Також при низьких (від 0,01 до 0,1 м/с (або до 6 м/хв)) швидкостях протягування спостерігається явище підвищеного наростоутворення на робочих елементах протяжки та поява зміцненої стружки. Якщо об'єм стружкової канавки буде недостатнім, то утворена стружка буде накопичуватись в ньому та ущільнюватись (так званий ефект пакетування), за рахунок чого буде відбуватись різке підвищення зусилля протягування (що може привести до руйнування протяжки), знижуватись якість та точність обробки деталі або взагалі її псування. В той же час гарно подрібнена стружка легше транспортується вздовж канавок, не утворює «стружкових пробок» та наростів, що знижує ймовірність заклинювання протяжки в отворі.

Таким чином, ефективне дроблення стружки під час протягування глибоких отворів у сталевих деталях є необхідною умовою безперервності даного процесу. За останні роки опублікований ряд досліджень за зазначеною тематикою, які проводились відомими закордонними та українськими науковцями. В них містяться нові та пропонується вдосконалення вже існуючих методів подрібнення стружки, в тому числі такого як попереднє нанесення регулярного мікрорельєфу на

оброблювані поверхні сталевих деталей. Цей метод безумовно ще має резерви для розвитку існуючих технологій та обладнання для нього, тому вдосконалення процесу комбінованого протягування глибоких отворів у сталевих деталях є актуальною темою для подальших досліджень.

1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Регулярні та частково регулярні мікрорельєфи, їх види та призначення

Сучасний розвиток машинобудування характеризується переходом до методів цілеспрямованого формування мікро- та макрогеометрії поверхонь деталей для забезпечення заданих експлуатаційних характеристик. У світовій та вітчизняній науковій літературі цей напрям отримав назву «текстурування поверхні» (Surface Texturing). Регулярний мікрорельєф – це сукупність періодично повторюваних мікрозаглиблень (каналок або лунок), отриманих заздалегідь заданим способом, які мають фіксовану форму, розміри та взаємне розташування. Регулярні мікрорельєфи (надалі – RMP) відіграють ключову роль у сучасному машинобудуванні, оскільки вони дозволяють значно зменшити металоємність деталей машин, підвищити зносостійкість та знизити час припрацювання їх робочих поверхонь, покращити умови змащування та знизити коефіцієнт тертя деталей.

На відміну від звичайної шорсткості поверхні (вона може бути хаотичною або односпрямованою), та яка формується в певних межах під час обробки деталей методами різання або шліфування, параметрами RMP можна повністю керувати на етапі проектування. З точки зору експлуатації, RMP – це штучно створена «мережева структура» на робочій поверхні деталі, яка працює як система мікрорезервуарів для утримання мастила та/або збору продуктів зносу.

Відмінність RMP від звичайної шорсткості показано у таблиці 1:

Таблиця 1

Характеристика	Звичайна шорсткість	Регулярний мікрорельєф (RMP)
Походження	Побічний результат обробки (слід від різця)	Спеціально спроектована операція
Структура	Хаотична або односпрямована	Геометрично правильна (сітка, спіраль)
Керованість	Важко контролювати кожен виступ	Кожна лунка має задану глибину та крок
Функція	Найчастіше негативна (тертя)	Позитивна (утримання оливи, швидке припрацювання)

Створення РМР часто називають «вібронакочуванням». Суттю цього процесу є вдавлювання в метал спеціальної загартованої кульки з високою твердістю, яка переміщується за певною траєкторією. Ця кулька залишає на поверхні характерні, схожі на луску риби відбитки, які допомагають утримувати на поверхні частинки мастила, зменшуючи таким чином знос поверхонь тертя в двигунах та інших механізмах.

Для розрахунків регулярного рельєфу основними параметрами будуть:

- глибина канавок (h_k);
- крок мікрорельєфу (S);
- відносна площа заглиблення (F_k або $F_{відн}$), яка зазвичай вимірюється у відсотках (наприклад, 15...30% площі поверхні).

На рис. 1 показано варіанти системи канавок, форма й розташування яких визначається кількістю та розташуванням як деформуючих елементів, так й режимами обробки [1]:

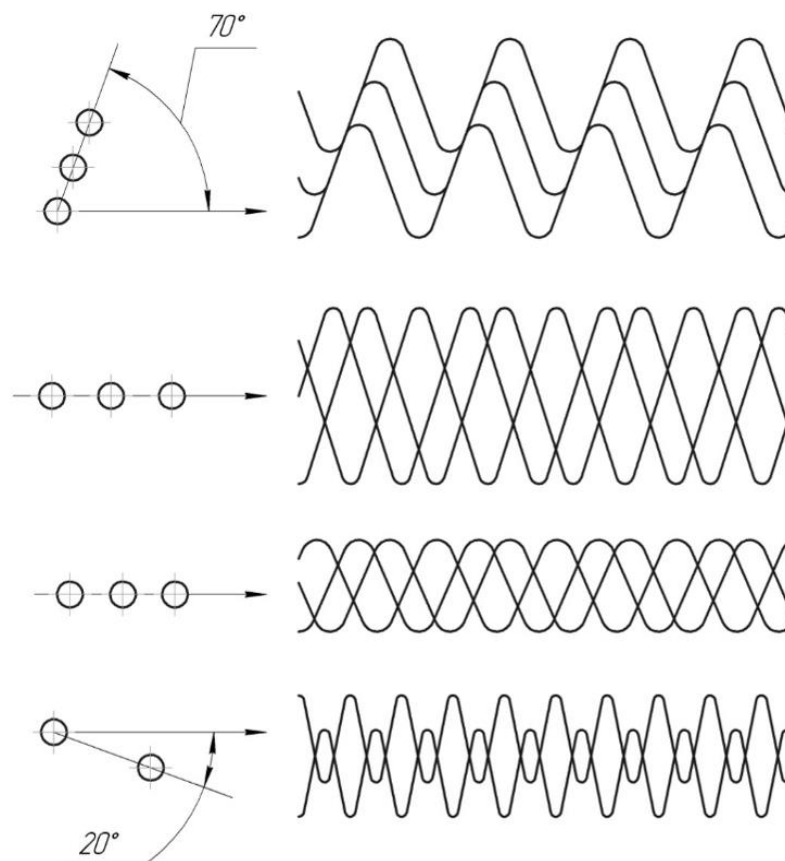


Рисунок 1 – Варіанти системи канавок, форма й розташування яких визначається кількістю та розташуванням як деформуючих елементів, так й режимами обробки

[26]

1.2 Сучасний стан дослідження регулярних та частково регулярних рельєфів, існуючи методи їх отримання

Значний внесок у розвиток теорії функціонування регулярних рельєфів зробив Іцхак Еціон (Izhak Etsion) – провідний ізраїльський вчений у галузі трибології, відомий своїми фундаментальними дослідженнями в області лазерної текстуризації поверхні. У своїх працях [1] він обґрунтував гідродинамічний ефект мікрозаглиблень на поверхнях тертя, довівши, що вони діють як мікрорезервуари для мастила та пастки для продуктів зносу, що дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя. Його колега V. Schulze провів [3] систематизацію методів механічної обробки поверхневого шару, включаючи пластичне деформування та інденування. Ці дослідження підтверджують, що механічне зміцнення поверхні (Mechanical Surface Treatment) є одним з найефективніших засобів підвищення втомної міцності та зносостійкості деталей.

Проблема метрологічного забезпечення та вибору параметрів рельєфу детально висвітлена у роботах Р. Pawlus та ін. [2,3]. Авторами встановлено кореляцію між геометричними характеристиками текстури (висота, крок, форма) та функціональними властивостями поверхонь у різних режимах змащування, що дозволяє на етапі проектування прогнозувати ресурс пари тертя.

В українській науковій школі питаннями розвитку технологій формування регулярних мікрорельєфів (РМР) активно займаються у школах Національного транспортного університету (НТУ) та Львівської політехніки. Фундаментальні аспекти механіки взаємодії робочих елементів інструменту з поверхнею заготовки досліджено у працях відомого науковця Е.К. Посвятенка [8]. Зокрема, ним та його колегами розроблено математичні моделі заглиблення лінійних інденторів, які дозволяють визначати необхідні зусилля для формування канавок заданої глибини, що є критичним для реалізації процесів поділу стружки при протягуванні.

Дослідження Ю.П. Нагірного [19] присвячені методам віброобробочування як способу отримання регулярних рельєфів. Ним показано, що динамічний вплив на поверхневий шар дозволяє не лише формувати мікрогеометрію, а й створювати

сприятливі залишкові напруження стиснення, що підвищує якість поверхневого шару.

Питання цифрового моделювання та прогнозування результатів обробки методами холодного пластичного деформування (ХПД) знайшли відображення у роботах В. В. Ступницького [18]. Використання методів скінченних елементів у його дослідженнях дає змогу візуалізувати осередок деформації та оптимізувати параметри технологічного процесу ще до етапу виготовлення інструменту.

Так, у роботі І.П. Рибак [7] проведені дослідження щодо поділу стружки під час протягування. У роботі розглянуто кілька технологічних підходів до поділу стружки, зокрема дискретне протягування комбінованою деформуюче-різальною протяжкою, а саме – досліджено метод отримання кільцевих канавок шляхом короткочасної зупинки деформуючого елемента під час руху інструменту. Це призводить до зникнення осередку деформації та заглиблення індентора в метал, що створює канавку для подальшого поділу стружки різальним зубом.

І.П. Рибак разом з Е.К. Посвятенком досліджено застосування протяжок з додатковими елементами, що розміщені під кутом до осі та здатні обертатися. Вони створюють гвинтові канавки на поверхні, які при перетині різальними зубцями забезпечують поздовжній поділ стружки на окремі витки. На основі проведених досліджень запропонована класифікація рельєфів за призначенням, де окремим пунктом виділено рельєфи для попереднього поділу припуску при обробці різанням.

На рис. 2 показана класифікація регулярних рельєфів за їх призначенням. Технологічні рельєфи в основному використовуються для попереднього поділу припуску перед обробкою різанням, що дозволяє керувати процесом стружкоутворення. Також вони мають застосування для підготовки поверхонь під нанесення покриттів, зокрема плівкових антифрикційних (ФАБО).



Рисунок 2 – Класифікація регулярних рельєфів за їх призначенням

Експлуатаційні рельєфи наносяться для створення мастильних лабіринтів з метою утримання плівки оливи на поверхнях тертя, зменшення коефіцієнта тертя та відповідно підвищення ресурсу пар тертя. Ще одним варіантом їх застосування є створення зміцнених несучих поверхонь, зокрема дискретних, при відновленні зношених деталей. Таким чином досягається значний економічний ефект за рахунок повернення в експлуатацію вузлів та деталей з відновленими відповідальними поверхнями. В деяких випадках такі рельєфи наносять для отримання складних внутрішніх профілів (шпонкові, шліцьові пази, внутрішні зубці коліс).

Спеціальні рельєфи широко застосовуються для попереднього поділу осколкових корпусів боєприпасів на фрагменти. Там особлива увага приділяється щодо запрограмованого руйнування (поділу) корпусів під дією вибухівки на задану кількість фрагментів певного розміру. Слід відмітити, що багато досліджень за цією тематикою закриті для загального доступу та не публікуються в звичайних виданнях.

Рельєфи естетичного (декоративного) призначення геометрично можуть мати вигляд одиничних канавок (трикутного чи трапецевидного профілю), гвинтових канавок, кільцевих заглиблень або дискретних поверхонь, де ділянки виступів

чергуються з впадинами. Глибина досліджуваних канавок варіюється від мікрорівня (глибина канавок складає до 0,02 мм) до макрорівня (до 5 мм відповідно).

Способи отримання регулярних рельєфів представлені на рис. 3

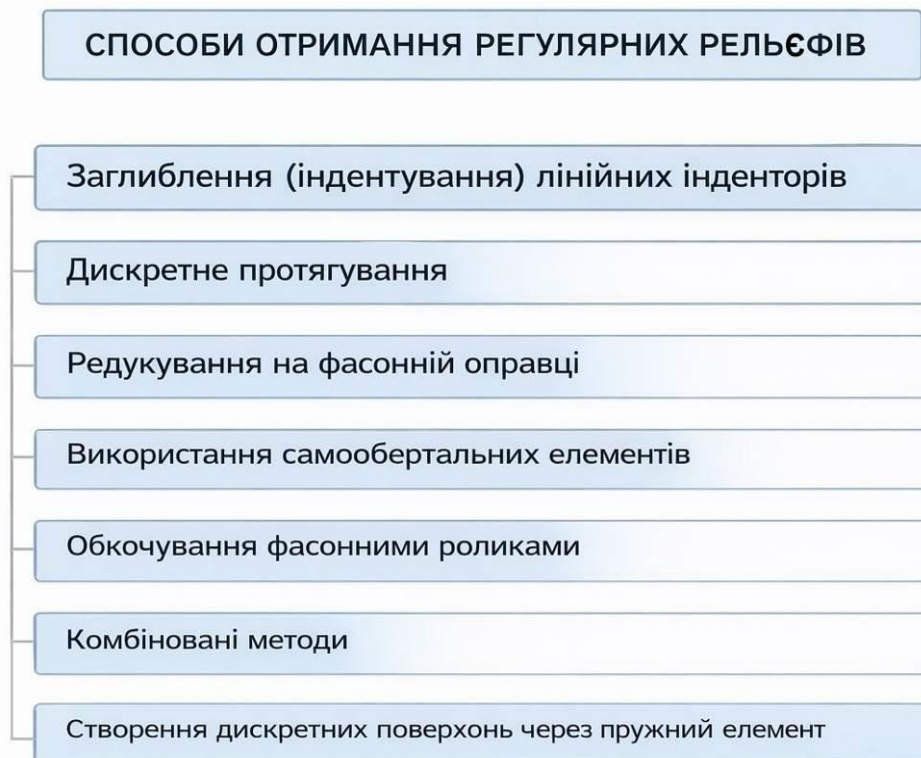


Рисунок 3 – Способи отримання регулярних рельєфів

Основним методом є холодне пластичне деформування (ХПД), також існують так звані комбіновані підходи:

- заглиблення (індентування) лінійних інденторів, тобто формування канавок шляхом втискання клиноподібного інструменту в поверхню під дією нормальної сили;
- дискретне протягування (використання деформуюче-різальних протяжок, де процес різання поєднується з періодичним пластичним деформуванням для утворення канавок поділу стружки);
- редукування на фасонній оправці шляхом протягування (або прошовхування) заготовки через матрицю на оправці, що має відповідний профіль (наприклад, для отримання внутрішніх зубців);
- використання самообертальних елементів типу інструмента з роликами, що обертаються під кутом до осі деталі, створюючи гвинтові канавки;

- обкочування фасонними роликами шляхом створення гвинтових канавок на зовнішніх поверхнях, що також використовується для відновлення розмірів зношених деталей за рахунок витіснення металу у виступи;

- комбіновані методи типа отримання поздовжніх канавок редукуванням з подальшим їх перерізанням гвинтовою канавкою за допомогою лезового інструменту (різанням);

- створення дискретних поверхонь за допомогою пружного елемента (деформування вершин заздалегідь створеного рельєфу через проміжну технологічну деталь для отримання плоских опорних ділянок).

Під час експериментальних досліджень параметрів дискретного протягування було встановлено [8], що оптимальний час зупинки протягування для формування канавки t становить від 0,2 до 0,4 с. Щодо геометрії отриманих канавок, то при заглибленні деформуючого елемента під час зупинки вдалося отримати залишкову кільцеву канавку глибиною до 0,05 мм. Також визначено, що кут нахилу робочих кромek додаткових ділильних самообертальних елементів повинен знаходитись у діапазоні $14...82^\circ$ для забезпечення процесу самообертання робочих інденторів та ефективного нанесення канавок на оброблювану поверхню деталі.

Запропонована в роботі І.П. Рибакa технологія нанесення регулярних рельєфів (зокрема метод дискретного протягування та індентування) характеризується параметрами швидкості заглиблення індентора.

У своїх теоретичних та експериментальних дослідженнях автор зазначає, що швидкість процесу (разом із типом охолоджувальної рідини) виявилася фактором слабого впливу на глибину утворюваної канавки рельєфу. Це дозволяє проводити обробку в широкому діапазоні швидкостей, характерних для стандартного обладнання.

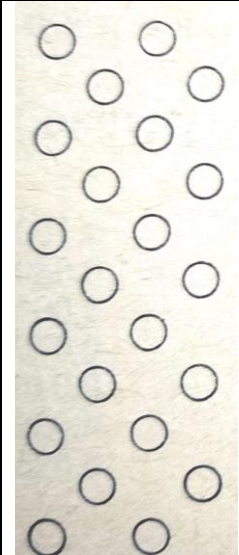
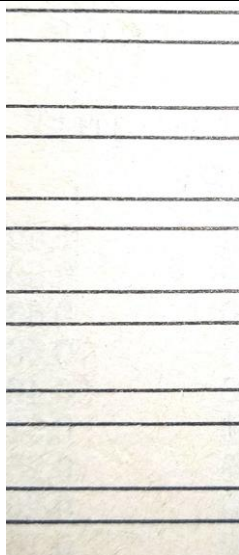
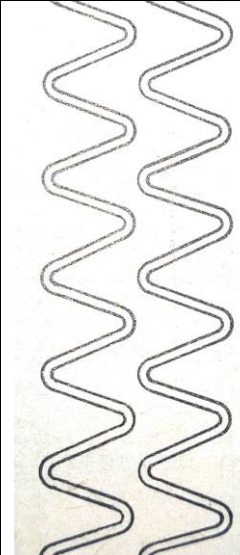
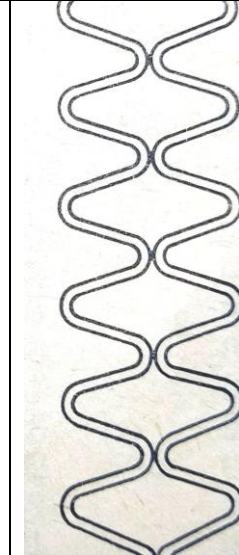
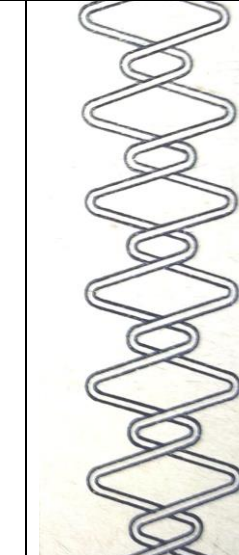
Для реалізації методу було обрано пресове гідрофіковане обладнання (із зусиллям 0,02 мН та 0,2 мН). Швидкість робочого ходу на такому обладнанні зазвичай становить від 0,01 до 0,1 м/с (або до 6 м/хв), що відповідає стандартним режимам холодного пластичного деформування.

Особливості дискретного протягування є те, що при використанні методу для поділу стружки процес протягування періодично зупиняють (через рівні проміжки шляху l) для заглиблення деформуючого елемента та формування кільцевої канавки. У цьому випадку «робоча швидкість» є переривчастою.

При отриманні поздовжніх канавок методом редукування на фасонній оправці швидкість заготовки v_z збільшується в осередку деформації до швидкості v_n через видовження матеріалу. Оскільки швидкість заглиблення не є критичним параметром для точності геометрії рельєфу, вона підбирається виходячи з продуктивності обладнання (пресів або протяжних верстатів), на якому виконується операція.

Поверхня з частково регулярним мікрорельєфом (ЧРМР) – це поверхня з елементами мікрорельєфа, форма, розташування та розміри яких обумовлені певної закономірністю та поміж якими маються ділянки початкової шорсткості. В табл. 2 наведені найбільш розповсюджені види ЧРМР:

Таблиця 2 Види частково регулярних рельєфів

Шахове	Кільцеве розташування регулярних нерівностей на циліндрі	Відсутність перетину регулярних нерівностей	Неповний перетин регулярних нерівностей	Повний перетин регулярних нерівностей
				

1.3 Використання мастильно-охолоджувальних рідин при нанесенні регулярного та частково регулярного рельєфу

За думкою деяких дослідників, використання мастильно-охолоджувальних рідин (надалі – МОР) при нанесенні регулярного рельєфу методом індентування не є критично обов'язковим для формування самої геометрії, проте є важливим технологічним чинником для стабільності процесу та захисту інструменту. Так, згідно з дослідженнями І.П. Рибак [7,8], технологічне змащення впливає на процес за рахунок зміни параметрів тертя.

Тертя суттєво впливає на силу заглиблення, тобто на необхідне зусилля заглиблення індентора на задану глибину. Проведені експерименти показали, що застосування МОР допомагає знизити силу заглиблення (тертя може знижувати цю силу на величину у 23% для індентора з кутом 60° та на 14% для кута 90°). Основне призначення МОР у цьому процесі – це забезпечити захист індентування робочих елементів від небажаних адгезійних явищ (наприклад, схоплювання металу інструменту з заготовкою). МОР відносять до факторів «незначного впливу» на кінцеву глибину канавки порівняно з такими «впливовими» факторами, як прикладена нормальна сила або твердість оброблюваного матеріалу. Найкращі результати щодо зниження тертя та запобігання адгезії в проведених експериментах показала МОР на основі ріпакової олії.

Таким чином, хоча змащення практично не змінює глибину рельєфу при незмінній силі, але його наявність є необхідним для зниження енерговитрат (зменшення сили тертя) та підвищення довговічності інструменту. Особливо це важливо при роботі з в'язкими матеріалами, схильними до налипання.

В той же час, в інших фундаментальних роботах та дослідженнях провідних наукових шкіл (Посвятенко, Нагірний, Шнайдер, Шульце) [3-11] питання застосування мастила та швидкості обробки розглядаються як критичні фактори, що впливають не лише на глибину, а й на якість та структуру поверхневого шару.

Так, у роботах з віброобробкування (автори Ю. Нагірний, Я. Шнайдер) та алмазного вигладжування, мастило вважається обов'язковим елементом. Більшість авторів (зокрема V. Schulze) наголошують, що без мастила між індентором та

металом виникає так зване «сухе тертя», яке призводить до налипання металу заготовки на інструмент. Це руйнує регулярність рельєфу (так, на ньому з'являються задири та вириви металу).

У працях школи Е. Посвятенка зазначається, що мастило змінює коефіцієнт тертя в контактній зоні. Це перерозподіляє напруження: при хорошому змащенні зона деформації глибша, а «хвиля» оброблюваного металу перед індентором менша.

Західні дослідники (Р. Pawlus) вказують на те, що мастило може потрапляти в уже створені заглибини під час процесу, створюючи «гідростатичні подушки» (гідродинамічний ефект під час обробки), які допомагають стабілізувати зусилля притискання інструменту.

Якщо І. Рибак у своїй роботі зазначає, що швидкість мало впливає на глибину канавки, то в інших методах нанесення рельєфу швидкість є визначальною. В роботах Нагірного та Шнайдера з вивчення геометрії рельєфу робиться висновок, що у процесах віброобточування швидкість деталі V та частота коливань інструменту f визначають крок та форму рельєфу. Якщо змінити швидкість, рельєф із «сітчастого» може перетворитися на «хвилястий» або так звані «ізольовані лунки».

В роботах V. Schulze [3] вказано, що при високих швидкостях обкатування (понад 100...150 м/хв) у зоні контакту виділяється значна теплота. Це може призвести до «відпуску» поверхневого шару – тобто зняття тих корисних внутрішніх напружень стиснення, які фахівці намагаються створити для зміцнення деталі та підвищення її ресурсу.

Деякі автори вказують на те, що при надвисоких швидкостях деформування (ударне текстурування) опір металу зростає через швидкісний наклеп (динамічне зміцнення), що вимагає більших зусиль для отримання тієї ж глибини, ніж при статичному заглибленні.

Всі розбіжності між дослідницькими школами можна звести до порівняльної табл. 3

Фактор	Позиція І. Рибак (дискретне протягування)	Позиція інших шкіл (віброобробчування/вигладжування)
Мастило	Бажане для зниження сили та захисту від адгезії	Обов'язкове для отримання високого класу чистоти та запобігання дефектам
Швидкість	Слабко впливає на глибину (статичний підхід)	Критично впливає на форму рельєфу та температурний режим поверхні
Головна мета	Стружкоподіл та утримання мастила.	Зміцнення (наклеп) та зниження шорсткості

1.4 Типові протяжні інструменти для обробки глибоких отворів

В машинобудуванні широке використання мають деталі з глибокими наскрізними отворами великої довжини, наприклад гідроциліндри. При протягуванні таких отворів необхідно забезпечити розміщення значної кількості стружки в стружкових канавках, тому об'єм стружкових канавок повинен бути значно більшим ніж у звичайних протяжках.

На рис. 4 представлена типова конструкція протяжки для протягування глибокого круглого отвору діаметром 40 мм і довжиною 200 мм. Для подачі охолодження до різальних крайок, протяжка має центральний і радіальний канали. Робоча частина протяжки з'єднується із тягою, довжина якої більша довжини обробляемого отвору, хвостовиком з баойнетним замком або різьбою.

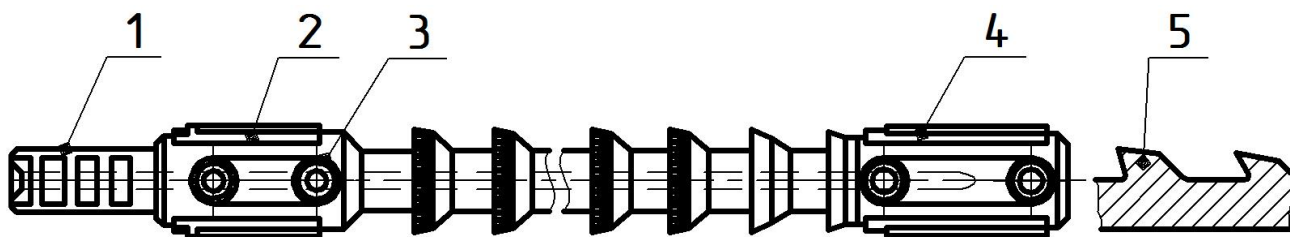
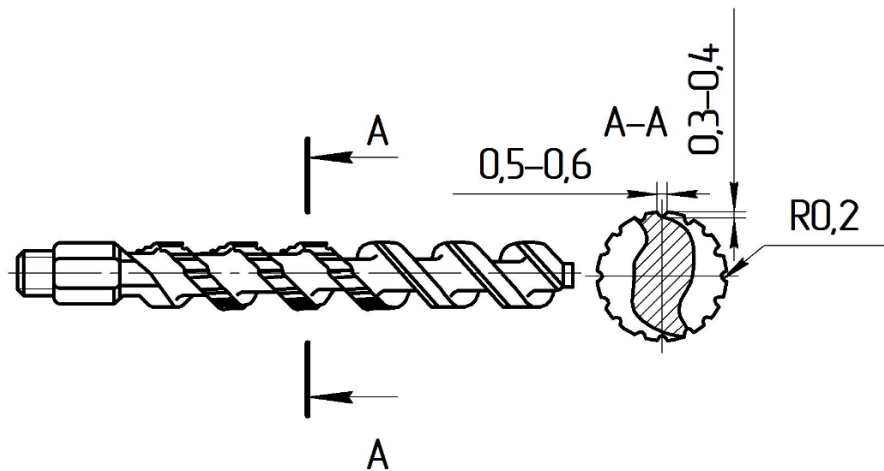


Рисунок 4 – Протяжка з профільною схемою різання для обробки глибокого круглого отвору: 1 – хвостовик; 2,4 – текстолітові планки; 3 – гвинт для закріплення планок; 5 – профіль зубців в повздовжньому розрізі [24]

Протяжка має обмежене число зубців і в роботі одночасно знаходяться всі вони. Крок зубців більше звичайного, що забезпечує більший об'єм стружкових

Для обробки глибоких круглих отворів також використовують гвинтові протяжки (рис. 5).



Інструмент має два зубця, які розташовані за правою гвинтовою лінією. Довжина гвинтової протяжки дорівнює приблизно десяти діаметрам оброблюваного отвору, а крок гвинтової лінії зубців – трьом діаметрам. Діаметр серцевини протяжки, який визначає глибину стружкової канавки дорівнює приблизно на початку 0,65 номінального діаметра протяжки і зменшується до 0,4...0,45 до кінця. Хвостовик протяжки має прямокутну різьбу для з'єднання з тягою. Як правило, обробка отвору виконується послідовно комплектом протяжок із 3...4 штук.

Основну попередню частину роботи по збільшенню діаметра отворів у деталях із пластичних матеріалів у таких протяжках здійснюють деформуючи елементи, що працюють з великими натягами по «чорній» поверхні. Розміщені за деформуючою секцією зубці різальної частини видаляють дефектний шар металу

металургійного походження, поліпшують якість і підвищують продуктивність обробки.

Освоєння в СРСР на початку шестидесятих років XX сторіччя промислового синтезу штучних алмазів та кубічного нітриду бору і налагодження у наступні роки промислового випуску абразивного інструменту із цих надтвердих матеріалів дозволило удосконалити комбіновані протяжки у напрямку поліпшення їх конструкцій, технології виготовлення і продуктивності. Головним чином, це було здійснено у науковій школі проф. Розенберга О.М. (Інститут надтвердих матеріалів АН УРСР, м. Київ) [23], основні досягнення якої в даному напрямку відбувались у наступних 60...70 роках. Для деформуючої частини було створено робочі елементи симетрично навантаженої форми. При цьому було доведено, що для будь-яких умов експлуатації ці елементи повинні виготовлятися із зносостійких міцних марок твердих сплавів (як правило, групи ВК) із застосуванням технологій, що базуються на використанні абразивних інструментів із синтетичних алмазів. Що стосується різальної секції комбінованих протяжок, то у випадку обробки сталевих деталей її (цю секцію) рекомендовано виготовляти суцільною за груповою схемою [12-17] із швидкорізальних сталей за технологіями з використанням для заточки і переточок абразивного інструменту із кубічного нітриду бору. Подальші дисертаційні дослідження проф. Посвятенка Е.К. [14-17] дозволили розвинути ідею деформуюче-різального протягування до рівня ефективного промислового використання. Типову конструкцію інструмента, запропонованого цим автором, подано на рис. 6.

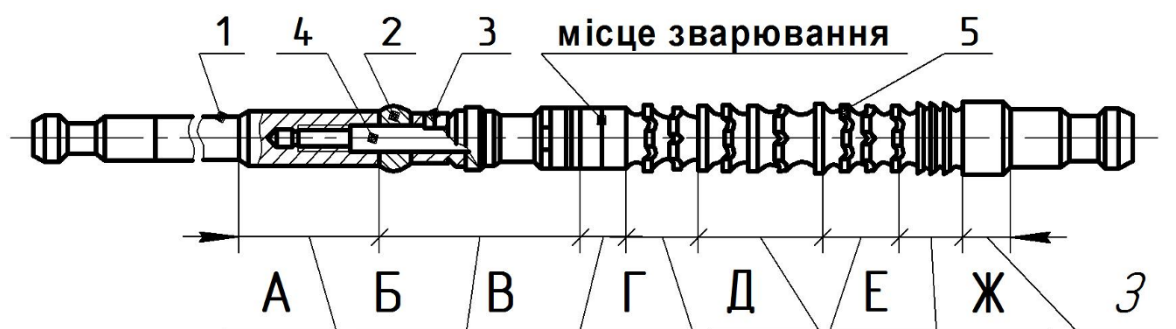


Рисунок 6 – Деформуюче-різальна протяжка [24]

Інструмент складається з переднього хвостовика 1 характерної форми, деформуючих твердосплавних елементів 2, які розділені поміж собою дистанційними втулками 3, та посаджені на циліндричну оправку 4, різальної частини 5, що поєднана з останньою методом зварювання. Комбінована протяжка складається з передньої напрямної А; деформуючої секції Б; проміжної напрямної В; чорнової Г, допоміжної Д, чистової Е та калібрувальної Ж частин різальної секції 5; задньої напрямної 3. Різальна секція виготовлена із швидкорізальної інструментальної сталі марки Р6М5. Вона працює за груповою схемою з врахуванням попереднього холодного деформаційного зміцнення оброблюваного матеріалу (надалі – ОМ) та параметрів хвилі позаконтактної деформації (ХПКД), а також поздовжнього поділу стружки у випадку протягування глибоких отворів. Профілі стружкових канавок відповідно нормальної (а) довжини та видовженої (б) комбінованого інструменту показано на рис. 7.

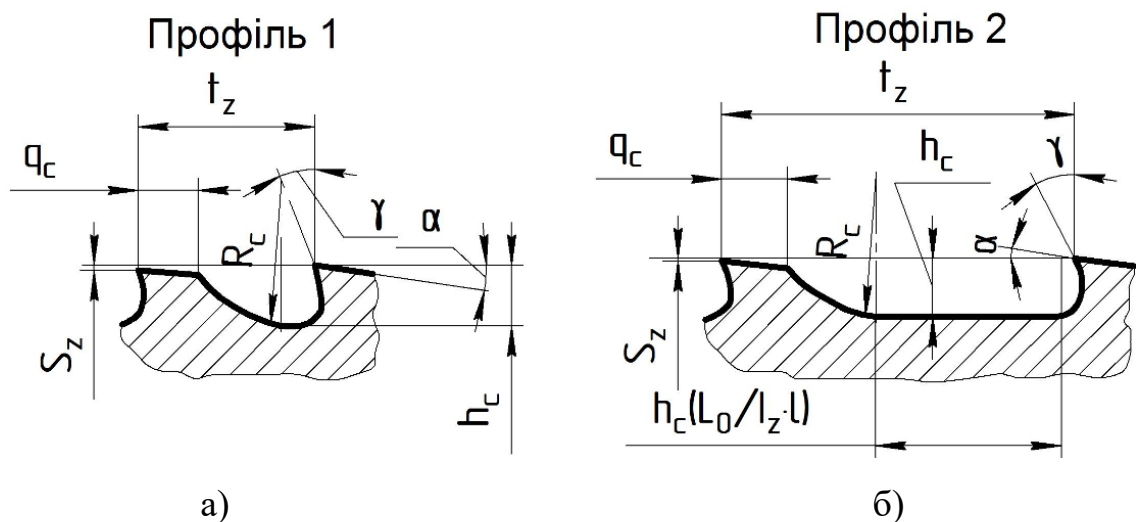


Рисунок 7 – Профілі стружкових канавок комбінованого протяжного інструменту

Для розрахунку розмірів стружкових канавок в роботі запропоновано використовувати наступні співвідношення:

$$h_c \geq 1,13 \cdot \sqrt{S_z \cdot l_z \cdot K} \quad (1.5)$$

$$r_c = 0,5 \cdot h_c; \quad R_c = 2 \cdot h_c; \quad g_c = h_c; \quad (1.6)$$

$$t_z = 0,5 \cdot h_c \cdot (6,4 - \operatorname{tg} \gamma) \quad (1.7)$$

де: l_z – довжина ділянки різання; $1/K$ – значення допустимого ступіню заповнення стружкової канавки (для більшості оброблюваних матеріалів він знаходиться в межах 0,2...0,6).

У випадку протягування глибоких отворів, коли використання протяжного інструменту зі стружковими канавками нормальної довжини утруднене через замалу міцність інструменту на розтяг у небезпечному перерізі, необхідно використовувати канавки видовженої форми. Їх глибина повинна визначатись виходячи із умов міцності інструменту по небезпечному перерізу, який проходить по основі канавки першого зубця. Надалі, здійснюються обчислення за залежностями (1.5-1.7), та знаходяться величина кроку зубців для видовженої канавки:

$$t_z = 0,5 \cdot h_c \cdot (4,4 - \operatorname{tg} \gamma + 2 \cdot l_0 / l_z) \quad (1.8)$$

де: l_0 – довжина деталі; l_z – допустима довжина ділянки протягування для умови формування одиничного валику стружки.

Протяжка, яка розрахована і виготовлена за описаною вище схемою, придатна для обробки отворів в межах від $\varnothing 20$ до $\varnothing 100$ мм в пластичних матеріалах (переважно сталях) твердістю в межах 100...400 НВ. Завдяки цьому такий протяжний інструмент може стати базовим при розробці протяжок з можливістю попереднього рельєфоутворення. Слід відмітити, що це може бути перспективним тільки у випадку вирішення актуальної проблеми поділу припуску при протягуванні глибоких отворів у деталях типу втулка, а також при умові зменшення інтенсивності спрацювання головних різальних крайок зубців на їх межах зі стружкоподільчими викружками.

1.5 Висновки, мета та задачі досліджень

На основі проведеного огляду закордонних та вітчизняних літературних джерел можливо зробити наступні висновки:

- попередній поділ припуску є критично важливим при обробці пластичних матеріалів (мідь, латунь, бронза, алюмінієві та титанові сплави, незагартовані сталі), які схильні до утворення міцної зливної стружки.

- поділ стружки запобігає її пакетуванню у стружкових канавках протяжного інструменту, що усуває небезпеку поломки протяжки та запобігає погіршенню геометричних властивостей обробленої поверхні та її чистоти.

- створення регулярних та частково регулярних рельєфів шляхом індентування (вдавлювання) є ефективним технологічним та універсальним методом керування процесом стружкоутворення, який доповнює металургійні та конструкційні способи поліпшення оброблюваності.

- аналіз літературних джерел свідчить, що незважаючи на численні дослідження в галузі загального текстурювання та віброобкочування, питання дискретного протягування та застосування деформуюче-різальних інструментів для цілеспрямованого поділу стружки через процес індентування мають резерви для подальшого розвитку. Саме на вирішення цього наукового завдання спрямована дана кваліфікаційна магістерська робота, що дозволить зробити її актуальним доповненням до наявних досліджень.

Метою даної роботи є підвищення ефективності роботи комбінованого протяжного інструмента для забезпечення заданих розмірів та високої якості обробленої поверхні глибоких отворів у деталях типу втулка в умовах дрібносерійного виробництва.

Завдання роботи полягає у:

- вивченні механіки процесу поділу (руйнування) стружки за допомогою попередньо сформованої системи регулярних та частково регулярних технологічних канавок;

- визначенні засобів та методів одержання регулярних та частково регулярних технологічних канавок за допомогою комбінованого протягування з одночасним вивченням кінематики та механіки при обробці глибоких отворів;
- розробленні рекомендацій для виготовлення та подальшої експлуатації вдосконаленого комбінованого протяжного інструменту;
- проведення техніко-економічного обґрунтування доцільності використання вдосконаленого інструменту;
- розрахунку економічної ефективності від впровадження результатів проведених досліджень.

2. МЕТОДИКА НАНЕСЕННЯ РЕГУЛЯРНОГО ТА ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ОБРОБЛЮВАНІ ПОВЕРХНІ

2.1 Призначення регулярного мікрорельєфу

Нанесення регулярного мікрорельєфу у вигляді канавок певної форми на різальні елементи або на формоутворювальні поверхні протяжки є одним із ефективних інженерних способів керування процесом стружкоутворення, особливо під час протягування глибоких отворів. Механізм його дії можна пояснити через сукупність геометричних, деформаційних та термомеханічних факторів:

- локалізація пластичної деформації стружки. Під час різання оброблюваний матеріал у зоні зрізу зазнає інтенсивної пластичної деформації. За відсутності мікрорельєфу на поверхні деформація розподіляється відносно рівномірно, що сприяє утворенню довгої безперервної стружки. Регулярний мікрорельєф у вигляді канавок створює локальні концентратори напружень у тілі стружки, змінює напрямок течії матеріалу та формує зони підвищених зсувних деформацій. У цих зонах стружка досягає граничних деформацій руйнування значно раніше, ніж на звичайних поверхнях, що сприяє її ламанню на короткі фрагменти.

- керування траєкторією згинання стружки. Форма і розташування канавок визначають характер контакту між стружкою та передньою поверхнею різального елемента. При взаємодії зі мікрорельєфом стружка примусово згинається з малим радіусом кривизни, зазнає чергування розтягувальних і стискальних напружень та втрачає стабільність суцільного потоку. Чим менший радіус примусового згинання, тим вищі згинальні напруження у зовнішніх шарах стружки, що призводить до її крихкого або в'язко-крихкого руйнування, навіть у пластичних матеріалах типу сталей.

- формування періодичної сегментації стружки. Регулярний характер мікрорельєфу забезпечує циклічність впливу на стружку. Кожна канавка ініціює мікротріщини, послаблює поперечний переріз стружки та створює

передумови для повторюваного поділу. У результаті формується регулярно сегментована стружка, довжина елементів якої визначається кроком канавок, глибиною мікрорельєфу та подачею на зуб протяжки. Це дозволяє цілеспрямовано керувати розміром стружкових фрагментів.

- зменшення площі контакту та сил тертя. Мікрорельєф з канавок зменшує реальну площу контакту між стружкою і передньою поверхнею різального зубця. Це призводить до зменшення адгезійного тертя, зниження температури у зоні різання, зменшення схильності стружки до налипання. Одночасно зниження сил тертя сприяє більш керованому згинанню та ламанню стружки без її неконтрольованого скручування.

- покращення доступу мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Канавки мікрорельєфу виконують роль мікроканалів для транспортування МОР безпосередньо в зону контакту стружки з інструментом. Це знижує температуру деформації стружки, підвищує крихкість матеріалу в зоні різання та прискорює процес ініціації тріщин. У сукупності це додатково полегшує подрібнення стружки.

- адаптація до умов протягування глибоких отворів. Для протягування глибоких отворів особливо важливо, що регулярний мікрорельєф на оброблюваній поверхні не потребує додаткових рухомих елементів, працює пасивно, без ускладнення кінематики верстата та не погіршує жорсткість протяжки. Саме це робить його ефективним рішенням саме для умов обмеженого простору стружкової канавки та складного відводу стружки.

Таким чином, нанесення регулярного мікрорельєфу у вигляді канавок певної геометрії на оброблювані поверхні глибоких отворів в сталевих деталях дозволяє цілеспрямовано впливати на механізм стружкоутворення, забезпечуючи локалізацію деформації, примусове згинання та періодичне руйнування стружки. Це суттєво покращує умови відведення стружки, знижує навантаження на інструмент і підвищує якість обробки глибоких отворів.

2.2. Наукове формулювання механізму подрібнення стружки з використанням рівнянь напружень

З метою покращення подрібнення стружки при комбінованому протягуванні глибоких отворів необхідно визначити основні важливі параметри регулярного та частково регулярного мікрорельєфу (РМР та ЧРМР). Згідно нормативних документів [25], які класифікують поверхні з регулярним мікрорельєфом, важливе значення має вибір типу мікрорельєфу. Згідно зі стандартом, РМР поділяється на два класи:

1) ПРМР (Повністю регулярний мікрорельєф) – вся поверхня деталі покрита опуклими або вогнутими регулярними елементами (рис. 8);

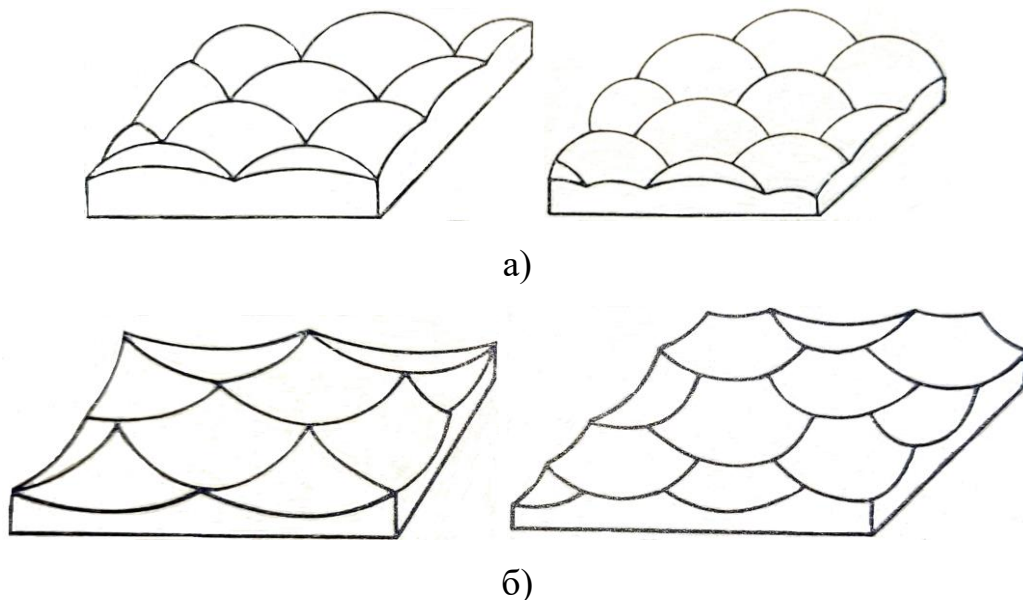


Рисунок 8 – а) Опуклий ПРМР; б) Вогнутий ЧРМР

2) Частково регулярний мікрорельєф (ЧРМР) – регулярні нерівності займають лише частину поверхні, залишаючи ділянки з вихідною шорсткістю (див табл. 2). Для обробки глибоких отворів найчастіше використовують ЧРМР, оскільки його простіше нанести (наприклад, вібраційним накочуванням) і він дозволяє гнучко регулювати площу контакту.

Важливі параметри для ЧРМР (Частковий профіль). Для покращення подрібнення стружки критичними є геометричні параметри «сітки», яку створюють нерівності:

– глибина нерівності (h). Вона визначає ступінь концентрації напружень у зоні різання. Згідно довідкової літератури пропонується ряд значень від 0,025 до 1000 мкм. Для стружкоподрібнення зазвичай обирають глибину, співмірну з товщиною зрізу.

– осьовий крок (S_o) та круговий крок (S_k). Ці параметри безпосередньо визначають розміри «фрагментів» стружки, що утворюватиметься. Значення кроків вибираються з ряду від 0,063 до 10 мм.

– відносна площа (F_k). Вона характеризується відсотком поверхні, зайнятої регулярними нерівностями. Для ефективного впливу на стружку цей параметр зазвичай встановлюється в межах 30...60%.

– кут напрямку нерівностей (θ). Він вимірюється між напрямками нерівності та головним рухом (протягуванням). Кут θ впливає на те, як саме стружка буде деформуватися та відриватися під дією ріжучого зубця протяжки.

– вид розташування. Розрізняють кільцеве, шахматне або перехресне розташування (див. табл. 2). Для якісного подрібнення стружки найбільш ефективним є повне пересічення нерівностей (створення замкнених або напівзамкнених комірок).

Якщо технологія дозволяє нанести повний профіль, то його ключовими параметрами будуть:

– висота елемента (R). Вона є аналогічно глибині h у ЧРМР (рис. 9)

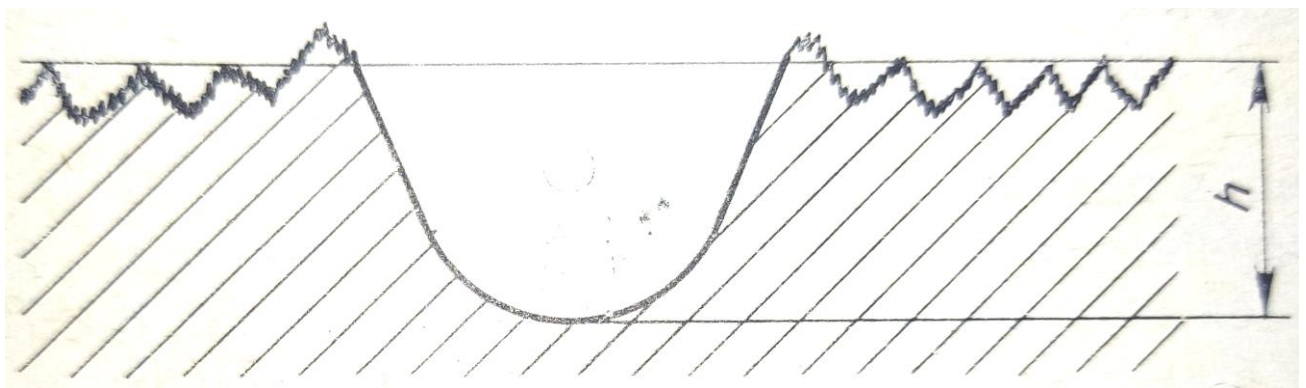


Рисунок 9 – Визначення глибини рельєфу [25]

Число елементів на 1 мм² (N): Визначає щільність так званих «бар'єрів» на оброблюваній поверхні, завдяки чому виникають передумови для руйнування стружки.

Тип елемента: Чотирикутні або шестикутні заглиблення (або виступи). Шестикутна форма часто забезпечує більш рівномірний розподіл зусиль різання. Для глибоких отворів з метою подрібнення стружки рекомендується нормувати тип ЧРМР з повним перетинанням нерівностей.

Глибина (h): З урахуванням припуску на наступну обробку.

Кроки (S_o , S_k): Розраховані виходячи з бажаної довжини сегмента стружки.

Кут сітки γ (рис. 10). Він визначається для створення оптимального кута взаємодії робочої окрайки різального елемента з мікрорельєфом.

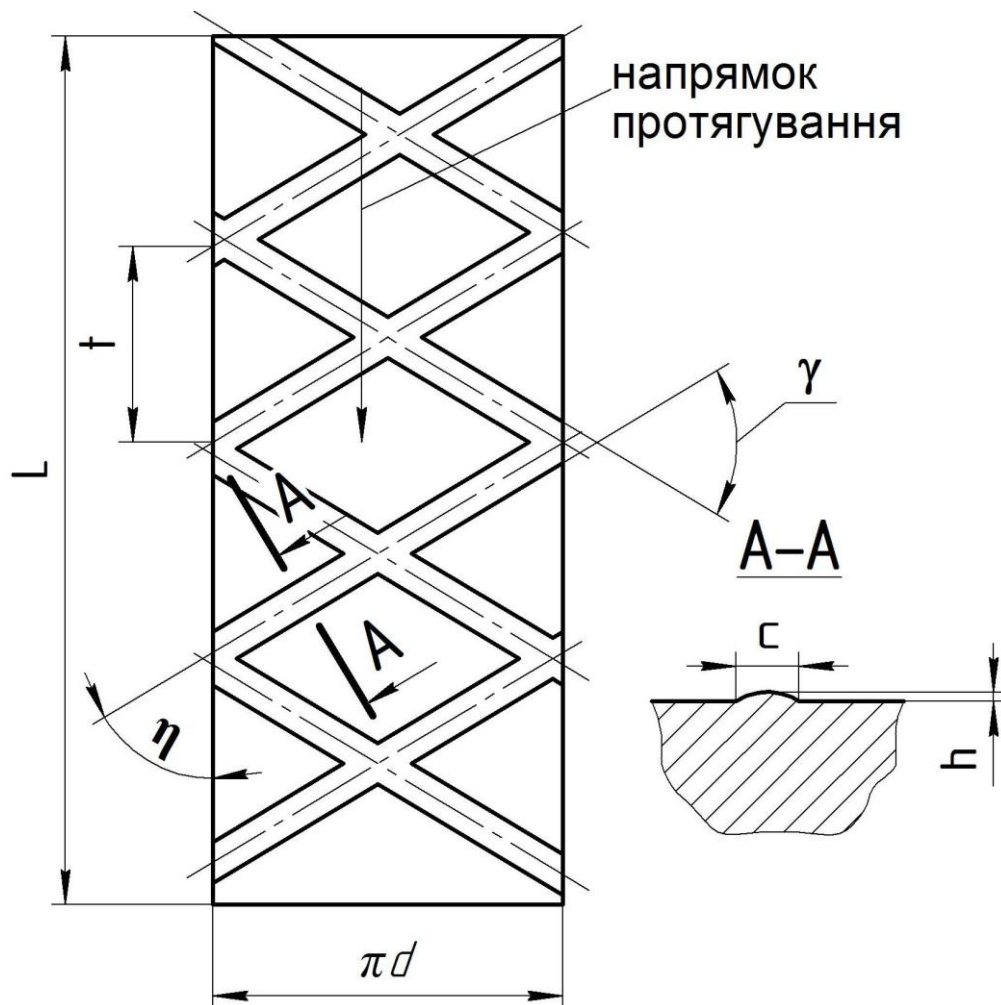


Рисунок 10 – Кут сітки регулярного/частково регулярного мікрорельєфу

При призначенні параметрів у документації слід вказувати номінальні значення та допустимі відхилення (10, 20 або 40%).

Під час різального протягування процес стружкоутворення відбувається в умовах плоского напруженого стану з переважанням зсувних деформацій у

первинній зоні різання. За класичною моделлю ортогонального різання середні зсувні напруження в зоні зсуву визначаються як:

$$\tau_s = F_s \cdot A_s \quad 2.1$$

Де F_s – зсувна складова сили різання,

A_s – площа зсувної площини.

У випадку гладкої передньої поверхні протяжки зсувна деформація є квазіоднорідною, що сприяє утворенню безперервної стружки.

Нанесення регулярного мікрорельєфу у вигляді канавок змінює граничні умови контакту «інструмент–стружка», внаслідок чого у тілі стружки виникають локальні концентрації напружень. Максимальні нормальні напруження в зоні примусового згинання стружки можуть бути визначені за рівнянням опору матеріалів:

$$\sigma_{max} = M \cdot y \cdot I$$

Де M – згинальний момент, індукований геометрією канавки,

y – відстань від нейтральної осі до крайніх волокон стружки,

I – момент інерції поперечного перерізу стружки.

При зменшенні радіуса кривизни згинання R , що задається формою мікроканавки, згинальний момент зростає за співвідношенням:

$$M = E \cdot I \cdot R$$

Де E – модуль пружності матеріалу заготовки.

Коли виконується умова:

$$\sigma_{max} \geq \sigma_e$$

де σ_e – границя міцності матеріалу при розтягу або зсуві, при її досягненні відбувається ініціація мікротріщин та сегментація стружки.

2.3 Алгоритм утворення нерегулярного рельєфу на внутрішній поверхні глибокого отвору

Алгоритм утворення нерегулярного рельєфу на внутрішній поверхні глибокого отвору за допомогою методу холодного пластичного деформування (ХПД) ґрунтується на механіці заглиблення лінійних інденторів та

використанні специфічних зон деформації. На рис. 11 представлена графічна блок-схема даного процесу.

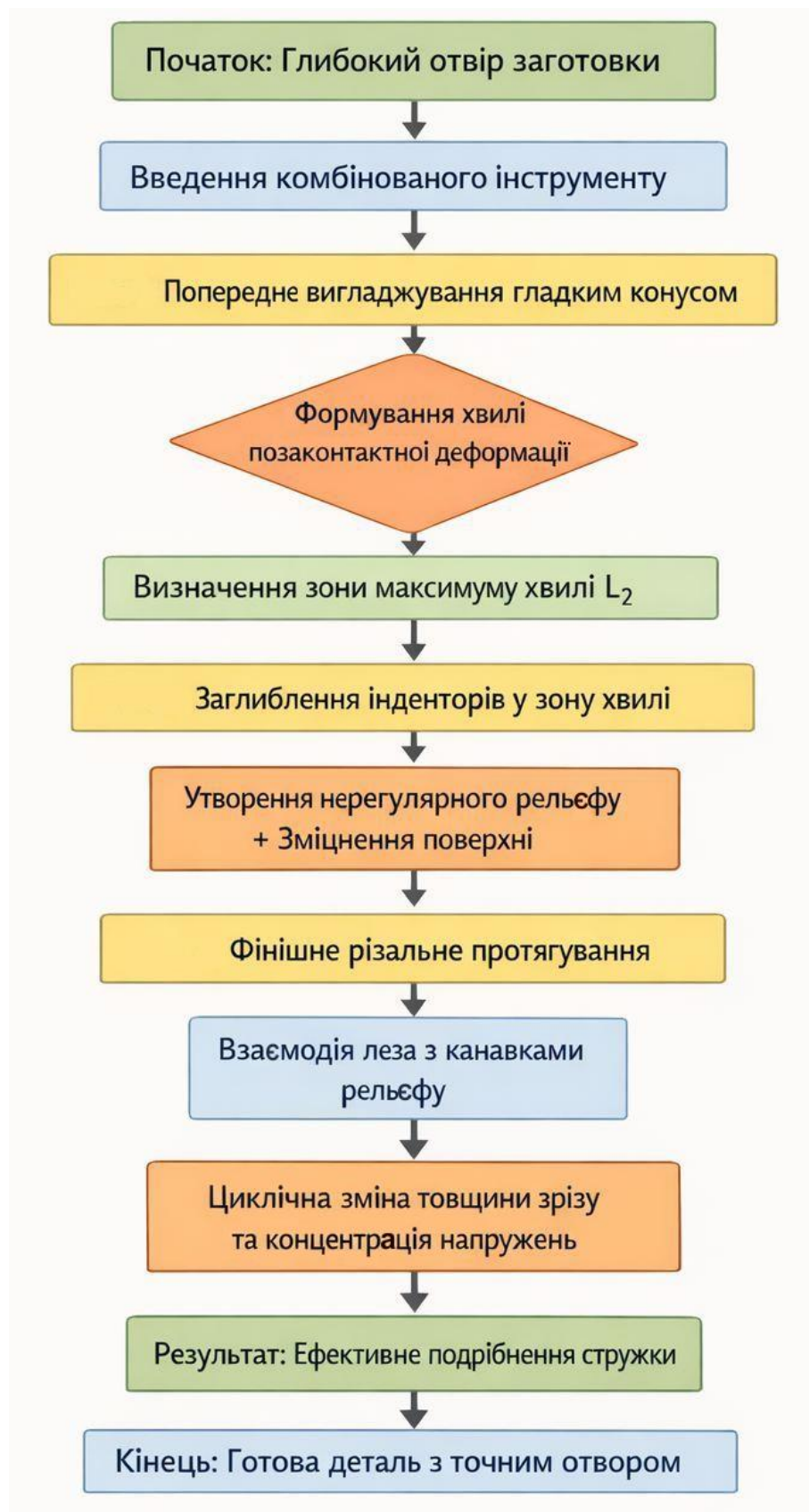


Рисунок 11 – Блок-схема процесу утворення нерегулярного рельєфу на оброблюваній поверхні глибокого отвору

Першим етапом є підготовка трубчастої заготовки. Зазвичай це попередня обробка отвору шляхом напівчистового розточування для забезпечення необхідної точності та шорсткості поверхні під подальше деформування.

Другий етап – це вигладжування поверхні за допомогою деформуючого елемента протяжки або прошивки. Для цього використовують спеціальну оправку або комбіновану протяжку, оснащену твердосплавними деформуючими елементами та додатковими інденторами.

Третім етапом є створення штучного осередку деформації в зоні дії деформуючого елемента протяжки. Під час переривчастого руху інструменту вздовж отвору виникає і рухається разом з ним кільцевий осередок деформації, що приводить метал у пружно-пластичний стан та відбувається формування хвилі позаконтактної деформації. Це явище характеризується виникненням попереду та позаду деформуючого елемента своєїрідної «хвилі» металу. У місці переходу конічної частини інструменту в циліндричну стрічку виникає позаконтактна зона, де робочий елемент протяжки не контактує з поверхнею інструменту.

Позиціонування індентора: Додатковий індентор встановлюється на певній відстані (L_2) від основного деформуючого елемента, яка відповідає максимуму хвилі позаконтактної деформації.

Процес заглиблення індентора (рельєфоутворення) може здійснюватися шляхом короткочасної зупинки руху протяжки або прошивки через певні відрізки шляху. При зупинці інструменту осередок деформації, який утворювався позаду першого деформуючого елемента, під дією пружних сил зникає і метал, перебуваючи в пружно-пластичному стані, вступає в контакт з індентором, утворюючи залишкову канавку. Після продовження руху інструмента процес повторюється задану кількість раз, в залежності від довжини ділянки, де потрібно нанести рельєф. В деяких випадках рельєф також може наноситися копіюванням профілю багатозубої оправки під дією сили заглиблення. Фінішні операції на оброблюваній поверхні деталі в нашому випадку різальне протягування з метою отримання заданого розміру та шорсткості. В якості додаткових операцій можлива термічна обробка,

абразивна обробка хонінгуванням або азотування для закріплення властивостей поверхневого шару.

Хвиля позаконтактної деформації, яка виникає під час руху деформуючих елементів інструмента є ключовим фактором для визначення місця встановлення додаткових робочих елементів. Найбільш ефективно заглиблення індентора відбувається саме в зоні її максимуму, оскільки там метал має найбільшу схильність до деформації. Методика розрахунку детально описана у працях [23] О.М. та О.О. Розенберга, а також їх учнів, які привнесли значний вклад розвиток наукової школи ІНМ АН України. Відстань до максимуму розраховується за формулою, що враховує товщину стінки деталі та параметри натягу.

Взаємодія індентора з поверхнею складається з декількох складових, а саме:

Механіка – індентор (один або декілька) діє на поверхню з певною нормальною силою P . Ця сила долає опір матеріалу, в залежності від його твердості та пластичності (відносного видовження). Зрозуміло, що на більш міцному матеріалі типу легованих сталей занурення індентора буде меншим.

Геометрія – форма утворюваної канавки (її глибина h , радіус основи ρ) напряму залежить від кута при вершині індентора (α) та радіуса його округлення.

Тертя – в процесі заглиблення індентора у оброблюваний матеріал виникає тертя, яке може знижувати ефективну силу заглиблення на 14...23% залежно від кута інструменту. Саме тому важливу роль відіграє застосування МОР, яке знижує тертя та підвищує стійкість індентора та якість обробки поверхні.

Дискретність – використання проміжногої пружного елемента дозволяє ліквідувати тангенціальні навантаження та підвищити межу текучості матеріалу на 40...70%, що сприяє створенню стійких дискретних поверхонь. Згідно з результатами досліджень [14-17], глибина нанесення рельєфу (канавки) за допомогою лінійних інденторів може варіюватися в межах від 0,02 до 5 мм.

Ключовими факторами, що впливають на глибину є матеріал індентора. Для отримання заданих значень глибини канавки (особливо для макрорельєфу та фасонного редукування) рекомендується використовувати зносостійкі тверді сплави групи ВК (наприклад, ВК6, ВК6М, ВК8).

Глибина отриманої канавки прямо залежить від прикладеної нормальної сили. Щодо геометрії робочих елементів індентора, то важливим є кут при вершині індентора (з позиції міцності його величина оптимально складає близько 60°) та радіус закруглення при його вершини ($\rho=0,005\dots0,5$ мм).

Найбільш вагомими характеристиками матеріалу оброблюваної деталі, що визначають опір заглибленню індентора, є її твердість та відносне видовження. При застосуванні сталевих деталей, де індентування може призвести до надмірного вичерпання пластичності матеріалу, рекомендується проводити термічну обробку (середнє відпускання при температурі $300\dots350^\circ\text{C}$) після процесу деформування.

У випадку, коли процес поєднує попереднє поверхнєве пластичне деформування (ППД) та фінішне різання (протягування), виникає специфічна механіка взаємодії. Використання нерегулярного рельєфу як засобу для подрібнення стружки – це ефективне технологічне рішення, що базується на створенні зон перемінної товщини зрізу.

Гладкий конус деформуючого елемента комбінованої протяжки виконує попереднє виправлення та ущільнення оброблюваної поверхні отвору деталі для подальшого нанесення рельєфу:

Створення хвилі позаконтактної деформації: Під час руху конуса перед ним і за ним утворюються ділянки збуреного металу. Найважливішим є те, що за робочою стрічкою конуса метал перебуває в стані розвантаження та пружного відновлення. Саме в цій зоні («хвості» хвилі) встановлюється індентор для нанесення рельєфу.

Ущільнення та вигладжування: Конус ліквідує вихідну шорсткість та створює зміцнений поверхневий шар (наклеп). Це підвищує межу текучості матеріалу, тому подальше заглиблення індентора відбувається в уже «підготовлену» напружену структуру.

Також під час взаємодії індентора з ущільненою поверхнею треба врахувати декілька факторів. Оскільки оброблювана поверхня вже zdeформована робочим конусом першого деформуючого елемента, робота індентора має певні особливості:

Геометрична стабільність – завдяки попередньому пластичному ущільненню, метал менше «спливає» навколо індентора. Форма заглиблення стає чіткішою, що важливо для майбутнього різання.

Дискретність та нерегулярність – нерегулярний рельєф (наприклад, хаотичне або переривчасте розташування канавок) дозволяє уникнути резонансних явищ під час подальшого різального протягування.

Використання хвилі – індентор використовує енергію залишкових напружень, що виникають під час руху конуса ДЕ. Це дозволяє наносити рельєф з меншими зусиллями, ніж на «сиру» поверхню, якщо він потрапляє в зону активної хвилі позаконтактної деформації.

Механізм подрібнення стружки (фінішне протягування) відбувається наступним чином:

Коли різальний зубець протяжки/прошивки взаємодіє з поверхнею, де вже нанесений рельєф, то відбувається переривчасте різання. Коли лезо ріжучого зубця потрапляє в заглиблення (канавку рельєфу), товщина стружки різко зменшується або стає нульовою. В цьому місці окрайки канавок діють як концентратори напружень, внаслідок чого в цих місцях стружка стає крихкою і легко ламається. Наявність нерегулярних заглиблень змушує стружку внаслідок зміни напрямку деформації постійно змінювати радіус завивання, що призводить до її саморуйнування на дрібні сегменти.

Важливо моментом є те, що глибина рельєфу (h) повинна бути дещо більшою за товщину зрізу (a), який знімає один зубець різального елемента протяжки, щоб забезпечити гарантоване переривання стружки. Якщо $h < a$, стружка буде лише мати рифлення, але може не розпадатися.

Позиціонування індентора – він має бути встановлений на такій відстані від краю конуса першого ДЕ, де висота хвилі буде максимальною.

Глибина рельєфу – для ефективного зламу стружки глибина канавки повинна на 10...20% перевищувати товщину зрізу a , яку знімає різальний зубець.

Нерегулярність – використання інденторів з різним кроком або переривчастим рухом запобігає виникненню вібрацій (резонансу) під час протягування. Така комбінація дозволяє отримати не просто чистий отвір, а поверхню з покращеними експлуатаційними властивостями та гарантованим відводом відходів різання.

2.4 Оцінка стану отриманого регулярного та нерегулярного мікрорельєфу

Оцінка мікрорельєфу (особливо регулярного, отриманого методами поверхневого пластичного деформування, наприклад, вібронакочуванням) є критично важливою для забезпечення зносостійкості та тримання мастила в деталях машин. Оцінка проводиться за двома основними напрямками: геометричні параметри (форма та розмір) та фізико-механічні характеристики поверхневого шару (рис. 12).



Рисунок 12 – Методи оцінки оброблених поверхонь з мікрорельєфом

До стандартних параметрів, за якими оцінюється отриманий нерегулярний мікрорельєф (тобто – шорсткість) згідно з ДСТУ/ISO відносяться:

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю;

Rz – висота нерівностей профілю по десяти точках;

R_{max} – максимальна висота профілю;

S та S_m – крокові параметри нерівностей.

При створенні регулярного мікрорельєфу (РМР), який отримується після вібронакочування або дискретного протягування додаються наступні показники:

F_H – відносна площа займана регулярними заглибленнями, яка є відношенням площі отриманих канавок до загальної площі поверхні (зазвичай, вона становить 15–45%).

h_k – глибина канавок, яка визначає об'єм мастильної кишені або напряду впливає на характер зламу стружки під час подальшого різального протягування;

S_k – крок регулярного профілю, який дорівнює відстані між сусідніми елементами рельєфу;

Кут сітки γ – це кут перетину канавок для сітчастих рельєфів.

Методи оцінки стану отриманої поверхні поділяють на контактні та безконтактні. Найпоширеніший контактним методом є профілометрія, де алмазна голка спеціальної форми переміщується по досліджуваній поверхні. Оснащені нею профілометри та профілографи дозволяють отримати кількісні значення (Ra , Rz) та графічне зображення профілю на спеціальному пареровому бланку або у вигляді електронного файлу. Перевагами такого способу є висока точність та стандартизація методів вимірювання. Недоліком можна вважати ризик пошкодження м'яких поверхонь алмазною голкою та складність оцінки площинних 3D-параметрів.

До оптичні або безконтактних методів відноситься інтерферометрія (або використання інтерференції світлових хвиль для побудови 3D-карти досліджуваної поверхні. Наприклад, для цього можливо використовувати

мікроскопи типу МІС-11, за допомогою яких виконується візуальне спостереження викривлення світлової смуги на нерівностях поверхні.

Лазерне сканування дозволяє швидко отримати цифрову модель мікрорельєфу з високою роздільною здатністю. Растрові та електронні мікроскопи використовуються для детального вивчення морфології поверхні, виявлення мікротріщин та дефектів, що виникли під час формування рельєфу.

В деяких випадках стан отриманого мікрорельєфу оцінюють за його функціональними властивостями. Так при використанні гідравлічного методу виконують вимірювання часу витікання стиснутого повітря або рідини між еталонною площиною та досліджуваною поверхнею. В цьому випадку, чим більша шорсткість поверхні, тим менша герметичність та швидше відбувається падіння тиску повітря або витікання рідини.

Спосіб оптичного відбиття використовує оцінка блиску поверхні та зазвичай використовується для дуже гладких (полірованих) поверхонь.

3. КОНСТРУКЦІЯ СЕКЦІЇ КОМБІНОВАНОЇ ПРОТЯЖКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ГЛИБОКИХ КРУГЛИХ ОТВОРІВ У СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ

3.1 Основні параметри регулярного та частково регулярного рельєфу

Попереднє нанесення гвинтових канавок на поверхню отвору за допомогою твердосплавних деформуючих елементів комбінованої протяжки є ефективним технологічним рішенням для вирішення проблеми подрібнення стружки. Такий підхід створює умови для переривчастого різання або штучної концентрації напружень у шарі металу, що зрізається.

Згідно з нормативною документацією [25], такий мікрорельєф класифікується як частково регулярний (ЧРМР) з безперервними регулярними нерівностями. Так, основними параметрами за ГОСТ 24773-81 є наступні показники:

- глибина нерівності (h). Вона є однією із найважливіших параметрів. Для ефективного подрібнення стружки глибина канавки повинна бути співмірною з товщиною зрізу наступного різального зубця або дещо перевищувати її. Стандартами пропонується ряд значень (наприклад, 10, 16, 25, 40 мкм тощо).

- осьовий крок (S_o). Цей показник визначає відстань між сусідніми витками канавки вздовж осі отвору. Осьовий крок безпосередньо впливає на довжину окремих сегментів стружки. Зазвичай, значення кроку вибираються з ряду від 0,063 до 20 мм.

- кут напрямку нерівностей (θ). Цей кут вимірюється між гвинтовою лінією канавки та напрямком руху протяжки (головним рухом). Він визначає траєкторію розриву стружки. Стандарт нормує кути від 0° до 90° .

- відносна площа (F_k). Площа визначає відсоток поверхні, зайнятий канавками на обробленій поверхні. Для цілей стружкоподрібнення цей параметр зазвичай становить 20...40%.

3.2 Технологічні переваги використання твердосплавних робочих елементів та рекомендації щодо вибору профілю отримуваної канавки

Якщо керуватись питанням підвищення стійкості робочих елементів протяжок або прошивок, то їх виготовлення із твердого сплаву типу ВК8 або ВК15 забезпечує високу стабільність геометричних параметрів канавок (h та S_o) протягом тривалого часу експлуатації інструменту. Окрім того, твердосплавні деформуючі елементи створюють не тільки регулярний рельєф, а також створюють зони наклепу (зміцнення), що сприяє легшому руйнуванню (крихкості) стружки в місцях контакту з різальним елементом.

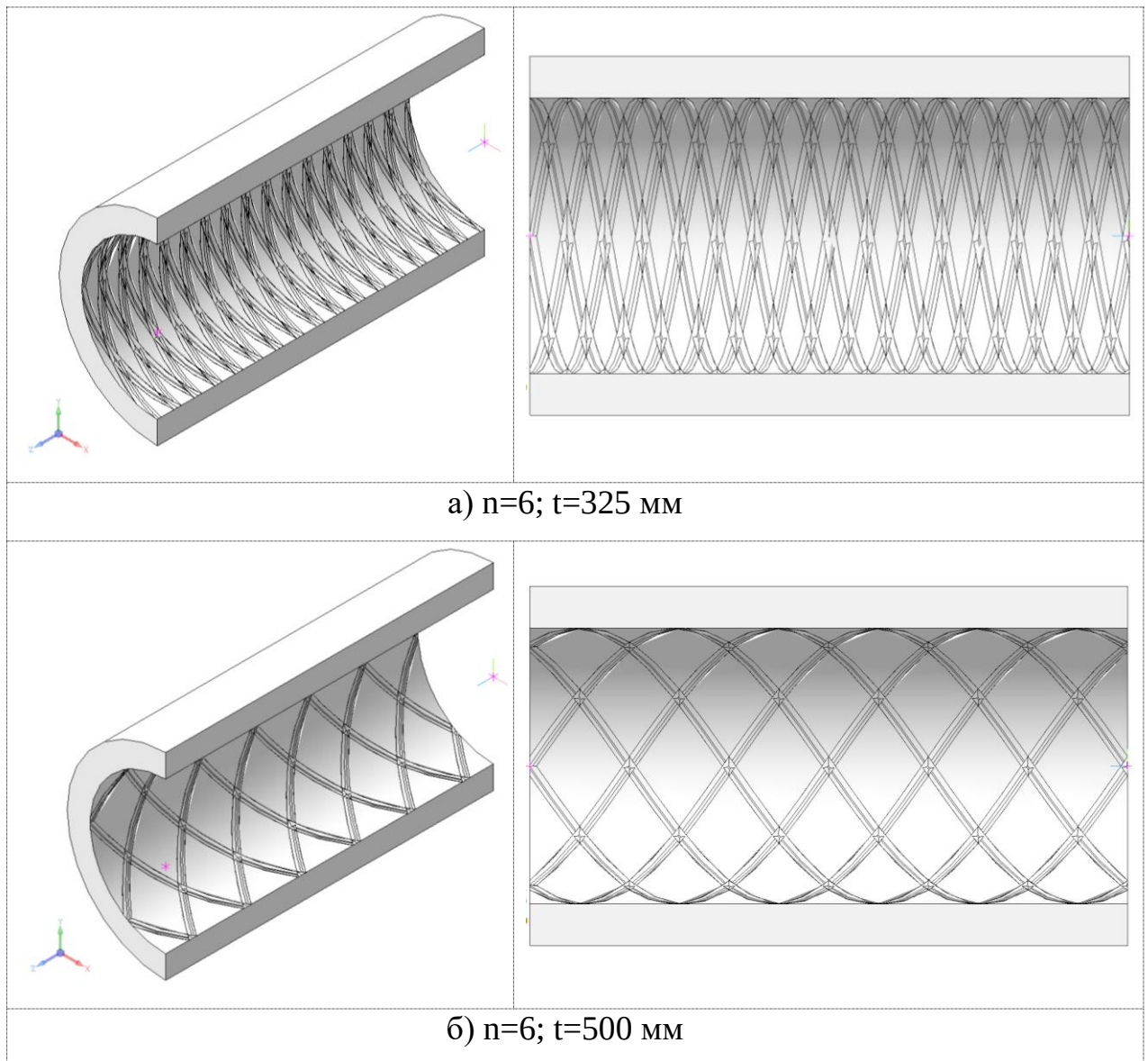
У випадку, коли потрібно максимально подрібнити стружку з метою найбільш ефективного заповнення нею стружкової канавки то можна використати повне пересечення нерівностей (нанесення правої та лівої гвинтових канавок), що створить так званий «сітчастий» рельєф.

Також важливою є форма отриманої канавки профілю. Використання елементів з вогнутою формою (які створюють виступи на поверхні) або навпаки залежить від конструкції різальної частини протяжки. Найчастіше наносять саме заглиблення (вогнутий мікрорельєф), які стають зонами розвантаження або розриву для стружки.

Тому на основі цієї інформації можна зробити висновок, що попереднє нанесення повного або часткового регулярного рельєфу у вигляді перехрещуваних гвинтових канавок дозволяє подрібнити безперервну «зливну» стружку, яка часто забиває стружкові канавки глибокі отвори, на сегментовану. Це дозволить суттєво оптимізувати заповнення стружкових канавок та покращити якість обробленої поверхні. При проектуванні необхідно орієнтуватись на параметри h та S_o , як головні чинники керування розміром стружки. Ще одним важливим фактором слід вважати технологічність виготовлення твердосплавних робочих елементів комбінованої протяжки, так як на фінальних стадіях обробки твердого сплаву його можна обробляти тільки за допомогою абразивних матеріалів на основі корунду або алмазного

порошку. Тому форму канавки на робочих елементах оберемо у вигляді напівкола, яке можна зформувати шліфувальним колом відповідного профілю.

На рис. 13 представлено моделювання форми отриманого мікрорельєфу після проходження самообертальних деформуючих елементів секції комбінованої протяжки, які обертаються відповідно за- та проти годинникового стрілки в залежності від кута нахилу η робочих елементів (інденторів) осі оброблюваного отвору, та відповідно, величини кроку t їх повного обороту, а також кількості одночасно працюючих інденторів n .



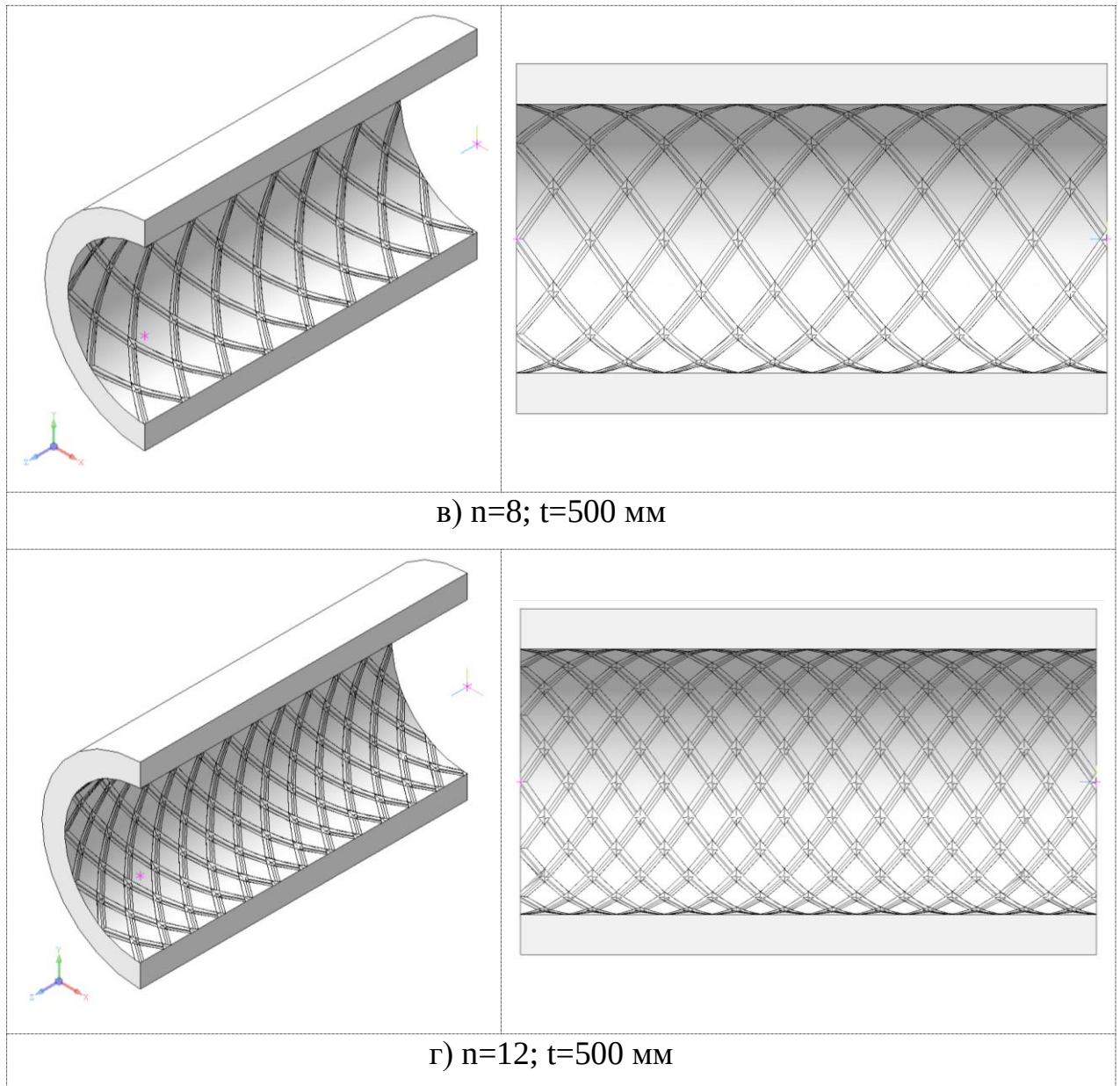


Рисунок 13 – Характер рисунку отриманого мікрорельєфу після проходження самообертальних деформувальних елементів з кута нахилу η та кількістю інденторів n

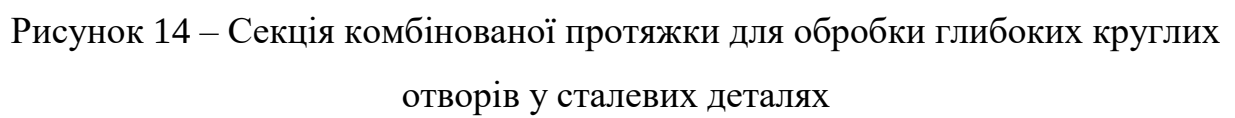
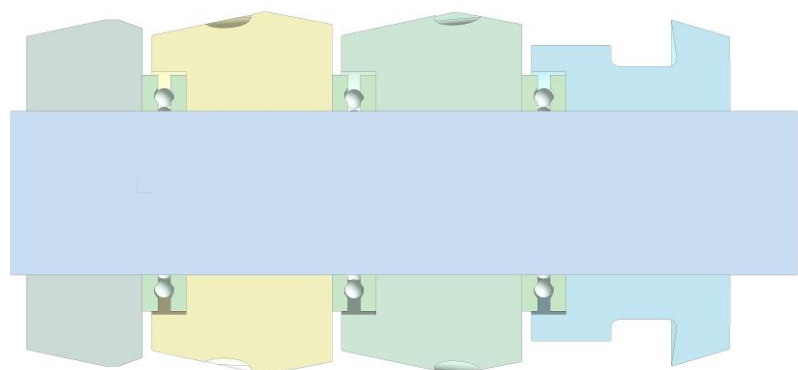
Як можна побачити, варіюючи кут нахилу η робочих елементів (інденторів) осі оброблюваного отвору, та відповідно, величини кроку t їх повного обороту, а також кількість інденторів n можливо керувати зміною форми отриманих сегментів мікрорельєфу та навантаження на круглий ріжучий зубець протяжки. Таким чином, можливо впливати на інтенсивність руйнування стружки під час різального протягування, її форму та розміри, що дозволяє підвищити ефективність заповнення стружкових канавок протяжки.

3.3 Характеристика конструкції протяжного інструменту та принцип його дії

Процес деформуючого протягування супроводжується попереднім деформаційним зміцненням матеріалу деталі, утворенням текстури в поверхневому шарі металу, формуванням поля залишкових напружень та виникненням зони позаконтактної деформації, що рухається разом з інструментом уздовж отвору при протягуванні. Усі ці фактори в різній мірі впливають на процес рельєфоутворення, причому дія останнього фактору може бути суттєвою стосовно параметрів канавки, особливо глибини, у випадку розміщення рельєфоутворюючого елемента у зоні позаконтактної деформації.

Конструкція секції комбінованої протяжки для обробки глибоких круглих отворів у сталевих деталях представлена на рисунках 14 та 15.

Секція протяжки складається з оправки 1, робочих елементів 2, 3, 4, 6 та трьох упорних кулькових підшипників 5. Деформуючий елемент 2 несе найбільше навантаження, він вигладжує поверхню отвору та утворює хвилю позаконтактної деформації, в зоні якої розташований самообертальний рельєфоутворюючий елемент 3. Елемент 4 розташований за хвилею позаконтактної деформації, він деформує оброблювану поверхню і також має можливість самообертання, але за рахунок свого профілю обертання здійснюється в зворотному напрямку. Таким чином після проходження обох робочих елементів на поверхні отвору формується нерегулярний рельєф, висота якого не перевищує припуск на ріжучий елемент. Поміж рельєфоутворюючих елементів для забезпечення їх обертання розташовані три опорні підшипники 5, які також сприймають осьові зусилля при протягуванні. Суцільний ріжучий елемент 6 зрізує необхідний припуск на поверхні, яка попередньо поділена рельєфоутворюючими елементами, і формує остаточний мікрорельєф оброблюваної поверхні.



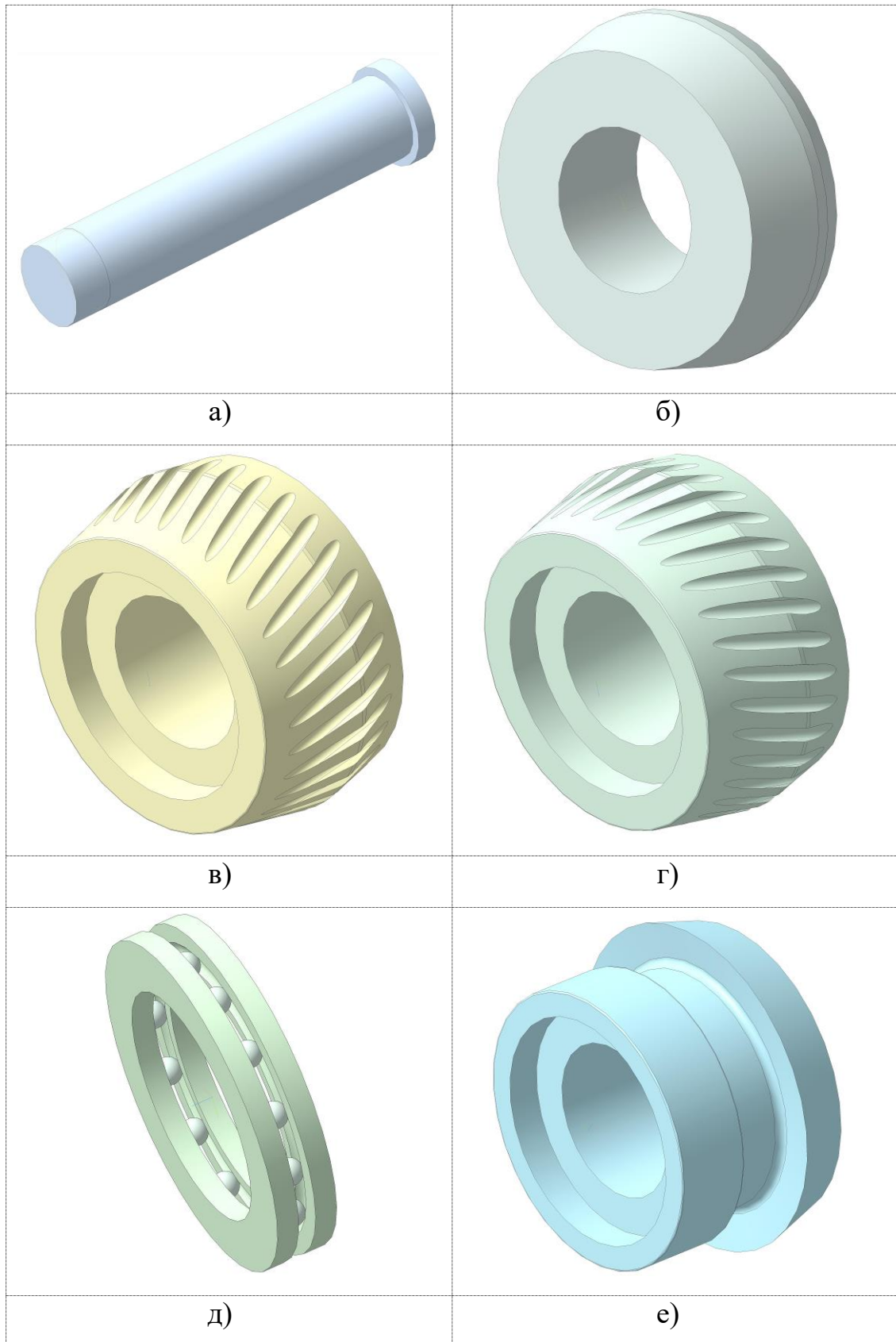


Рисунок 15 – Складові частини секції комбінованої протяжки:

а) оправка; б) деформуючий елемент; в) самообертальний рельєфоутворюючий елемент лівий; г) самообертальний рельєфоутворюючий елемент правий; д) опорний кульковий підшипник; е) ріжучий елемент

3.4 Розрахунок на міцність деформуючих елементів протяжки

Розрахунок на міцність робочих елементів протяжок виконується для визначення їх основних геометричних розмірів, а саме – товщини стінки, її висоти, ширини циліндричної стрічки та її відстані до торця.

Даний розрахунок виконано по методиці [13,23,24], в якій передбачається, що деформуючий елемент виготовлений з твердого сплаву та має симетрично навантажену форму. Тобто, зона контакту елемента з оброблюваною поверхнею, знаходиться на однакових відстанях від його торців, а висота цього елемента вибрана з умови його рівномірності на згин і стиск. Деформуючий елемент такої форми при оптимальній висоті має найбільшу несучу спроможність при найменшій витраті металу на його виготовлення.

Розрахунок виконується з визначенням товщини стінки за емпіричною формулою:

$$t_k = 0,329 \cdot \frac{Q^{0,735} \cdot K_L^{0,71} \cdot 0,938^\lambda}{f^{0,43} \cdot [\sigma_{uz}]^{0,735} \cdot D_k^{0,36}}, \quad (3.1)$$

де Q – сила протягування;

K_L – коефіцієнт висоти деформуючого елемента (відношення фактичної висоти L_K деформуючого елемента до його оптимальної висоти L_{onm});

λ – фактична ширина контакту робочої поверхні елемента з обробною поверхнею, яка залежить від діаметру отвору d_0 і товщини стінки t_0 деталі до обробки, а також від величини фактичного натягу a_ϕ ;

f – коефіцієнт тертя при деформуючому протягуванні;

$[\sigma_{uz}]$ – допустиме напруження від згину для твердого сплаву;

D_k – зовнішній діаметр деформуючого елемента, приймається конструктивно.

Дані для розрахунку;

$Q = 10 \text{ кН}$; $K_L = 1,3$; $\lambda = 1,1 \text{ мм}$ при $d_0 = 80 \text{ мм}$; $t_0 = 5 \text{ мм}$; $a_\phi = 0,25$; $f = 0,037$.

Допустиме напруження від згину для твердого сплаву визначається за формулою:

$$[\sigma_{uz}] = \frac{\sigma_{uz} \cdot K_{nc}}{K_{3,n}}, \quad (3.3)$$

де σ_{uz} – фактична межа міцності твердого сплаву при згині.

$$\sigma_{uz} = 4,26 \cdot D_K^{-0,36} \cdot t_k^{-0,45} \cdot \sigma_{uz,cm}, \quad (3.4)$$

де $\sigma_{uz,cm}$ – межа міцності твердого сплаву при згині, обумовлений ДСТУ;

$K_{n,c}$ – коефіцієнт, який залежить від посадки деформуючого елемента на стріжень протяжки.

$$K_{n,c} = 1,1 \cdot d_k^{0,33} \cdot t_k^{-0,42} \cdot e^{\frac{310 \cdot \Delta^{1,1}}{d_k}} \cdot K_\phi, \quad (3.5)$$

де d_k – діаметр отвору деформуючого елемента;

e – основа натурального логарифму;

Δ – зазор або натяг між поверхнею отвору деформуючого елемента і оправкою протяжки, при натягу має додатній знак, а при зазорі – від’ємний;

K_ϕ – коефіцієнт форми отвору деформуючого елемента.

Дані для розрахунку;

$d_k = 35$ мм; $\Delta = -0,0235$ мм;

$K_\phi = 1$ – для циліндричних отворів;

$t_k = 3,8$ мм, приймаємо попередньо.

$$K_{n,c} = 1,1 \cdot 35^{0,33} \cdot 3,8^{-0,42} \cdot e^{\frac{310 \cdot 0,0235^{1,1}}{35}} \cdot 1 = 0,99$$

Приймаємо $K_{n,c} = 1$

$K_{3,n}$ – коефіцієнт запасу міцності, $K_{3,n} = 2,2$;

Для ВК10М $\sigma_{uz,cm} = 1617$ Н/мм².

$$\sigma_{uz} = 4,62 \cdot 20,6^{-0,36} \cdot 3,8^{-0,45} \cdot 1617 = 1380 \text{ Н/мм}^2.$$

$$[\sigma_{uz}] = \frac{1380 \cdot 1}{2,2} = 627 \text{ Н/мм}^2$$

$$t_k = 0,329 \cdot \frac{(10^4)^{0,735} \cdot 1,3^{0,71} \cdot 0,938^{1,1}}{0,037^{0,43} \cdot 627^{0,735} \cdot 80^{0,36}} = 3,93 \text{ мм}.$$

Для подальшого розрахунку використано прийняте значення $t_k = 3,8 \text{ мм}$.
Знаходимо висоту деформуючого елемента.

$$L_K = K_L \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + \frac{8 \cdot \nu \cdot R_k \cdot W}{\pi \cdot (R_k^2 - r_k^2)}} \right], \quad (3.6)$$

де R_k і r_k – зовнішній радіус і радіус отвору деформуючого елемента відповідно.

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{80}{2} = 40 \text{ мм};$$

$$r_k = \frac{d_k}{2} = \frac{35}{2} = 17,5 \text{ мм};$$

ν – відношення межі міцності твердого сплаву при згині до межі міцності при стиску, для ВК10М $\nu = 0,54$;

W – момент опору згину деформуючого елемента в перетині, перпендикулярному до вісі, мм^3 . Значення W знаходимо по формулі:

$$W = \frac{9 \cdot (R_k^4 - r_k^4) \cdot (R_k^2 - r_k^2) - 8 \cdot (R_k^3 - r_k^3)^2}{12 \cdot (R_k^3 - r_k^3) - 18 \cdot (R_k^2 - r_k^2) \cdot r_k} \cdot \pi, \quad (3.7)$$

$$W = \frac{9 \cdot (40^4 - 17,5^4) \cdot (40^2 - 17,5^2) - 8 \cdot (40^3 - 17,5^3)^2}{12 \cdot (40^3 - 17,5^3) - 18 \cdot (40^2 - 17,5^2) \cdot 17,5} \cdot 3,14 = 116 \text{ мм}^3.$$

$$L_K = 1,3 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,1^2}{4} + \frac{8 \cdot 0,54 \cdot 40 \cdot 116}{3,14 \cdot (40^2 - 17,5^2)}} \right] = 3,6 \text{ мм}.$$

Визначимо мінімальну допустиму з конструктивних міркувань висоту $L_{\kappa.0}$ деформуючого елемента:

$$L_{\kappa.0} = \frac{a_\phi}{2 \cdot \text{tg} \alpha} + b + 2 \cdot (b_{\text{фас}} + c), \quad (3.8)$$

де b – ширина циліндричної стрічки, $b = 0,3 \text{ мм}$;

α – кут робочого конуса, $\alpha = 5^\circ$;

$b_{\text{фас}}$ – ширина фаски, $b_{\text{фас}} = 0,8 \text{ мм}$;

c – неробоча ділянка робочого конусу, що дорівнює довжині зворотного конусу, $c = 3 \text{ мм}$.

$$L_{\kappa.\partial} = \frac{0,02}{2 \cdot \operatorname{tg} 5^{\circ}} + 0,3 + 2 \cdot (0,8 + 3) = 8 \text{ мм.}$$

Умова міцності виконується, так як мінімально допустима висота $L_{\kappa.\partial}$, більше розрахованої висоти деформуючого елементу.

Мінімальна відстань h' від торця деформуючого елементу до циліндричної стрічки:

$$h' = \frac{L_{\kappa.\partial} + \lambda}{2}, \quad (3.9)$$

де $L'_{\kappa.\partial}$ – прийнята з умови міцності та конструктивних міркувань висота деформуючого елементу.

$$L'_{\kappa.\partial} \geq L_{\kappa.\partial}$$

Приймаємо $L'_{\kappa.\partial} = 15 \text{ мм.}$

$$h' = \frac{15 + 1,1}{2} = 5,55 \text{ мм.}$$

Приймаємо по конструктивним міркуванням: $h' = 6,5 \text{ мм.}$ Приведений розрахунок дає гарантію, що деформуючий елемент, який має знайдені значення геометричних розмірів, задовольняє вимогам міцності на згин та стиск.

3.5 Розрахунок на міцність різьбового з'єднання

У конструкції комбінованої протяжки для фінішної обробки гідравлічного циліндра використовується різьбове з'єднання М10, яке сприймає навантаження при зворотному ході штоку.

При розрахунку різьбового з'єднання «оправка–гайка» воно розглядається у напруженому стані, тобто з попереднім затягуванням. При затягуванні гайки, в оправці виникає розтягуюче зусилля та зусилля скручування. При спрощеному розрахунку напруженого з'єднання розраховується на розтяг, скручування враховується збільшенням осьової розтягуючої сили на 10%.

Проектний розрахунок різьбового з'єднання, навантаженого осьовою статичною силою проведено по наступній методиці.

Умова міцності оправки:

$$Q_p = [\sigma_p] \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{4}, \quad (3.10)$$

звідкіля

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot [\sigma_p]}}, \quad (3.11)$$

де Q_p – розрахункове осьове зусилля, Н;

$[\sigma_p]$ – допустиме напруження розтягу, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$;

d_1 – внутрішній діаметр різьби, мм.

$$Q_p = 4 \cdot 10^3 \cdot 1,1 = 4 \cdot 10^3$$

$$[\sigma_p] = 0,23 \cdot \sigma_m = 0,23 \cdot 360 = 82,8$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{3,14 \cdot [82,8]}} = 8,3$$

Таким чином різьба М10 буде достатня для даного з'єднання.

Розрахунок на міцність різьбового з'єднання при змінних навантаженнях проводиться по амплітуді циклу та по найбільшій напрузі циклу.

Умова міцності по амплітуді циклу:

$$n_a = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_a} \geq [n_a], \quad (3.12)$$

де n_a – дійсний запас міцності по амплітуді;

$[n_a]$ – допустимий запас міцності;

σ_{-1} – межа витривалості при розтягу матеріалу гладкого зразку при симетричному циклу; $\sigma_{-1} = 240 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$;

K_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень; $K_\sigma = 3,5$;

σ_a – амплітуда змінних напружень.

$$\sigma_a = \frac{\chi \cdot Q}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}, \quad (3.13)$$

де χ – коефіцієнт зовнішнього навантаження, $\chi = 0,05$.

$$\sigma_a = \frac{0,05 \cdot 4400}{2 \cdot \frac{3,14 \cdot 10^2}{4}} = 1,4;$$

$$n_a = \frac{240}{3,5 \cdot 1,4} = 48,9 > 2,5 = [n_a].$$

Умова міцності по амплітуді циклу виконується.

Перевірка умови міцності по найбільшому напруженні циклу.

$$n = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_o + 2 \cdot \sigma_a} \geq [n], \quad (3.14)$$

де n – дійсний коефіцієнт запасу міцності по максимальному навантаженню;

σ_m – межа текучості матеріалу;

σ_o – напруження від початкового затягування;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт, запасу міцності по максимальним напруженням.

$$\sigma_o = \frac{4 \cdot Q_o}{\pi \cdot d_1^2} \leq [\sigma_o], \quad (3.15)$$

$$Q_o = Q \cdot K, \quad (3.16)$$

$$K = 1,3$$

$$Q_o = 1,3 \cdot 4400$$

$$[\sigma_o] = 0,65 \cdot \sigma_m = 0,65 \cdot 360 = 234 \text{ МПа}$$

$$\sigma_m = 360$$

$$\sigma_o = \frac{4 \cdot 5720}{3,14 \cdot 10^2} = 72,8 < 234 = [\sigma_o]$$

$$n = \frac{360}{72,8 + 2 \cdot 1,4} = 4,76 > 1,25 = [n]$$

Таким чином, міцність по найбільшій напрузі циклу забезпечена.

На основі проведених досліджень запропоновано вдосконалений алгоритм розрахунку (рис. 16) секції комбінованої протяжки або прошивки, де враховано ряд важливих параметрів, безпосередньо впливаючих на процес попереднього деформування оброблюваного матеріалу, характер формування мікрорельєфу та безпосередньо процес утворення сегментованої стружки.

На ньому позначено:

ДЕ – деформуючий елемент

ДП – деформуюче протягування

ІМ – інструментальний матеріал

МОР – мастильно-охолоджуюча рідина

ОМ – оброблювальний матеріал

ПРМ – повний регулярний макрорельєф

РУ – рельєфоутворення

ХПД – холодне пластичне деформування

ХПКД – хвиля позаконтактної деформації

V – лінійна швидкість різання ДРП, м/с

K^{-1} – допустимий ступінь заповнення стружкової канавки

D_o, d_o, L_o, t_o – відповідно зовнішній діаметр, діаметр отвору, довжина і товщина стінки заготовки, мм

a_ϕ – натяг на ДЕ, мм

α_ϕ – кут забірного конуса ДЕ, град

l_2, l_3, h_2 – відповідно: відстань до максимуму ХПКД, висота і довжина ХПКД, мм

D, d, L, t – відповідно зовнішній діаметр, діаметр отвору, довжина і товщина стінки деталі, мм

$\sigma_B, \sigma_T, \sigma_{3T}$ – відповідно межа міцності при розтягу, межа текучості та межа міцності при згині, МПа

δ – відносне видовження, %

γ – передній кут РІ без наросту

η – кут нахилу ККР ЕПЛ рельєфу; град, рад

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм

ω – частота обертання РУЕ, мм

α_d – кут забірної частини деформуючої окрайки РУЕ, град

HV – твердість за Віккерсом, МПа

H_μ – мікротвердість, МПа

ε – деформація ХПД

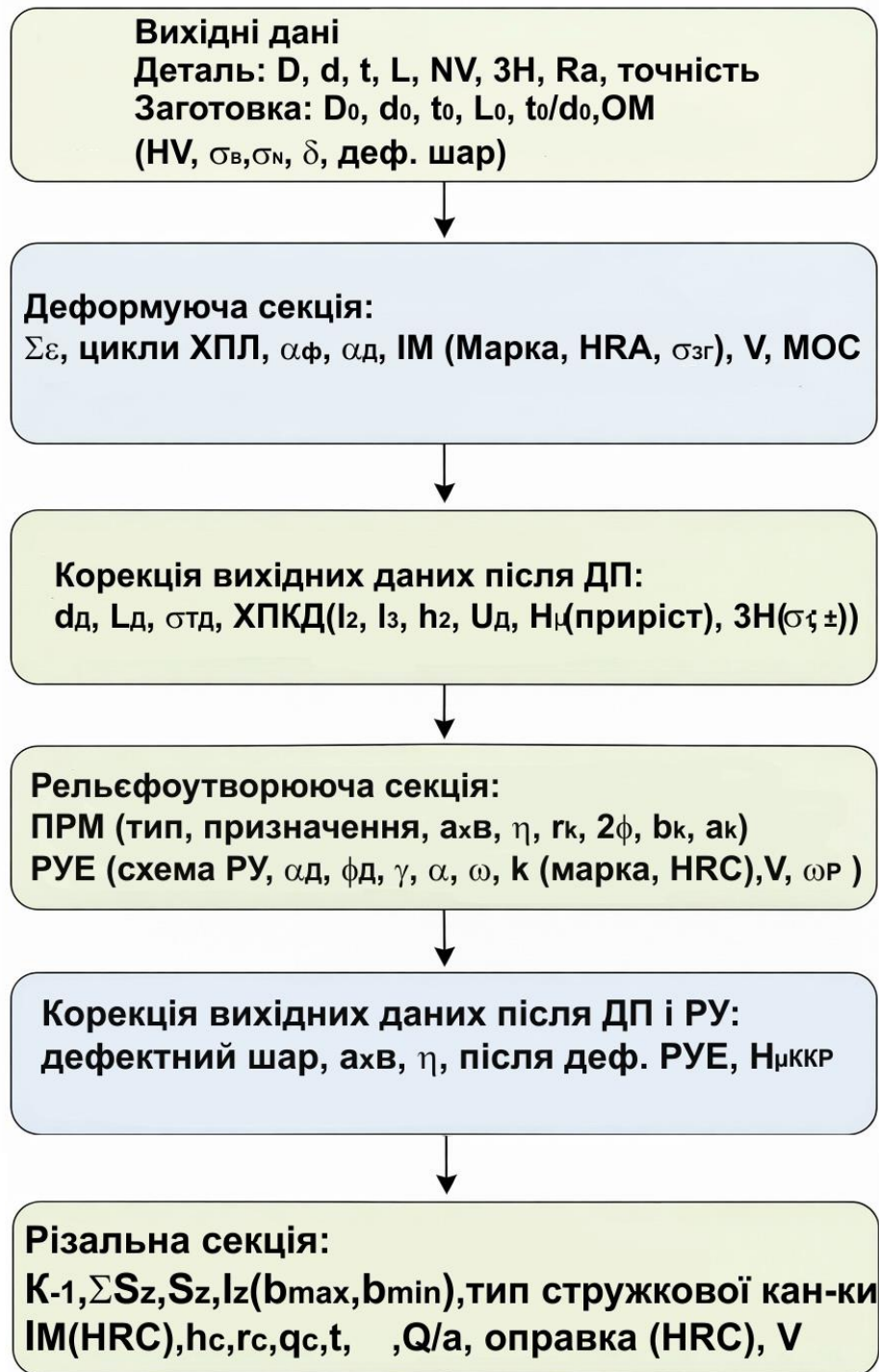


Рисунок 16 – Структурна схема розрахунку комбінованої протяжки з рельєфоутворюючими секціями

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО КОМБІНОВАНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ПРОТЯГУВАННЯ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ У СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЯХ

4.1 Загальні вихідні дані

Базовий технологічний процес обробки гільз гідроциліндрів діаметром $\varnothing 80$ мм включає операції чорнової, напівчистої розточки і розкочування отвору. В якості заготовки застосовується труба гарячекатана ГОСТ 8732-78 із розмірами $95 \times 12 \times 787$ мм. Недоліками існуючого технологічного процесу є низка продуктивність, використання труби підвищеного перерізу та значні припуски під розточування.

Впровадження нового технологічного процесу з використанням методу деформуюче-різального протягування дозволить використовувати у якості заготовки трубу з розмірами $95 \times 10 \times 787$ мм, підвищити продуктивність праці в 1,7-2,2 рази, покращити якість виготовлених деталей, зекономити 12,7 тонн труби.

Основні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів технологічного процесу зведено до таблиці 4.1.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$\kappa_i = \frac{N_d \cdot T_{\text{нор}} \cdot \gamma \cdot \kappa_{\text{вт}}}{t_e (1 + p)},$$

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

$T_{\text{нор}}$ – штучний час обробки однієї деталі, год.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

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

t_e – економічна стійкість інструменту, год.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Таблиця 4.1.

Основні техніко-економічні показники базового та проектного
варіантів технологічного процесу

№ з/п	Показники	Умовне позначе ння	Одиниці виміру	Величина за варіантом	
				базовим	проект- ним
1.	Річна програма випуску гільз гідроциліндрів	N_{∂}	шт.	500	500
2.	Трудомісткість операції:				
	а) чорнова розточна	$T_{нор}$	год	0,21	
	б) напівчистова розточна			0,11	0,11
	в) розкочування отвору			0,065	
	г) проточування канавки				0,025
	д) протягування:				
	– чорнове				0,025
	– чистове				0,065
3.	Витрата основних матеріалів на деталь (маса заготовки)	$B_{чор}$	кг	19,67	18,42
4.	Маса відходів	$B_{відх}$	кг	4,27	3,2
5.	Кількість одиниць обладнання:				
	а) токарно-гвинторізний 16K20П	Q			1
	б) токарно-гвинторізний 1K62Д			3	1
	в) горизонтально-протяжний 7545				1
6.	Оптова ціна одиниці обладнання:				
	– 16K20П	$\Phi_{бал}$	грн.		21850 0
	– 1K62Д				23700 0
	– 7545				48030 0
7.	Сумарна потужність електродвигунів	$\underline{N}_{\Sigma}$	кВт	45	42,5
8.	Коефіцієнт завантаження електродвигунів:				
	– за потужністю	K_N		0,8	0,8
	– за часом	K_{∂}		0,75	0,65
9.	Група ремонтної складності механічної / електричної частин верстата:	R_M/R_e	УРО		
	– 16K20П				11/12, 0

	– 1К62Д			11/8,5	11/8,5
	– 7545				11,0/8,2
10.	Потреба в інструменті	κ_i	шт.	381	13

Потреба в різцях-розкотниках (базовий варіант):

$$\kappa_{\phi} = \frac{12000 \cdot 0,385 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{1 \cdot (7 + 1)} = 381 \text{ шт.}$$

Потреба в комбінованих протяжках (проектний варіант):

$$\kappa_{np} = \frac{12000 \cdot 0,009 \cdot 0,45 \cdot 1,1}{16(12 + 1)} = 13 \text{ шт.}$$

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\phi} \cdot T_{нор}}{F_{\phi p m} \cdot \kappa_{\phi}},$$

де $F_{\phi p m}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

κ_{ϕ} – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Потреба у верстатах 1К62Д в базовому варіанті для виконання операцій:

– чорнова розточувальна:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,21}{4015 \cdot 1,1} = 0,57 \text{ (приймаємо 1 верстат);}$$

– напівчистова розточка:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,11}{4015 \cdot 1,1} = 0,3 (Q_{np} = 1);$$

– розточування отвору:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,065}{4015 \cdot 1,1} = 0,18 (Q_{np} = 1).$$

Потреба у верстатах в проектному варіанті:

– 16K20П:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,025}{4015 \cdot 1,1} = 0,07 (Q_{np} = 1);$$

– 1K62Д:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,025}{4015 \cdot 1,1} = 0,07 (Q_{np} = 1);$$

– 7545:

$$Q_p = \frac{12000 \cdot 0,065}{4015 \cdot 1,1} = 0,18 (Q_{np} = 1).$$

4.2 Витрати на проектування комбінованої протяжки визначаємо за формулою:

$$B_{нк} = H_{op} \cdot T_{кон} \cdot 3_{сг}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon},$$

де H_{op} – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальної деталі;

$3_{сг}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

H_v – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{\text{пк}} = 7 \cdot 19,0 \cdot 102,56 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 7 \cdot 19,0 \cdot 102,56 \cdot \frac{45}{100} = 24444,0 \text{ грн.}$$

4.3 Витрати на технологічну підготовку виробництва комбінованої протяжки:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{\text{tex}} \cdot 3_{\text{сг}}^m \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_v,$$

де T_{tex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальної деталі;

$3_{\text{сг}}^m$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_{\text{т}} = 7 \cdot 21,0 \cdot 101,21 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 7 \cdot 21,0 \cdot 101,21 \cdot \frac{65}{100} = 29637,0 \text{ грн.}$$

4.4 Визначення витрат на виготовлення інструменту.

Трудомісткість виготовлення комбінованої протяжки визначаємо в нормо-годинах за формулою:

$$T_o = \sum_{i=1}^m T_i,$$

де T_z , T_m , $T_{\text{т}}$, T_c , $T_{\text{ін}}$ – трудомісткість заготівельних, механічних, термічних, складальних та інших робіт (встановлена експертним шляхом та за допомогою нормативно-довідкової інформації).

Далі розраховуємо:

– основну заробітну плату виробничих робітників:

$$3_{op} = \sum_{i=1}^m C_{zi} \cdot T_i,$$

де m – кількість і-х видів робіт по виготовленню інструменту;

C_{zi} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують і-тий вид робіт, з врахуванням умов праці, грн.

Наприклад, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах по виготовленню інструмента:

$$З_{ор}^м = 92,015 \cdot 2,1 = 193,23 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки основної заробітної плати на інших роботах, результати складаємо і заносимо до таблиці 5.2.

– витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^m З_{opi} \cdot \frac{П_{ep}}{100},$$

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

– цехові витрати:

$$K_{цex} = \sum_{i=1}^m З_{opi} \cdot \frac{П_{цв}}{100},$$

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

Для механічних робіт:

$$B_o^м = 193,23 \cdot \frac{280}{100} = 541,05 \text{ грн.};$$

$$K_{цex}^м = 193,23 \cdot \frac{232}{100} = 448,30 \text{ грн.};$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати складаємо і заносимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Трудовісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені в собівартість комбінованої протяжки.

Види робіт	Трудовісткість робіт, нормо-год	Середній розряд	а тарифна ставка робітників, Основна	заробітна плата робітників, $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o		Загальноцехові витрати, $K_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,66	4	106,770	70,47	245	172,65	132	93,02
Механічні	2,10	4	92,015	193,23	280	541,05	232	448,30
Термічні	0,50	3	102,716	51,36	285	146,37	250	128,40
Складальні	0,30	4	92,015	27,60	210	57,97	142	39,20
Всього	3,56	—	—	342,66	-	918,04	-	708,91

Собівартість (повну) виготовлення інструменту розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на заводі кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{нов} = M_o + M_{\partial} + \Pi_n + T_p - B_{зв} + E_{tex} + \Pi_{tex} + Z_{op} + Z_{op} + B_c + B_{yn} + B_o + K_{цех} + K_{зав} + B_{ин} + K_{нев}$$

де M_o – витрати на основні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.

M_{∂} – матеріали допоміжні, грн.;

T_p – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

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

E_{tex}, Π_{tex} – енергія та паливо для технологічних цілей, грн.;

Z_{op} – додаткова заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – відрахування у соціальні фонди, грн.;

B_{yn} – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$K_{зав}, K_{нев}$ – загальнозаводські та позавиробничі витрати, грн.;

$B_{ин}$ – інші витрати, грн.

Розрахунок M_o та Π_n зводимо до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на виріб

№ з/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
<i>I. Основні матеріали</i>					
1.	Сталь 40Х	кг	5,0	50,915	114,75
2.	Сталь Р6М5	кг	1,1	390,00	198,00
	Всього основні матеріали				312,75
<i>II. Покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби</i>					
3.	Підшипник опорний	шт.	2	182,40	364,80
4.	Втулка дистанційна	шт.	4	60,31	241,24
	Всього покупних комплектуючих				606,04

Розрахунок собівартості зводимо до таблиці 4.4.

Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$C_{opt} = C_{nov} + \Pi_n$$

де Π_n – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_n = \frac{P_c \cdot C_{nov}}{100}$$

P_c – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$\Pi_n = \frac{20 \cdot 4474,38}{100} = 894,88 \text{ грн.}$$

$$C_{opt} = 4474,38 + 894,88 = 5370,0 \text{ грн.}$$

Виконані розрахунки зводимо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Повна собівартість виготовлення комбінованої протяжки та її оптова ціна

№ з/п	Стаття калькуляції	Позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	683,58
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	27,34
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_n$	табл. 4.5	606,04
4.	Зворотні відходи (віднімаються)	$B_{зв}$	6% від M_o	41,01
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d + П_n)$	52,68
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$ПЕ_{tex}$	59,8% від $З_{op}$	204,91
7.	Всього матеріальні витрати			1533,53
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	табл. 4.2	342,66
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	10% від $З_{op}$	34,27
10.	Відрахування у соціальні фонди	B_{cc}	22% від $(З_{op} + З_{op})$	82,92
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{цп}$	12,0% від $З_{op}$	41,80
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	918,04
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.2	708,91
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	221% від $З_{op}$	757,28
15.	Інші виробничі витрати	B_{in}	3,4% від $З_{op}$	11,65
16.	Виробнича собівартість інструменту	$C_{вир}$	Σст. 8÷16	4431,07
17.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	44,31
18.	Повна собівартість	$C_{нов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	4474,38
19.	Прибуток	$П_n$	20% від $C_{нов}$	894,88
20.	Оптова ціна підприємства	$Ц$	$C_{нов} + П_n$	5370,0

4.5 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) – B_e , які припадають на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах техпроцесу.

Розрахунок виконуємо за формулою, грн./дет.:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i,$$

де B_{mo} – витрати на основні матеріали, грн.

Витрати на основні матеріали:

$$B_{mo} = B_{чop} \cdot \Pi_m \cdot \kappa_{mp} - B_{відх} \cdot \Pi_{відх},$$

де $B_{чop}$ – чорнова маса деталі, кг;

$\Pi_m, \Pi_{відх}$ – відповідно ціна матеріалів та відходів, грн./кг;

κ_{mp} – коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, втрату матеріалів при транспортуванні та збереженні.

В базовому варіанті:

$$B_{mo}^b = 19,67 \cdot 55,24 \cdot 1,05 - 4,27 \cdot 15,61 = 1074,602 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_{mo}^{np} = 18,42 \cdot 52,76 \cdot 1,05 - 3,2 \cdot 15,61 = 970,475 \text{ грн.}$$

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

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

B_{ip} – витрати на експлуатацію ріжучого інструменту, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_{yn} – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

B_n – витрати на налагодження верстата, грн.

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

$$B_z = C_z \frac{T_{нор}}{60} (1 + \kappa_d)(1 + \kappa_c),$$

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

κ_d, κ_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

Всі операції базового та проектного технологічних процесів виконуються за IV розрядом:

В базовому варіанті:

$$B_3^6 = 92,015 \cdot 0,21 \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 25,932 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_3^{\text{пр}} = 92,015 \cdot 0,025 \cdot 2 \cdot 1,1 \cdot 1,22 = 6,174 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{ел}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot \kappa_o \cdot \kappa_N \cdot \kappa_{\partial}}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot C_{\text{ел}},$$

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

$\kappa_o = 0,65 \dots 0,8$ – коефіцієнт одночасної роботи двигунів;

κ_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом;

$\eta_m = 0,86 \dots 0,9$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів;

$\eta_c = 0,92 \dots 0,96$ – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-г силовій електроенергії (без ПДВ), грн.

$$B_{\text{ел}}^6 = \frac{45 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,7}{0,88 \cdot 0,95} \cdot 0,385 \cdot 18,1 = 157,541 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{42,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,65}{0,88 \cdot 0,95} \cdot 0,225 \cdot 18,1 = 75,361 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{д.м}} = \frac{M_{\text{зв}} \cdot R_M \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot \kappa_n,$$

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

R_M – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

κ_n – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $\kappa_n = 1$)

$$B_{\text{д.м}}^6 = \frac{79,5 \cdot 33 \cdot 0,385}{100} \cdot 1 = 10,112 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 33 \cdot 0,225}{100} \cdot 1 = 5,903 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального різального інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + pS_{\text{пер}}) \cdot \gamma T_{\text{нор}}}{t_e(p+1)} \kappa_{\text{вт}},$$

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

p – кількість переточок різального інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру різальної грані [27, табл. 7.12];

$S_{\text{пер}}$ – вартість однієї переточки, грн.;

γ – питома значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи [27, табл. 7.11];

t_e – економічна стійкість інструменту, хв. [27, табл. 7.12];

$\kappa_{\text{вт}}$ – коефіцієнт обліку втрати інструменту [27, табл. 7.12].

В базовому варіанті використовуються різці-розкатки:

$$B_{ip}^{\delta} = \frac{(705,60 + 7 \cdot 83,28) \cdot 0,385 \cdot 0,6}{1 \cdot (7+1)} \cdot 1,1 = 40,920 \text{ грн.}$$

$$B_{ip}^{\text{пр}} = \frac{(5370 + 12 \cdot 309,88) \cdot 0,09 \cdot 0,45}{16 \cdot (12+1)} \cdot 1,1 = 1,946 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання, грн.:

$$B_p = \frac{R_m \cdot P_{\text{вм}} + R_e \cdot P_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60},$$

де $P_{\text{вм}}, P_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на одну категорію ремонтної складності механічної та електричної частини верстата, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата при двозмінному режимі роботи (може бути прийнятим для одиничного та дрібносерійного виробництва – 4020 год.).

$$B_p^{\delta} = \frac{11 \cdot 980 + 8,5 \cdot 750}{4015} \cdot 0,385 = 1,645 \text{ грн.}$$

$$B_p^{\text{пр}} = \frac{11 \cdot 980 + 9,6 \cdot 750}{4015} \cdot 0,225 = 1,008 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання площі, грн.:

$$B_n = \frac{F_o \cdot \kappa_f \cdot C}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_{нор}}{60},$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

κ_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [27].

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн./м².

$$B_n^{\delta} = \frac{3,26 \cdot 3,5 \cdot 780 \cdot 0,385}{4015} = 0,854 \text{ грн.}$$

$$B_n^{np} = \frac{5,49 \cdot 3,0 \cdot 780 \cdot 0,225}{4015} = 0,720 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a}{F_{дрм} \cdot 100} \cdot \frac{T_{нор}}{60},$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{бал}$ – балансова вартість верстата, грн.:

$$\Phi_{бал} = C_{онт} (1 + \kappa_{тр} + \kappa_{м} + \kappa_{ор})$$

де $C_{онт}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$\kappa_{тр}$, $\kappa_{м}$, $\kappa_{ор}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05÷0,1), монтаж (0,04÷0,06), улаштування фундаменту (0,02÷0,08).

16K20: $\Phi_{бал} = 218500 \cdot (1 + 0,08 + 0,07 + 0,04) = 260015$ грн.;

1K62Д: $\Phi_{бал} = 237000 \cdot (1 + 0,08 + 0,07 + 0,05) = 284400$ грн.;

7545: $\Phi_{бал} = 480300 \cdot (1 + 0,08 + 0,07 + 0,06) = 581163$ грн.

$$B_a^{\delta} = \frac{284400 \cdot 20}{4015 \cdot 100} \cdot 0,389 = 5,511 \text{ грн.}$$

$$B_a^{np} = \frac{(260015 \cdot 0,11 + 284400 \cdot 0,025 + 581163 \cdot 0,09) \cdot 20}{4015 \cdot 100} = 4,384 \text{ грн.}$$

Виконані розрахунки зводять до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ з/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Матеріали основні	M_o	1074,602	970,475
2.	Заробітна плата оператора основна, додаткова з відрахуваннями в фонд соціального страхування	B_z	25,932	6,174
3.	Силова електроенергія	B_{el}	157,541	75,361
4.	Допоміжні матеріали	B_{dm}	10,112	5,903
5.	Універсальний різальний інструмент	B_{ip}	40,920	1,946
6.	Ремонт обладнання	B_p	1,645	1,008
7.	Утримання приміщення	B_n	0,854	0,720
8.	Амортизація обладнання	B_a	5,511	4,384
	Загальна сума	B_e	1317,12	1065,97

4.6 Розрахунок показників економічної ефективності.

4.6.1 Річний економічний ефект, який отримує виробник об'єкту розраховуємо за формулою:

$$E_{pv} = (C_{opt.np} - C_{nov.np}) \cdot P_g - E_n \cdot K_g,$$

де $C_{opt.np}$, $C_{nov.np}$ – відповідно оптова ціна та повна собівартість проектного інструменту, грн.;

P_g – програма виробництва інструменту, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K_g – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_g = B_{nk} + B_m = 24444 + 29637 = 54081 \text{ грн.}$$

де B_{nk} , B_m – відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$E_{pv} = (5370,0 - 4474,38) \cdot 23 - 0,16 \cdot 54081,0 = 11930 \text{ грн.}$$

4.6.2 Річний економічний ефект, який отримує підприємство – споживач, розрахуємо за формулою:

$$E_{p.cn} = (B_e^{\bar{}} - B_e^{np})N_{\partial} - E_n \cdot K_{cn},$$

де K_{cn} – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{cn} = \Phi_{бал}^{np} \cdot Q_{np} - \Phi_{бал}^{\bar{}} \cdot Q_{\bar{}} + \Pi_i^{np} \cdot K_i^{np} - \Pi_i^{\bar{}} \cdot K_i^{\bar{}},$$

де $\Phi_{бал}^{np}$, $\Phi_{бал}^{\bar{}}$ – відповідно балансова вартість проектних та базових верстатів, грн.;

Q_{np} , $Q_{\bar{}}$ – потреба у верстатах відповідно в проектному та базовому варіантах для виконання річної програми випуску деталей;

Π_i^{np} , $\Pi_i^{\bar{}}$ – вартість інструменту відповідно в проектному та базовому варіантах;

K_i^{np} , $K_i^{\bar{}}$ – потреба в інструменті відповідно в проектному та базовому варіантах.

$$K_{cn} = 284400 \cdot 3 - (260015 + 284400 + 581163) + 705,60 \cdot 381 - 5370 \cdot 23 = -127055 \text{ грн.}$$

$$E_{p.cn} = (1317,12 - 1065,97) \cdot 500 - 0,16 \cdot (-127055) = 145900 \text{ грн.}$$

4.6.3 Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

– у виробника:

$$T_{ок.в} = \frac{K_{\bar{}}}{(\Pi_{опт.пр} - C_{пов.пр}) \cdot \Pi_{\bar{}}} = \frac{54081}{(5370,00 - 4474,38) \cdot 23} = 2,6 \text{ роки;}$$

4.6.4. Зростання продуктивності праці визначаємо за показником витрат часу на одиницю продукції в проектному варіанті в порівнянні з базовим, %:

$$\Pi_n = 100 - \frac{T_{нор.пр}}{T_{нор.баз}} \cdot 100 = 100 - \frac{0,225}{0,385} \cdot 100 = 41,6\%.$$

4.6.5. В підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічні показників проекту (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6.

Підсумкові техніко-економічні показники проекту.

№ п/п	Показник	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+, –)
1.	Потреба в інструменті	шт./рік	381	23	–94,0
2.	Річна програма виробництва деталей (гільз гідроциліндрів)	шт./рік	500	500	–
3.	Трудомісткість виготовлення деталі	год	0,385	0,225	–41,6
4.	Потреба у верстатах для виконання виробничої програми випуску деталей:	шт.			
	– 16K20П	"		1	
	– 1K62Д	"	3	1	
	– 7545	"		1	
5.	Собівартість (повна) виготовлення інструменту	грн.	–	4474,4	–
6.	Оптова ціна інструменту з ПДВ	грн.	705,6	5370	+661,0
7.	Собівартість обробки однієї деталі	грн.	1317,12	1065,97	–19,1
8.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва (у виробника)	грн.	–	54081	–
9.	Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника	років	–	2,6	–
10.	Річний економічний ефект				
	– у виробника	грн.	–	11930	–
	– у споживача	грн.	–	145900	–

5. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених робіт по підвищенню ефективності поділу стружки при обробці глибоких отворів комбінованим протягуванням можливо зробити наступні висновки:

- проведено огляд актуальних літературних джерел по даній тематиці, визначена мета та задачі роботи;
- запропонована оновлена методика, технологічний процес та секцію комбінованого протяжного інструмента, який здатен значно підвищити ефективність протягування круглих отворів шляхом більш ефективного поділу стружки;
- доведено, що одним найбільш ефективних методів утворення регулярних та нерегулярних мікрорельєфів є метод, який ґрунтується на кінематичній схемі протягування за допомогою твердосплавних деформуючих елементів профільного типу, що самообертаються при переривчастому осьовому русі інструмента;
- доведена можливість ефективного поділу стружки при різальному протягуванні за рахунок використання самообертальних деформуючих елементів із твердого сплаву;
- запропоновано схему та 3D модель секції вдосконаленого комбінованого протяжного інструменту модульного типу. Протяжка/прошивка може складатися з декількох секцій, що містять деформуючий, рельєфоутворюючий та різальний твердосплавні елементи;
- розроблено рекомендації щодо результатів кваліфікаційної магістерської роботи, які стосуються вибору робочого обладнання, оснащення, схеми та режимів протягування/прошивання, технологічного середовища, варіантів застосування комбінованого інструменту та окремих його секцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Etsion, I. (2005). State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, 127(1), 248–253. <https://doi.org/10.1115/1.1828087>.
2. Pawlus, P., Reizer, R., & Wiecezowski, M. (2021). Functional importance of surface texture parameters. *Materials*, 14(18), 5326. <https://doi.org/10.3390/ma14185326>.
3. Schulze, V. (2006). *Modern mechanical surface treatment: States, stability, effects*. Wiley-VCH.
4. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1982. — 248 с.
5. Нагорняк С. Г., Чернець М. В. Регулярний мікрорельєф та його вплив на зносостійкість деталей машин. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямком "Машинобудування та металообробка"). — Луцьк: ЛНТУ.
6. Киричок П. О. Основи технології формування регулярних микрорельєфів деталей машин : навч. посіб. / П. О. Киричок. — К. : ІВЦ «Політехніка», 2003. — 136 с.
7. Рибак І. П. Поліпшення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту нанесенням регулярних рельєфів : дис. ... д-ра філос. : 131 / Рибак Ілля Петрович ; Нац. транспорт. ун-т. — Київ, 2023. — 145 с.
8. Посвятенко Е. К., Посвятенко Н. І., Рибак І. П. Механіка заглиблення лінійного індентора у поверхню деталі. Інженерія поверхні та реновація виробів : матеріали 22-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 15–16 червня 2022 р.). Київ, 2022. С. 101–106. (Це ключова праця, на якій базується розділ про індентування у вашій дисертації).
9. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O. Determining optimal parameters of regular microrelief formed on the end surfaces of rotary bodies. *Algorithms* 2021, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/a14020046>

10. Dzyura, V.; Maruschak, P. Optimizing the formation of hydraulic cylinder surfaces, taking into account their microrelief topography analyzed during different operations. *Machines* 2021, 9, 116. <https://doi.org/10.3390/machines9060116>

11. Slavov, S.D.; Dimitrov, D.M.; Mincheva, D.Y.; Dzyura, V.; Maruschak, P.; Semehen, V. Microstructure and microhardness research of steel 304 after forming partially regular reliefs by ball burnishing operation. *Materials* 2025, 18, 1565. <https://doi.org/10.3390/ma18071565>

12. Посвятенко Е.К. Наукове обґрунтування ефективності процесу деформуюче-ріжучого протягування: автореф. дис. на здобуття ступеня доктора. техн. наук спец. 05.03.01 «Процеси механічної і фізико-технічної обробки, верстати та інструмент» / Е.К. Посвятенко – Київ, 1993. – 35 с.

13. Посвятенко Е.К. Теоретичні основи розрахунку деформуюче-ріжучого інструменту / Е.К. Посвятенко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»: Машиностроение. – 1998. – Вып. 33. – С. 41–54.

14. Посвятенко Е.К. Визначення параметрів стружкороздільної канавки при деформуючому протягуванні. / Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 2. – С. 57–59.

15. Паладійчук Ю. Б. Протягування порожнистих деталей машин інструментом з рельєфоутворювальними секціями : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Ю. Б. Паладійчук – Київ, 2002. – 16 с.

16. Посвятенко Е.К. Проектування протяжок з рельєфоутворюючими секціями / Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук // Вибрации в технике и технологиях. – 2000 – №2. С. 57–61.

17. Посвятенко Е.К. Ресурсозберігальні процеси механічної обробки гідроциліндрів автомобілів сімейства ЗІЛ і КамАЗ для комунального господарства / Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук, Ю.М. Іванов // Системні

методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту, експлуатації автомобілів. – 2000. – Вип. 9. – С. 89–97

18. Ступницький В. В. Моделювання процесів холодного пластичного деформування в ієрархічній структурі технологічної підготовки виробництва. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2018. № 890. С. 15–21.

19. Нагірний Ю. П., Мазур М. П., Нагірна О. Я. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару деталей віброоброблюванням. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 1(79). С. 24–30.

20. Немировский Я.Б. Особенности обработки гильз ДВС деформирующим протягиванием / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2004. – Вип. 15. – С. 425–432.

21. Іванов Ю.М. Шляхи удосконалення ресурсозберігаючих комбінованих технологічних процесів виготовлення та ремонту деталей транспортних засобів / Ю.М. Іванов // Резание и инструмент в технологических системах, 1999. – Вип. 55. – С. 129 – 134.

22. Іванов Ю.М. Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та ремонту виконавчих органів гідросистем автомобілів і тракторів [Текст] / Ю.М. Іванов, Ю.Б. Паладійчук // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 1999. – Вип. 28. – С. 286–289.

23. Nemirovskyy Ya. Issues about limit plastic deformations of deforming of cast iron parts [Text] / Ya. Nemirovskyy, O. Chernyavskyy, P. Yeryomin, Yu. Tsekhanov // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – №1(81).– Ternopil, TNTU, 2016.– pp. 88-97.

24. Чернявський О.В. Обробка круглих отворів протягуванням / О.В. Чернявський // Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2008 – 72 с.

25. ДСТУ EN ISO 25178-2:2022 Геометричні специфікації виробу (GPS). Текстура поверхні: площа. Частина 2. Терміни, визначення та параметри текстури поверхні (EN ISO 25178-2:2022, IDT; ISO 25178-2:2022, IDT).

26. Мельничук П.П., Лосєв В.Ю., Богайчук О.М. Чистова обробка плоских поверхонь деталей з утворюванням необхідного регулярного мікрорельєфу. Серія «Технічні науки», Житомирський державний технологічний університет, 2012 рік

27. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів: метод. Вказівки для виконання економічної частини дипломних проектів для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування» //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.

28. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O. Determining optimal parameters of regular microrelief formed on the end surfaces of rotary bodies. *Algorithms* 2021, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/a14020046>

29. Dzyura, V.; Maruschak, P. Optimizing the formation of hydraulic cylinder surfaces, taking into account their microrelief topography analyzed during different operations. *Machines* 2021, 9, 116. <https://doi.org/10.3390/machines9060116>

30. Slavov, S.D.; Dimitrov, D.M.; Mincheva, D.Y.; Dzyura, V.; Maruschak, P.; Semehen, V. Microstructure and microhardness research of steel 304 after forming partially regular reliefs by ball burnishing operation. *Materials* 2025, 18, 1565. <https://doi.org/10.3390/ma18071565>

31. Заїка, С., Заїка, А., Лисенко, О., & Скібінський, Я. (2025). Підвищення ефективності обробки отворів корпусних деталей із чавуну деформуючим протягуванням. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 357(5.1), 167-174. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-20>

32. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Цеханов Ю.О., Єрьомін П.М., Мірзак В.Я., Щербина К.К. «Особливості деформуючого протягування

малопластичних матеріалів» Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», м. Чернігів, Україна, 23-25 вересня 2020 р., стор. 9-11
<http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/20975>