

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

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

на тему:

«Вдосконалення інструмента для напівчистої та чистої обробки отворів у
деталях типу втулка»

«Improvement of the tool for semi-finishing and finishing of openings in details like
a plug»

Виконавець: ст. гр. МВ-20М1,9

_____ Кривошея К.А.

Керівник: к.т.н., ст. викл.

_____ Єрьомін П.М.

Рецензент:

Зав. каф. ММіР

_____ Гречка А.І.

Центральноукраїнський національний технічний університет

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ММіР

Андрій
ГРЕЧКА

«____» _____
2022 р.

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

Костянтина КРИВОШЕЇ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вдосконалення інструмента для напівчистої та чистої обробки

отворів у деталях типу втулка

2. Керівник роботи: к.т.н., ст. викл. Павло ЄРЬОМІН

3. Строк подання роботи до захисту _____ травня 2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є вдосконалення інструмента для напівчистої та чистої обробки отворів у деталях типу втулка в умовах серійного виробництва.

Завдання:

- вивчити процеси, що відбуваються під час взаємодії деформуючого елемента протяжки та оброблюваної поверхні деталей типу втулка за допомогою методу кінцевих елементів у програмному середовищі Deform 2D/3D;
- визначити методи та засоби обробки круглих отворів на основі процесу деформуючого протягування;
- розробити вдосконалений метод моделювання процесу деформуючого протягування у деталях типу втулка;
- розробити рекомендації для виготовлення вдосконаленого 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
Науково-			
дослідний	Павло ЄРЬОМІН		
Організаційно-			
економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Лютий 2022	вик.
2.	Вступ	Лютий 2022	вик.
3.	Мета та задачі роботи	Лютий 2022	вик.
4.	Методика роботи	Березень 2022	вик.
5.	Теоретична робота	Березень-квітень 2022	вик.
6.	Висновки	Травень 2022	вик.
7.	Визначення економічної ефективності	Квітень 2022	вик.
8.	Оформлення роботи	Травень 2022	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2022 р.

Керівник роботи

Павло ЄРЬОМІН

(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2022 р.

Студент

Костянтин
КРИВОШЕЯ

(підпис)

Анотація

КРИВОШЕЯ Костянтин. Вдосконалення інструмента для напівчистої та чистої обробки отворів у деталях типу втулка. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2022. – ____ с. Матеріали презентації ____ іл.

Із застосуванням програмного комплексу DEFORM-2D/3D розроблена модель процесу деформуючого протягування отворів у втулках із чавуна, сталі та латуні, яка дозволяє аналітично визначати формозміну деталі, напружений стан металу у вогнищі деформації та енергосилові параметри.

Встановлено немонотонний характер зміни розбивки отвору в залежності від товщини стінки та матеріалу деталі, що оброблюється. Підтверджено що наявність розбивки обробленого отвору залежить від початкових геометричних параметрів деформуючого елемента. Проведені експерименти підтверджують адекватність створеної моделі реальному процесу обробки.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів досліджень при конструюванні, виробництві та експлуатації запропонованого протяжного інструменту складає у споживача 1651000 грн.

Актуальність: Проведені дослідження процесу протягування отворів у деталях типу втулка з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3D дозволили підійти до раціонального використання протяжного інструмента та початкових геометричних параметрів його робочих елементів.

Практичне значення: Отримані результати дозволяють проектувати технологічне встаткування та інструмент для даного виду металообробки, а також оцінити можливість використання існуючих протяжних верстатів та гідравлічних пресів для деформуючого протягування за даною схемою.

Ключові слова: деформуюче протягування, метод кінцевих елементів, енергосилові параметри.

Summary

KRIVOSHEYA Constantine. Improvement of the tool for semi-finishing and finishing of openings in details like a plug. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, 2022. - ____ p. Presentation materials ____ slides.

Using the DEFORM-2D/3D software package, a model of the process of deforming drawing of holes in bushings made of cast iron, steel and brass was developed, which allows to analytically determine the shape change, stress state of metal in the deformation center and power parameters.

The non-monotonic nature of the change in the hole breakdown depending on the wall thickness and the material of the workpiece is established. It is confirmed that the presence of the breakdown of the machined hole depends on the initial geometric parameters of the deforming element. The conducted experiments confirm the adequacy of the created model to the real processing process.

The expected economic effect of the implementation of research results in the design, manufacture and operation of the proposed long tool is the consumer 1651000 UAH.

Relevance: Studies of the process of stretching holes in the parts of the sleeve using the software DEFORM 2D/3D allowed to approach the rational use of the broaching tool and the initial geometric parameters of its working elements.

Practical meaning: The obtained results allow to design technological equipment and tools for this type of metalworking, as well as to evaluate the possibility of using existing broaching machines and hydraulic presses for deforming drawing according to this scheme.

Key words: deforming drawing, finite element method, power parameters.

Вступ

Актуальність теми. Соціально-економічний розвиток нашої країни включає корінну технічну реконструкцію усіх провідних галузей промислового комплексу, при проведенні якої необхідно вирішити цілий ряд важливих питань.

Важливу роль в рішенні цього завдання відіграє вітчизняна металообробна промисловість. Розвиток українського машинобудування неможливий без розробки та впровадження в виробництво нових прогресивних технологій, обладнання та сучасного інструменту, які в комплексі забезпечують значне підвищення продуктивності праці, створення продукції, яка буде задовольняти світовим стандартам, економію енергетичних ресурсів та металу.

Такий спосіб холодної пластичної обробки отворів, як деформуюче протягування твердосплавним інструментом, є найбільш повно задовольняючим наведеним вище вимогам. Завдяки високій продуктивності, економічності і ряду інших переваг деформуюче протягування достатньо широко використовується в багатьох галузях машинобудування, насамперед в серійному виробництві.

В ряді наукових робіт, виконаних відомими вченими Ю.Г. Проскуряковим, О.А. Розенбергом, А.М. Кузнєцовим та іншими, представлені результати досліджень процесу деформуючого протягування, впливу на основні параметри та характеристики якості і експлуатаційні показники оброблюваних деталей. Надана низка рекомендацій по проектуванню та виготовленню деформуючих протяжок, а також по виконанню процесу протягування.

Але, як показує літературний огляд, процес деформуючого протягування ґрунтовно вивчено та ефективно застосовується лише для обробки пластичних матеріалів типу сталей або кольорових металів. В той же час, питання деформуючого протягування матеріалів із обмеженою пластичністю, в тому числі чавунів, розглянуто досить обмежено і, зазвичай, лише для рішення окремих задач. Обмежена кількість робіт по даному питанню свідчить про

недостатність систематичних всебічних досліджень цього методу відносно обробки деталей із графітовмісних (сірих) чавунів. Обмеженість в наявних працях повних даних по впливу параметрів процесу деформуючого протягування на параметри якості та експлуатаційних показників деталей типу втулка можна пояснити тим, що обмежений ресурс пластичності сірих чавунів не привертав до себе достатню увагу фахівців, а це, в свою чергу, заважало створенню нових технологій по обробці деформуючим протягуванням деталей із названого конструктивного матеріалу.

Велика питома вага сірих чавунів серед конструкційних матеріалів обумовлена їх високими механічними та ливарними властивостями, тому вдосконалення протяжного інструмента для напівчистої та чистої обробки отворів у деталях типу втулка із сірих чавунів є досить актуальною.

Мета і задачі дослідження. Дана випускна кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуальної задачі, а саме – вдосконалення протяжного інструмента для напівчистої та чистої обробки отворів у деталях типу втулка із сталі, латуні та сірого чавуна. При вирішенні цієї задачі необхідно розглядались наступні питання:

- вивчення процесів, що відбуваються під час взаємодії деформуючого елемента збірної протяжки та оброблюваної поверхні втулки за допомогою методу кінцевих елементів у програмному середовищі Deform 2D/3D;
- визначення методів та засобів обробки круглих отворів на основі процесу деформуючого протягування;
- розробка вдосконаленого методу моделювання процесу деформуючого протягування одиничним робочим елементом у деталях типу втулка;
- розробка рекомендацій для практичного створення технологічних процесів оригінального інструменту.

Розділ 1. Огляд та аналіз літературних джерел, мета та завдання роботи

1.1 Сутність деформуючого протягування

Деформуюче протягування – процес обробки отворів в деталях методом одиничного або послідовного ступінчатого пластичного деформування.

Деформуюче протягування, як вигладжуюче, відомо вже декілька десятиріч. Цей процес використовувався на фінішній операції після лезовий та абразивної обробки внутрішньої поверхні виробу із пластичних сталей, кольорових металів, а також чавунів. Робоча частина інструменту виготовлялась із загартованих інструментальних сталей. Але розповсюдження цього способу внаслідок низької стійкості деформуючих елементів і здатністю схоплення інструментального матеріалу з оброблюваним, обмежувалось лише незначними деформаціями.

Створення мінералокерамічних твердих сплавів та освоєння синтезу алмазів (1960-61 р.р.) і кубічного нітриду бору та налагодження у наступні роки промислового випуску абразивного інструменту із надтвердих матеріалів дали поштовх для значного розширення технологічних можливостей твердосплавних деформуючих протяжок і області їх використання.

Як показали численні дослідження та виробнича практика, деформуюче протягування відрізняється від різального суттєвими особливостями, а саме:

- цей процес забезпечує збереження суцільності волокон оброблюваного металу і, в результаті, підвищує всі його експлуатаційні характеристики.

- дає можливість досягнення низької шорсткості ($Ra = 0,32 - 0,05$ мкм) з великою опорною поверхнею на різних м'яких, в'язких і кольорових металах, що підвищує зносостійкість виробу, покращує умови роботи пари тертя та прироблюваність деталей.

– поєднання низької шорсткості обробленої поверхні із зміцненням поверхневого шару гарантує отримання залишкових стискуючих напружень і в результаті забезпечення високих експлуатаційних показників деталей, особливо при циклічних навантаженнях.

– зниження шорсткості оброблюваної поверхні в декілька разів за один прохід робить процес деформуючого протягування одним із самих продуктивних.

Простота конструкції деформуючих протяжок і налагодження самого процесу, а також його надійність дозволяють здійснити деформуюче протягування практично в умовах будь-якого виробництва.

Висока стійкість деформуючих протяжок визначає стабільність всіх якісних показників у часі, що створює передумови для автоматизації деформуючого протягування отворів в різних деталях.

Одна із самих простих конструкцій збірних деформуючих протяжок показана на рис. 1.1.

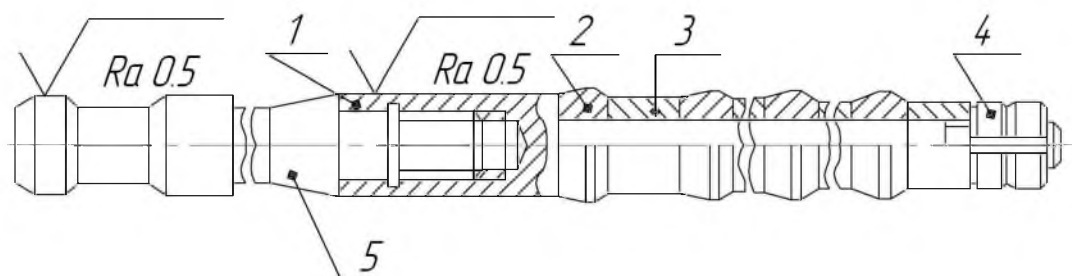


Рисунок 1.1 – Конструкція деформуючої протяжки

Протяжка складається із сталевого загартованого стрижня 1, деформуючих елементів 2, виготовлених із мінералокерамічного твердого сплаву, та дистанційних втулок 3. Дистанційні втулки та деформуючі елементи закріплені на стрижні протяжки гайками 4. Стрижень протяжки вгвинчується в передній хвостовик 5. Можливі також і інші конструктивні рішення.

Деформуючий елемент має вигляд кільця, робоча частина якого показана

на рис. 1.2

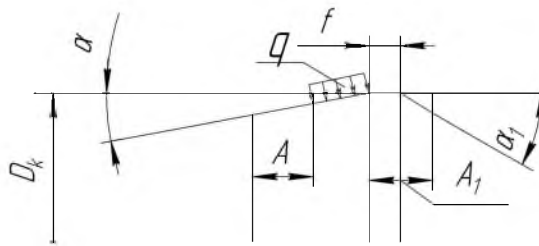
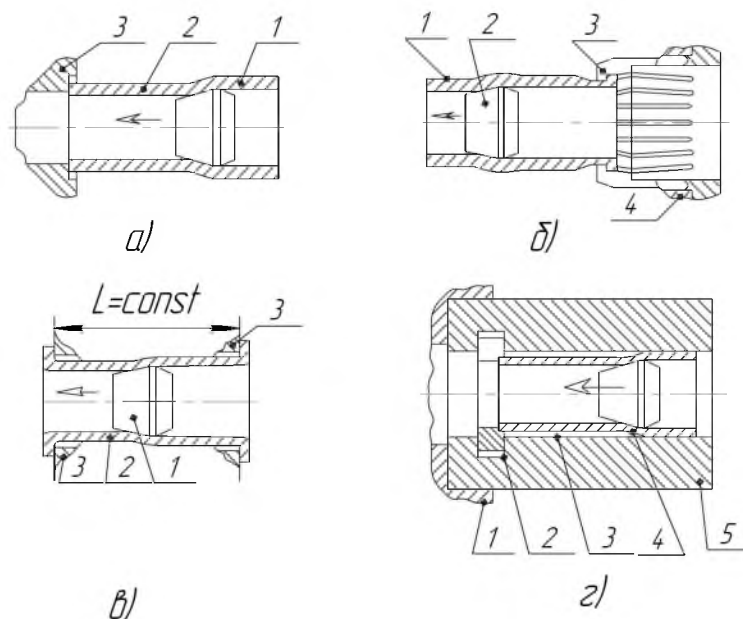


Рисунок 1.2 – Робоча частина деформуючого елементу

Робоча частина має робочий та зворотний конуси, з кутом нахилу твірної α і α_1 , відповідно та циліндричну стрічку, довжиною l . Зовнішній діаметр D_k наступного деформуючого елемента більший діаметра попереднього на величину номінального натягу на деформуючий елемент. За рахунок цього при переміщенні інструмента скрізь деталь здійснюється пластична деформація металу стінок заготовки і діаметр оброблюваного отвору збільшується. Частіше всього деформуючі елементи виконують симетрично навантаженої форми, при якій ділянка силового навантаження робочої частини розташована на однаковій відстані від торців ($A = A_1$).

Процес деформуючого протягування може бути виконаний за схемами представленими на рис. 1.3.



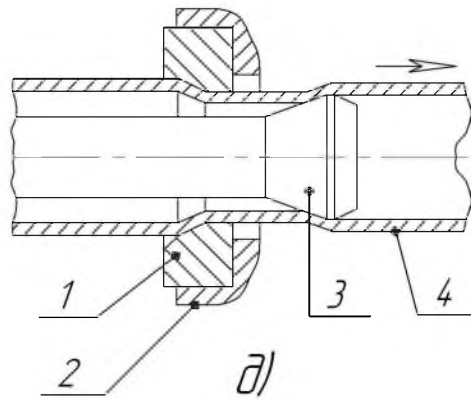


Рисунок 1.3 – Обробка деформуючим протягуванням за схемами: стискання (а); розтягування (б); вісьового заневолення (е); в жорсткій обоймі (з); вільного деформуючого протягування сумісно із редукуванням (д)

Найбільш розповсюджена схема стискання (рис. 1.3, а) згідно якої деталь 2 при обробці опирається вихідним торцем на опору 3. Стрілкою показаний напрямок руху інструмента 1. Таку схему використовують при обробці коротких деталей ($L/d_0 < 3 \div 4$) та деталей з високою жорсткістю. На рис. 1.3, б показана обробка за схемою розтягування. В цьому випадку вхідний торець деталі 1 є опорним. Для закріплення деталі в опорі 3 (2 – інструмент, 4 – опорна плита) у її вхідного торця по зовнішній поверхні точать кільцеву канавку, або деталь закріплюється за фланець, різь або виступи, які розташовані біля вхідного торця. За такою схемою обробляють довгі деталі ($L/d_0 > 3 \div 4$) при підвищених вимогах до прямолінійності їх твірної, а також деталей з малою жорсткістю.

У відділі обробки металів різанням та холодним пластичним деформуванням ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України розроблений спосіб деформуючого протягування тонкостінних виробів типу втулок і труб великої довжини за схемою, яка отримала назву – «вісьове заневолення» (рис. 1.3, е). Обробка за такою схемою виконується наступним чином: заготовка 2 роздається деформуючим елементом, який рухається в напрямку показаному стрілкою. Обидва кінці заготовки, за допомогою технологічних елементів, зафіксовані вздовж вісі на опорах 3. Під час обробки в стінках виробу, попереду

і за деформуючим елементом, виникають розтягуючі напруження, які перешкоджають скороченню деталі. При цьому вісь оброблюваного отвору досягає прямолінійного положення, так як деталь розтягнута між двома опорами.

Деформуюче протягування за схемою стискання (рис. 1.3, *а*) є вільним. При цьому (особливо при обробці тонкостінних деталей) не завжди можна отримати високу якість і точність обробленої поверхні в зв'язку з невисокою жорсткістю заготовки. В таких випадках використовують протягування із радіальним заневоленням, тобто заготовка в процесі обробки знаходиться в жорсткій або пружній обоймі (рис. 1.3, *з*). Оброблювана деталь 3 одним із торців впирається на розтискну опору 2, яка встановлена в жорсткій обоймі 5. Обойма закріплена в опорній плиті 1 протяжного верстата. Через оброблюваний отвір рухається в напрямку стрілки деформуючий елемент 4. Високий контактний тиск, який виникає на заключній стадії протягування, дозволяє отримати більш високу якість і точність обробленої поверхні.

До недоліків такого процесу слід віднести складність витягування виробу із обойми.

В деталях із великою товщиною стінки, коли за умовами обробки контактний тиск між деформуючими елементами і оброблюваною поверхнею можна зменшити, обробку отвору виконують в пружній обоймі типу цанги, яка охоплює зовнішню поверхню деталі.

З метою підвищення якості обробки в деяких випадках деформуюче протягування сумішають із редукуванням (рис. 1.3, *д*). Можливі два варіанти виконання такого способу. В першому варіанті робоча частина деформуючої протяжки 3 розташована за волокою 1, яка установлена в опорній плиті 2 волочильного верстата. Трубка заготовка 4 рухається в напрямку за стрілкою. За другим варіантом деформуючий елемент протяжки розміщується в зоні калібрувальної стрічки волоки. Це дає можливість зменшити на необхідну величину товщину стінки виробу.

1.2 Особливості деформуючого протягування матеріалів із обмеженою пластичністю.

Деформуюче протягування як спосіб холодної пластичної обробки круглих отворів є одним із методів, що найбільше повно задовольняють наведеним вимогам [32, 46, 65].

Завдяки високій продуктивності та ряду інших причин деформуюче протягування знаходить усе більше широке застосування в багатьох галузях машинобудування, насамперед серійному виробництві.

Науковою основою для інтенсивного впровадження деформуючого протягування у виробництво були теоретичні та експериментальні дослідження, виконані радянськими вченими Ю.Г. Проскуряковим [46, 50-51], О.А. Розенбергом [56, 58-67], А.М. Кузнєцовим [31, 32], В.П. Монченко [35] і іншими, дослідження властивостей процесу деформуючого протягування, а також впливу його основних параметрів на характеристики якості та експлуатаційні властивості оброблюваних деталей дозволили розробити цілий ряд рекомендацій з розрахунку та проектування деформуючого інструменту і процесу протягування.

Однак, як показує огляд літературних даних, процес деформуючого протягування всебічно вивчений і ефективно застосовується у виробництві стосовно до обробки гами пластичних і, зокрема, деяких видів важкооброблюваних [29] металів.

У той же час питання деформуючого протягування деталей з матеріалів з обмеженою пластичністю, у тому числі сірих чавунів, розглянутий недостатньо глибоко, систематичних досліджень по зазначеному питанню не проводилося, про що свідчить обмежене число опублікованих праць. У літературних джерелах недостатньо ґрунтовних даних по впливу параметрів процесу деформуючого протягування на характеристики якості, геометричної точності і експлуатаційні властивості деталей, не розглянуті також досить

важливі питання контактної взаємодії інструмента з оброблюваною поверхнею в умовах обробки матеріалів з обмеженою пластичністю.

Роботи, виконані відомими вченими А.В. Щоголевым [76], В.Ф. Бобровим [7], Г.І. Грановським [14, 15], Д.К. Маргулісом [33] і іншими, сприяли інтенсивному використанню цього методу при обробці точних отворів у деталях з різних матеріалів, у тому числі і чавунів.

Однак вимоги до продуктивності виготовлення і якості машинобудівних виробів безперервно зростають, тому проблема обробки отворів деталей типу втулка на сьогоднішній день є досить актуальною.

Останнім часом для фінішної обробки точних отворів у деталях з матеріалів з обмеженою пластичністю у нашій країні та за кордоном всі частіше звертаються до різних методів поверхнево-пластичного деформування (ППД) [18, 19, 20, 25, 30, 50]. Є також приклади протягування точних отворів у чавунних деталях комбінованими [9, 26, 54, 55] і деформуючими (або вигладжуючими) [10, 12, 13, 42, 43] протяжками, які забезпечують незначні пластичні деформації. Ці приклади, хоча і носять суцільно приватний характер та не розкривають повністю можливостей прогину деформуючого протягування, указують на перспективність його використання в технології обробки деталей із сірого чавуну.

Дослідженню процесу обробки отворів у деталях машин різними методами ППД присвячена велика кількість робіт, але лише в деяких з них [1, 9, 12, 13, 26, 42, 43, 49-52, 54, 55, 60] порушені питання, пов'язані з деформуючими протягуванням отворів у деталях із чавуну.

У роботі [49] наведені результати експериментальних і теоретичних досліджень впливу параметрів процесу деформуючого протягування (або дорнування) циліндричних отворів на силу протягування при обробці різних по фізико-механичним властивостях матеріалів. Установлено, що величина сили протягування в значній мірі залежить від кроку та кількості одночасно працюючих деформуючих елементів, їх геометрії, довжини та діаметра

оброблюваного отвору, товщини стінки деталі та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Однак наведені в роботі [49] результати стосуються в основному пластичних матеріалів і лише в одному випадку - при розгляді впливу фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів на силу протягування - згадується сірий чавун СЧ15.

Роботи [1, 52] присвячені питанням деформуючого протягування отворів у деталях з матеріалів з обмеженою пластичністю (чавун, силумін) з обмеженою товщиною стінок. Обробку таких деталей автори рекомендують здійснювати у жорсткій обоймі при гідростатичному протитиску, що сприяє підвищенню точності геометричної форми оброблюваних деталей і зниженню інтенсивності утворення наросту на деформуючих елементах.

У роботах [26, 55] розглянуті питання по вивченню процесу протягування отворів у чавунних деталях збірними твердосплавними протяжками, які мають різальні, калібрувальні та деформуючі елементи. Наведено практичні рекомендації з вибору діаметральних розмірів деформуючих елементів з урахуванням забезпечення високої точності отвору, що протягуються, і мінімальної шорсткості обробленої поверхні. Показано, що збірні твердосплавні протяжки, оснащені різальними, калібрувальними і деформуючими елементами, здатні забезпечити шорсткість обробленої поверхні отворів у деталях із сірого чавуну СЧ12, СЧ15 і СЧ18 у межах $Ra=0,16...0,32$ мкм. При цьому як технологічне змащення рекомендується застосовувати гас або 5% емульсію.

У роботі [9] викладений досвід експлуатації збірних твердосплавних протяжок, оснащених різальними, калібрувальними і деформуючими елементами при обробці отворів корпусу амортизатора автомобіля (чавун СЧ18). Впровадження комбінованого протягування у виробництво зазначеної деталі дозволило виключити з технологічного процесу чистове розточування, протягування різальними протяжками зі швидкорізальної сталі та хонінгування.

Великий науковий і практичний інтерес представляють дослідження, виконані І.В. Поздняковою і А.Я. Кривоносом [42, 43], які стосуються

деформуючого протягування деталей із чавунів з різними фізико-механічними властивостями - СЧ21, КЧ35, МСЧ32. У цих роботах розглянуті питання впливу різних параметрів процесу деформуючого протягування на характеристики якості оброблюваних деталей, наведені рекомендації з вибору оптимальних натягів на деформуючі елементи і їх кількість. На підставі проведених досліджень автори зробили висновки про можливість і доцільність використання процесу деформуючого протягування при обробці деталей з матеріалів з обмеженою пластичністю, крім того, автори вказують на неможливість переносу закономірностей процесу деформуючого протягування пластичних матеріалів на обробку матеріалів з обмеженням ресурсом пластичності.

У роботі [60] представлені результати дослідження впливу номінального натягу на деформуючий елемент і сумарної деформації на силу протягування та шорсткість обробленої поверхні при обробці сірого чавуну твердістю HB230. Доведено, що сили протягування чавунних втулок значно менше сил при протягуванні ідентичних сталевих. На думку авторів, різниця в силах протягування пояснюється тим, що в чавунних втулках пластична деформація поширюється лише на шар невеликої товщини в той час як у сталевій втулці може охопити всю товщину стінки. Відмічено, що на чавунних втулках не можна доводити деформацію до настільки більших величин, як на сталевих, щоб уникнути раптового руйнування деталей.

Вивчаючи вплив величини номінального натягу на деформуючий елемент і сумарної деформації на шорсткість обробленої поверхні, автори показують, що деформуюче протягування чавунних втулок не дає настільки значного зниження шорсткості обробленої поверхні, як це спостерігається на сталевих, тому що до чавуну не можуть бути прикладені великі пластичні деформації через його крихкість.

У роботі [12] представлені результати дослідження процесу деформуючого протягування деталей із сірого чавуну виконані в центральній лабораторії різання металів ЧТЗ (м. Челябінськ). Автори даної роботи

рекомендують для виготовлення деформуючих елементів тверді сплави марок ВК6 і ВК8М, як найбільш зносостійкі. Встановлено, що найкращою геометричною формою для деформуючих елементів із твердих сплавів є форма поверхні, утворена робочим конусом, циліндричною стрічкою та зворотним конусом. Місце перетину конуса зі стрічкою рекомендується скруглити. Кут утворюючого робочого та зворотного конусів повинен перебувати в межах $\alpha=4\ldots5^\circ$. Наведені рекомендації з розподілу натягу між деформуючими елементами залежно від їх кількості. Зазначено, що при обробці деталей твердосплавними деформуючими елементами збільшується мікротвердість обробленої поверхні.

Деякі питання деформуючого протягування отворів у деталях із чавуну розглянуті також у роботах [50, 51]. Зокрема рекомендована геометрія деформуючих елементів зі швидкорізальної сталі Р18. Відповідно до рекомендацій кут утворюючого робочого конуса α необхідно вибирати в межах $2\ldots5^\circ$, а кут утворюючого зворотного конуса повинен бути рівним $4\ldots5^\circ$. Але, на думку автора розглянутих робіт, також ефективно можуть застосовуватися деформуючі елементи з подвійним заточенням ($\alpha=4\ldots5^\circ$, $\alpha_1=1^\circ$).

Питанню підвищення довговічності деталей машин із чавуну за допомогою деформуючого протягування присвячена робота М.А. Гоголіцина та А.А. Кодіна [13]. На прикладі обробки гільз двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) Д37Е автори показують переваги деформуючого протягування отворів перед хонінгуванням. Заміна, операції хонінгування деформуючим протягуванням скорочує час обробки на фінішній операції, знижує потреби в устаткуванні та площі під нього, зменшує витрату інструмента, по даним розглянутої роботи період приробітки зразків з гільз, оброблених деформуючим протягуванням, на 33% менше в порівнянні зі зразками гільзи після операції хонінгування.

У роботі [54] викладені практичні рекомендації із проектування та розрахунку протяжок з елементами, що вигладжують, для обробки отворів у деталях з різних матеріалів, у тому числі і чавуну. Для обробки деталей із

чавуну рекомендовано застосовувати елементи, що вигладжують, конічної форми з вольфрамокобальтових і вольфрамотитанокобальтових твердих сплавів.

Аналіз матеріалів, наведених у вище розглянутих літературних джерелах, показує, що незважаючи на актуальність проблеми, питання деформуючого протягування деталей із сірого чавуну розглянуто недостатньо глибоко. Практично у всіх зазначених роботах, список яких досить обмежений, розглядаються лише окремі сторони цього процесу. У роботах [49-51] можна знайти тільки фрагменти, що стосуються даної проблеми, а в дослідженнях [26, 55, 60] деформуюче протягування деталей із чавуну розглядається на рівні приватних питань. Не заповнюють цей пробіл і дослідження [13, 42, 43], які торкаються питання обробки деформуючим протягуванням конкретних типів деталей.

Таким чином, наявні в літературі відомості через певну обмеженість не дозволяють всебічно оцінити можливості процесу деформуючого протягування стосовно до обробки отворів у деталях із чавуну. В той же час, ряд прикладів [9, 13, 42, 43] указують на доцільність використання цього процесу при обробці матеріалів із обмеженою пластичністю замість або додатково до традиційних процесів різання.

Винятково важливе значення при вивченні процесу деформуючого протягування мають дослідження умов взаємодії між інструментом і виробом. Такі дослідження дозволяють визначити коефіцієнт тертя в зоні контакту деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею деталі, вивчити його залежність від різних умов обробки та вишукати шляхи його зниження.

Питанням контактного тертя при деформуючому протягуванні присвячені роботи [17, 29, 61, 64, 71].

Велика увага вивченню умов тертя в зоні контакту деформуючого елемента з оброблюваною деталлю приділено в роботі [64]. На підставі численних експериментів, проведених на різних пластичних матеріалах з

використанням різноманітних технологічних змащень, автор показує вплив на коефіцієнт тертя контактних тисків, що діють між інструментом і деталлю, шорсткості оброблюваної поверхні та твердості оброблюваного матеріалу. Згідно із цими дослідженнями підвищення твердості оброблюваного матеріалу та контактних тисків (до певної межі) сприяє зменшенню коефіцієнта тертя. Також зменшується коефіцієнт тертя при підвищенні мікронерівностей оброблюваної поверхні, які служать резервуаром для технологічного змащення. Подібні результати шорсткості, що свідчать про вплив контактних тисків і, оброблюваної поверхні на коефіцієнт тертя, наведені в роботі [29], автор якої досліджує процес деформуючого протягування важкооброблюваних матеріалів.

На умови тертя між деформуючим елементом і оброблюваною деталлю, крім розглянутих вище факторів, величезний вплив робить технологічне змащення [29, 64]. Ефективність застосування того або іншого виду технологічного змащення визначається, насамперед, її впливом на коефіцієнт тертя з наслідками, що випливають звідси, - забезпеченням мінімальної сили протягування та перешкодою схоплюванню оброблюваного матеріалу з інструментальним. При деформуючому протягуванні найбільш широке поширення одержали рідкі технологічні змащення: 10%-я емульсія, сульфофрезол, рослинні масла та ін. Однак, як свідчать експериментальні дані [29, 64, 67], область ефективного використання рідких технологічних змащень обмежується величиною контактних тисків. Так, наприклад [64], у процесі деформуючого протягування деталей зі сталі 18Х2Н4ВА-Ш із використанням сульфофрезола несуча здатність змащення зникає при контактних тисках 1,9-2,1 ГПа, що супроводжується різким збільшенням коефіцієнта тертя. Тому для обробки деталей методами холодної пластичної деформації при високих контактних тисках рекомендують застосовувати тверді технологічні змащення на основі дисульфиду молібдену або колоїдного графіту [29, 64, 67, 80], несуча здатність яких вище, ніж рідких технологічних змащень.

Відомо, що графіт є відмінним змащенням [3, 8, 28, 29, 63, 64, 79, 80]. При терті кристали графіту зчіплюються з поверхнею підложки (чавун, сталь і

інші конструкційні матеріали) і, орієнтуючись у певному напрямку, створюють захисну антифрикційну плівку товщиною до 100 ангстрем [8]. Мастильної здатності графіту сприяє його зволоження [8], додавання у зону тертя рідкого мастила [69], а також зміцнення поверхневого шару підложки методами механічної обробки [3]. Завдяки високій мастильній здатності графіт знаходить широке застосування для виготовлення змащень, використовуваних у вузлах тертя машин [3, 8, 28, 69, 79], а також при гарячій обробці металів тиском [3]. В якості компонента твердого змащення графіт застосовується при обробці деталей деформуючим протягуванням [29, 64, 67]. По даним авторів робіт [29, 64] тверді технологічні змащення, що містять графіт або дисульфід молібдену, мають більше високу несучу здатність і можуть витримувати, не руйнуючись, більші контактні тиски, чим рідкі технологічні змащення (сульфофрезол, 5%-я емульсія та інші). Графіт використовується також як наповнювач для виготовлення графітизованих сталей, вуглепластів, текстолітів і інших полімерних матеріалів деталей, що йдуть на виготовлення вузлів тертя [3, 5, 11, 28].

Велика питома вага серед конструкційних матеріалів, застосовуваних для виготовлення вузлів тертя, займають графітовмісні чавуни [3, 5, 11, 28]. Згідно даним роботи [3] фрикційна характеристика чавуну, незалежно від кількості графітних включень, завжди вища, ніж у сплавів на основі заліза, що не містить графіт. При терті графіт розмазується по поверхні чавуну та утворює захисну плівку, що охороняє тертьові поверхні від схоплювання. У цьому випадку чавун розглядається як матеріал, що самостійно змащується, тому що об'єм чавуну служить безпосереднім джерелом змащення і проблема відновлення мастильної плівки після її стирання вирішується автоматично.

1.3 Змашування та охолодження при протягуванні

У процесі деформуючого протягування виникає велика кількість тепла як у результаті пластичної деформації (стиску) шару металу, що деформується (приблизно 75% усього тепла), так і в результаті тертя між поверхнею, що оброблюється та передньою поверхнею деформуючого елемента (приблизно 25%). Тертя та нагрівання викликають зношування деформуючих елементів протяжки. Для зменшення зношування інструменту застосовують мастильно-охолоджувальні рідини, які зменшують тертя (змашувальна дія рідини) і знижують температуру в зоні обробки (охолоджуюча дія).

Правильний вибір охолоджувальної рідини і її використання дозволяють підвищити стійкість протяжки, поліпшити чистоту поверхні виробу, зменшити зусилля протягування, одержати зовнішній розмір протягнутого профілю виробу. Як мастильно-охолоджувальні рідини найбільше широко застосовуються:

- масла мінеральні з різними присадками, що зменшують зусилля протягування (сірка, хлор, мила жирних і нафтових кислот, фосфор і ін.);
- водно-масляні емульсії різного складу й концентрації.

Склад мастильно-охолоджуючих рідин, що рекомендуються, наведені в табл. 1.1

Рослинні масла та тваринні жири дають високу чистоту поверхні, але рідко застосовуються внаслідок неекономічності.

Для протягування вуглецевих і легированих сталей використовують емульсії, що містять 20-30% товарних емульсолов нефтеторга та 70-80% кип'яченої води. При необхідності знизити зусилля протягування застосовують сульфифрезол або суміш сульфифрезолу із 10-40% рослинного масла, залежно від вимог до чистоти поверхні.

Таблиця 1.1

Рекомендований склад мастильно-охолоджувальних рідин

Оброблюваний матеріал	Види протягування		
	звичайне протягування	протягування з підвищеним вимогою до чистоти поверхні	протягування зі зняттям товстих зрізів
Вуглецева (0,3% С) і низьколегована сталь	Б, В, Г, И, П	Л, Г, К, Л	Г, К
Середньовуглецева та легована сталь (HB 180-240)	Б, Г, И, К, Л	Е, К, Л	Г
Високовуглецева та легована сталь (HB 240, $\sigma_B=80$ кГ/мм ²)	А, Г, Е, П, К	Г, Е, Л, К	Г
Нержавіюча сталь	А, Г, Е, П, К	Г, Е, Л, К	Г
Чавунне лиття, ковкий чавун	БО, И, А, П	БО, И, К	А, БО, П
Алюміній	Т, Р, БО	Т, Р	-
Латунь, бронза, мідь	БО, И, К	БО, К, Л	-

Позначення: А - 10%-на емульсія; Б -15%-на емульсія; В -20%-на емульсія; Г-сульфозфрезол; Е - осернене мінеральне (веретенне) мастило; І - Суміш: 8% касторового мастила, 25% емульсола, 0,5% кальцинованої соди, 66,5% води; К - суміш: 15% касторового масла, 30% емульсола, 0,5 % кальцинованої соди, 54,5% води; Л - суміш 30% касторового мастила, 30% емульсола, 0,5% кальцинованої соди, 39,5% води; Р - суміш авіаційного масла та гасу 1:1; БО - без змащувально-охолоджувальної рідини.

Застосування 10-20%-ний емульсії з добавкою 4% рідкого мила, а також алізарина емульсія дають високу чистоту поверхні. При високих вимогах до чистоти поверхні при протягуванні високовуглецевих і легованих сталей застосовують наступні мастильно-охолоджувальні суміші: від 8 до 30% касторового мастила, від 25 до 30% емульсола, 0,2% кальцинованої соди, інше - вода. При протягуванні алюмінієвих сплавів застосовують легке мінеральне

мастило з добавкою 30% касторового мастила, а також гас і скипидар (для силуміну). Чавунне лиття, ковкий чавун, алюміній, латунь, бронзу, мідь можна протягувати без охолодження. Для охолодження при протягуванні сплаву «електрон» вживають 40%-ний розчин фтористого натрію. Додавання до мастильно-охолоджувальної рідини 3-5% олеїнової кислоти значно поліпшує чистоту поверхні.

Розмір протягнутого отвору виходить меншим під час охолодження емульсією та більшим при охолодженні мастилом.

При протягуванні отворів у чавуні з охолодженням емульсією діаметр оброблюваного отвору виходить меншим, ніж при роботі без охолодження.

Подача мастильно-охолоджувальної рідини повинна бути досить рясної (від 10 до 20 л/хв) залежно від величини поперечного перетину протяжок. Подавати рідину треба як у зону входу протяжки у виріб, так і в місці виходу для змиву стружки. При зовнішньому протягуванні подачу рідини доводять до 30-40 л/хв. Під час роботи круглими протяжками великого перетину застосовують кільцеві підводчики для рівномірної подачі рідини до робочих елементів. При протягуванні глибоких отворів рідина подається через осьовий канал у протяжці та радіальні канали до кожного деформуючого елемента.

1.4. Вплив основних параметрів процесу деформуючого протягування на точність форми оброблюваних виробів

Отримані у ході досліджень [77,78] результати дозволили оцінити зміну розмірів і форми деталі залежно від сумарної деформації, вихідної точності отвору, величини номінального натягу та геометрії деформуючих елементів.

Досліди, проведені на втулках із чавуну СЧ20, показали, що при протягуванні деталей з малою товщиною стінки ($d_0=35,5$ мм, $t_0=5$ та 10 мм) величина сумарної деформації, кут робочого конуса та номінальний натяг на деформуючий елемент практично не впливають на точність форми отвору як у поздовжніх, так і в поперечних перерізах. Доведено, що в процесі накопичення деформації можливе як зменшення, так і деяке збільшення погрішності форми отвору. Однак коливання погрішності не перевищує 0,02 мм. Збільшення в окремих випадках погрішності форми отвору, імовірно, пов'язане з точністю виготовлення самого деформуючого елемента, його установкою на оправці, а також способом базуванням деталі.

Однак, при деформуючому протягуванні втулок з більш значною товщиною стінки ($d_0=35,5$ мм, $t_0=20$ мм) зі збільшенням сумарної пластичної деформації у всіх випадках зміни величини номінального натягу на деформуючий елемент і кута робочого конуса деформуючого елемента спостерігається перекручування форми отвору та зовнішній циліндричний поверхні в осьовому перерізі – з'являється корсетність. При малому номінальному натягу на деформуючий елемент ($a=0,03...0,05$ мм) і куті робочого конуса $\alpha=2...4^\circ$) появу корсетності виявлено після перших трьох-чотирьох циклів протягування. Це явище негативно впливає на відповідність отриманих геометричних розмірів заданим по кресленню та потребує додаткової механічної обробки обох торців втулок.

Саме тому, вивчення залежності геометричних розмірів оброблюваного отвору та прилягаючих до нього поверхонь від геометрії робочого органу протяжного інструмента та режимів обробки для найбільш розповсюджених матеріалів (сірий чавун, сталь та латунь) є актуальним питанням й дотепер.

1.5 Висновки, мета та задачі роботи

Аналіз літературних джерел по темі дозволяє зробити наступні висновки:

- у джерелах наукової літератури дотепер недостатньо відомостей про реальну картину взаємодії між деформуючими елементами та оброблюваною поверхнею;

- найбільш придатним процесом для обробки круглого отвору деталі є деформуюче протягування з деформаціями в межах 0,05...0,1 мм, яке створює певний комплекс спадкових фізико-механічних та геометричних характеристик поверхні;

- за базовий інструмент для розробки деформуючого інструменту для обробки круглих отворів в межах даної кваліфікаційної випускної роботи доцільно вибрати найбільш досконалу серед відомих і достатньо вивчених конструкцій, а саме збірну протяжку. Вона придатна для обробки отворів діаметром 15...100 мм в конструкційних матеріалах (наприклад, латунях, сталях та чавунах) твердістю HB100...400.

На основі викладеного вище аналізу визначена мета роботи, яка полягає у вивченні умов роботи деформуючого протяжного інструменту за допомогою аналітичного методу кінцевих елементів та вдосконалення умов роботи протяжки за рахунок вибору оптимальних початкових параметрів (діаметральні розміри деталі (d_0/D_0), кут робочого конусу – α , товщину стінки деталі – t_0 , номінальний натяг на деформуючий елемент – a_0).

Для досягнення мети, що була поставлена, слід вирішити наступні задачі:

- вивчення процесів, що відбуваються під час взаємодії деформуючого елемента протяжки та оброблюваної поверхні за допомогою методу кінцевих елементів у програмному середовищі Deform 2D/3D;

- визначення методів та засобів обробки круглих отворів на основі процесу деформуючого протягування;
- розробка вдосконаленого методу моделювання процесу деформуючого протягування у деталях типу втулка;
- розробка рекомендацій для практичного створення технологічних процесів оригінального інструменту.

Таким чином після проведеного аналізу літературних джерел ми бачимо, що використання спеціального інструмента для деформуючого протягування круглих отворів може значно покращити якість обробленої поверхні та зменшити час та вартість обробки деталі. Це теж підтверджує доцільність широкого застосування способу деформуючого протягування замість обробки зенкеруванням, розточуванням або хонінгуванням.

Тому задача вивчення процесів, що відбуваються під час взаємодії деформуючого елемента протяжки та оброблюваної поверхні деталі за допомогою методу кінцевих елементів у програмному середовищі Deform 2D/3D, а також розробка рекомендації покращення інструмента для деформуючого протягування круглих отворів в деталях з латуні Л62, сталі 45 та сірого чавуну СЧ20 в умовах сучасного виробництва є актуальною і потребує досконалого вивчення і подальшого розв'язання.

2. Методика проведення досліджень та обробки результатів експериментів

2.1 Механіка взаємодії окремого деформуючого елемента та оброблюваної поверхні

Деформуюче протягування займає значне місце серед процесів обробки металів, які використовуються у сучасному машинобудуванні. Протягування успішно заміняє ряд інших видів механічної обробки, наприклад, таких як розточування, зенкерування, розгортання та гостріння. До переваг протягування перед іншими традиційними методами обробки відносяться висока продуктивність праці, точність розмірів та якість поверхні, що обробляється. Також слід відмітити надійність процесу, що пов'язане з високою стійкістю інструмента та простотою налагодження верстата і можливість виконання процесу робітниками з невисокою кваліфікацією. Деформуюче протягування широко використовується при обробці циліндричних отворів у деталях типу втулка. Його застосовують у заводах, які випускають запчастини та агрегати для автомобілів, мотоциклів, тракторів, літаків, обладнання для сільськогосподарського та криогенного машинобудування, а також підприємства, що випускають термопластавтомати. В той же час при виконанні операцій протягування пред'являються високі вимоги до якості протяжного інструмента та точності його розмірів. Тому ретельне конструювання протяжок, або їх вдосконалення і раціональна технологія їх виготовлення є найважливішими для успіху роботи.

Починаючи з середини 60-х років минулого сторіччя в провідних вітчизняних ВНЗ, а також в ІНМ ім. Бакуля (АН України) проводяться ґрунтовні дослідження процесу деформуючого протягування циліндричних отворів. У цих дослідженнях паралельно з рішенням ряду практичних завдань, висунутих сучасною промисловістю, проводиться ґрунтовне експериментальне і теоретичне вивчення властивостей процесу (контактної взаємодії інструмента з виробом), поверхонь контакту, контактних тисків, характеристик тертя,

контактних температур, позаконтактних зон деформування, напружено-здеформованого стану оброблюваного виробу, умов навантаження і напруженого стану деформуючих елементів, методів їх розрахунку на міцність, силових навантажень інструмента, верстата та виробу, характеристик якості обробленої поверхні.

Численні експериментальні дослідження процесу та теоретичні розробки дозволили вирішити ряд актуальних практичних питань, наприклад створення зносостійких, твердих сплавів деформуючих елементів, що мають високу несучу здатність і надійність; значне зниження енергетичних витрат на процес деформуючого протягування та силових навантажень на інструмент; вибір технологічних рідких або твердих змащень і факторів режиму протягування; керування точністю і якістю оброблених виробів і ін. Використовуваний у цьому процесі інструмент – твердосплавні збірні деформуючі протяжки та прошивки є простим за конструкцією і надійним в експлуатації.

Деформуюча частина протяжки виправляє некруглість отвору в оброблюваній деталі, зводячи її до десятих або сотих часток міліметра, і тим самим дозволяє кілька разів знизити за потреби, припуск на наступну обробку різанням, що відповідно зменшує відходи металу в стружку. Для того щоб повною мірою використовувати переваги деформуючого протягування, необхідно експериментально дослідити процес одиночного пластичного деформування вісесиметричних деталей типу втулок, включаючи наступні питання: напружено-здеформований стан інструмента та виробу; механіка взаємодії інструмента та виробу; контактні процеси; зони деформацій; оптимізація розмірів і форми деформуючого тіла та конструкції інструмента; силові параметри та енергетичні витрати на виконання даного процесу.

Існує велика кількість опублікованих робіт з роздачі вісесиметричних заготовок типу втулок, у яких вивчалися питання силових навантажень, деформацій, точності, якості оброблених поверхонь. Однак у цих роботах закінчені рішення мають лише питання роздачі нескінченної труби рівномірно розподіленим внутрішнім тиском [4,19,22,35,48,52], причому з використанням цілого ряду допущень (плоский напружений стан, відсутність осевого

навантаження, ідеально пластичний матеріал). Однак процес деформування при роздачі такої вісесиметричної заготовки протягуванням через її отвір одного або декількох деформуючих елементів дуже складний. У вузькій кільцевій зоні між деформуючим елементом тіла та заготовки, що виникає в процесі деформування по довжині заготовки виникають контактні тиски, які в залежності від умов деформування можуть збільшуватися на два порядки і у багатьох випадках досягати декількох ГПа (сотень кілограмів на квадратний міліметр). Виникаюче при цьому тертя викликає появу на обробленій поверхні істотного по товщині шару текстури, ступінь деформації в якому може досягати багатьох десятків і навіть декількох сотень відсотків [20,22,24,30 та ін.], у результаті чого розподіл ступеня деформації, зміцнення і напруг по товщині стінки деталі виявляється складним, нерівномірним, що не допускає (у силу значної нерівномірності) усереднення, що не піддається теоретичному опису.

Зона контакту деформуючого елемента з виробом доповнюється зонами позаконтактної деформації виробу, одна із яких розташована спереду, визначає ширину зони контакту і змінює неї при зміні умов деформування, інша, розташована позаду, позбавляє оброблену поверхню контакту із циліндром деформуючого елемента, а також впливає на остаточні розміри обробленого виробу. Деформація у позаконтактних зонах має пружно-пластичний характер, причому зони її розповсюдження значно відрізняються в залежності від оброблюваного матеріалу. Деформація в контактній зоні супроводжується адгезійними явищами, які можуть змінюватися від незначних (при застосуванні твердого або напіврідкого змащення) до інтенсивних, що приводять до схоплювання поверхонь виробу та інструмента. Зміни адгезійних явищ і контактних тисків впливають на процес тертя і коефіцієнти тертя, визначаючи значні їхні зміни залежно від параметрів процесу деформуючого протягування. Складність процесу не дозволяє в цей час повністю розробити універсальну математичну модель, яка давала б можливість із задовільною точністю розрахувати його характеристики деформації – сили, напруги, контактні тиски у зоні взаємодії робочої поверхні інструмента та оброблюваної поверхні і т. ін.

Робота деформуючими протяжками в більшості випадків проводиться на звичайних протяжних верстатах і вертикальних гідравлічних пресах. Протяжні верстати, що випускаються сучасною промисловістю, забезпечують швидкість протягування в межах $0,016 \dots 0,25 \text{ м/хв}^{-1}$. Раніше [50,55,58] було встановлено, що зміна швидкості руху інструмента в зазначених межах не робить помітного впливу на силу протягування. Це підтверджують дослідження Ю.Г. Шнейдера при швидкостях протягування до $0,5 \text{ м/хв}^{-1}$. Останнім часом деформуюче протягування стали використовувати при обробці отворів у виробах довжиною до 5 м, здійснюючи процес на волочильних станах при швидкостях до $0,5 \text{ м/хв}^{-1}$. Тому більшість експериментів по вивченню процесу деформуючого протягування проводилося при швидкості $0,032\text{-}0,048 \text{ м/хв}^{-1}$.

Застосування у збірних протяжках одинарного або декількох робочих деформуючих елементів не виключає такі погрішності інструмента, як перекіс окремих кілець щодо осі, пов'язаний з відхиленням від перпендикулярності торців цих кілець, взаємний зсув окремих кілець у радіальному напрямку. Крім того, при різьбовому кріпленні робочої частини, що деформує, можливий перекіс її через перекіс опорних торців нарізного сполучення. Це не тільки знижує точність оброблених отворів, але й може привести до руйнування твердого сплаву. У зв'язку із цим усе більше широке застосування в промисловості знаходять протяжки із деформуючою частиною у вигляді монолітного багатоелементного твердосплавного блоку із замковим кріпленням робочої частини.

Процес деформуючого протягування в більшості випадків здійснюється за схемою стиску, до якої насамперед ми і звернемося при розробці методики віртуального моделювання методом кінцевих елементів у відповідних спеціалізованих програмних пакетах.

При деформуючому протягуванні (прошиванні) отворів у деталях типу втулок і труб з різної товщиною стінки спостерігається зміна всіх розмірів заготовки: збільшення діаметрів отвору та зовнішнього діаметру втулки, окрім цього можливе так зване «осадження» деталі. Ці зміни залежать від розмірів

заготовки, її матеріалу, умов взаємодії інструмента з виробом, геометричних параметрів деформуючих елементів, ступеня деформації, здійснюваної при протягуванні, схеми протягування (стиску або розтягу). Зміна розмірів необхідно знати при виборі заготовки. Для того щоб призначити розміри заготівлі, потрібно вміти визначити зміну товщини стінки, зовнішнього діаметра $D - D_0$, довжини L/L_0 або L_0/L , де відповідно, D_0 , L_0 - товщина стінки, зовнішній діаметр і довжина до протягування.

2.2 Дослідження методом кінцевих елементів

Одним з найбільш широко застосовуваних на практиці сучасних методів розрахунку на міцність деталей та конструкцій є метод кінцевих елементів (надалі - МКЕ). При використанні цього методу деталь або конструкція у зборі розбивається на певну велику кількість елементів простої геометричної форми (відрізки ліній, трикутники, тетраедри, чотирикутники, куби і т. ін.), які з'єднані між собою в вузлових точках. Для цих елементів, названих кінцевими, спеціально розробленими аналітичними методами знаходять точні або наближені рішення рівнянь, що описують їх напружено-деформований стан (надалі - НДС) в певний відрізок часу або так званий «крок». На основі цих рішень складаються рівняння, що описують НДС всієї деталі або конструкції. Як правило, це є системи алгебраїчних або диференціальних рівнянь другого порядку. Для вирішення рівнянь МКЕ, як і для їх складання, використовуються потужні обчислювальні машини. На даний час фахівцями розроблено низку програм різного рівня для ЕОМ, що реалізують МКЕ. До них відносяться широко відомі програми SolidWorks, DEFORM, MASTRAN, ANSYS, MARC, DINA, ЛІРА, Прінс і ін. Всі ці програми добре задокументовані і допускають самостійне використання їх широким колом фахівців. Перераховані вище якості, а саме, доступність програм МКЕ і фізична наочність отриманих результатів забезпечили популярність МКЕ. Сучасний інженер повинен бути знайомий з основами МКЕ і вміти ним впевнено користуватися.

Залежно від того, які невідомі параметри є основними, МКЕ реалізується в формі методу переміщень, методу сил або методу заміщення. Найбільш

популярним серед розробників програм МКЕ є метод переміщень, що дозволяє отримати більш прості і універсальні алгоритми. В якості основних невідомих в методі переміщень розглядаються переміщення вузлових точок розрахункової теми. Всі інші характеристики НДС (переміщення внутрішніх кінцевих елементів, деформації, напруження) знаходяться в залежності від вузлових переміщень. Основними етапами розрахунку будь-якої інструкції методом переміщень є:

1. Ідеалізація конструкції або вибір розрахункової схеми.
2. Обчислення матриць жорсткості (МЖ) окремих елементів в будь-якій зручній для цих цілей місцевій системі координат.
3. Перетворення МЖ елементів в загальну для всієї конструкції систему координат.
4. Формування з використанням МЖ елементів системи рівнянь руху або рівноваги конструкції

$$L(u_i, v_i, w_i, F) = 0, i=1, 2, \dots, n, (2.1)$$

де L - деякий оператор, в загальному випадку, диференціальний; u_i, v_i, w_i - переміщення вузлових точок в напрямку координатних осей; n - число вузлів; F - параметр навантаження.

5. Рішення системи рівнянь (2.1) щодо вузлових переміщень.
6. Обчислення деформацій елементів по відомих вузловим переміщенням і обчислення напружень в елементах по відомих деформаціям.

2.3 Методика побудови моделей та початкових параметрів для розрахунку

Для наших досліджень в якості досліджуваних матеріалів було обрано насамперед чавун марки СЧ20, а також для порівняння вуглецеву конструкційну сталь 45, а також латунь Л62, як такі, що широко використовується у сучасному машинобудуванні для виготовлення

відповідальних деталей. Хімічний склад та твердість оброблюваних матеріалів наведено у таблиці 2.1; 2.2; 2.3 відповідно.

Таблиця 2.1

Хімічний склад в % та твердість оброблюваного матеріалу

Оброблюваний матеріал	C	Cr	Si	Mn	Ni	P	S	HB, ГПа
Сталь 45	0,45	0,2	0,25	0,65	0,25	0,035	0,04	2,29

Таблиця 2.2

Оброблюваний матеріал	Fe	P	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Домішки
Латунь Л62	0,2	0,01	65	0,07	37,5	0,005	0,002	0,5

Таблиця 2.3

Оброблюваний матеріал	C	Si	S	Mn	P	HB, ГПа
Чавун СЧ20	3,3	2,4	0,15	0,7	0,2	10

Вибір геометричних розмірів та форми поверхні деталей проводився з оглядом найбільш поширених їх видів у промисловості. Тому досліди проводилися на деталях типу втулка із діаметром (початковим) отвору $d_0=35$ мм, довжиною втулки $L=100$ мм і товщиною її стінки $t_0=10$ або 20 мм.

Дослідження процесу деформуючого протягування проводилось за допомогою програми Deform 2D/3D v.10.0.

Межі експериментальних досліджень: характеристики та режими протягування: $V=0,05$ м/с; натяг на сторону $a_{ном}=0,1$ мм.

Параметри та характеристики інструменту: деформуюча (робоча) частина – твёрдосплавний одиничний елемент із сплаву ВК8, $\alpha=\alpha_1=2,4,8,12^\circ$; спосіб його закріплення на оправці протяжки – посадка із зазором 0,01 мм .

2.4 Методика дослідження впливу параметрів деформуючого протягування на розміри обробленого внутрішнього отвору методом кінцевих елементів

Для проектування нових технологій, інструмента, устаткування або оцінки можливості використання того, що вже є у наявності, необхідно знати ряд взаємних залежностей між геометрією інструмента, величинами контактного тиску та коефіцієнту тертя, діючими силами та параметрами зміни форми деталі. Вже відомі численні теоретичні дослідження процесів деформуючого протягування деталей типу втулка ґрунтуються на використанні традиційних аналітичних методів розрахунку деформації твердого тіла, вони виконані для конкретних розмірів деталей і тому зазвичай не є придатними для будь якого випадку. Деяка обмеженість застосування відомих до теперішнього часу рішень викликана, у тому числі, великою кількістю припущень, що вводяться для конкретної задачі, та які додатково знижують точність одержуваних розрахункових величин. Крім того, відсутність симетрії у випадку протягування вісесиметричних деталей з використанням відомих рішень не дозволяє одержати обґрунтовані аналітичні вирази для знаходження енергосилових параметрів процесу протягування, а також досліджувати розподіл навантажень, які діють на деформуючий елемент протяжки. Застосування сучасних комп'ютерних програм, які використовують обчислення методом кінцевих елементів при віртуальному моделюванні процесів обробки отворів у деталях деформуючим протягуванням дає можливість ефективно визначати зміни у пружно-деформованому стані металу та різноманітні енергосилові параметри при його обробці на всіх етапах розрахунку. Одним з таких відомих програмних продуктів є продукт DEFORM, який був розроблений та удосконалений компанією ScientificForming Technologies Corporation (SFTC) з кінця вісімдесятих років XX сторіччя [40].

Даний продукт позиціонується як універсальний та такий, що здатний розраховувати численні процеси обробки металів деформуванням: листову і сортову прокатку, волочіння, пресування, кування, штампування, операції трубного виробництва та поверхневого пластичного деформування (або вигладжування), використовуючи для розрахунку метод кінцевих елементів.

Поширення практичних застосувань методу кінцевих елементів є наслідком розвитку даної технології з середини п'ятдесятих років XX ст. [2,40]

МКЕ по суті являє собою апроксимацію суцільного середовища з дуже великим числом ступенів свободи сукупність під-областей (або груп елементів), що мають певне кінцеве число ступенів свободи. Потім між цими елементами якимось чином встановлюється взаємозв'язок. Найчастіше елементами є трикутники або квадрати в плоскому випадку і тетраедри або кубічні елементи в просторовому. Усередині кожного елемента задаються деякі функції форми, що дозволяють визначити переміщення всередині елемента по переміщенням в вузлах, тобто в місцях стиків кінцевих елементів [2,40].

Також відзначимо, що в нашому випадку метод кінцевих елементів безпосередньо застосовується до вісесиметричних деталей, що складаються з великої кількості кінцевих елементів, поведінка кожного з яких описується своїм диференціальним рівнянням, в порівнянні з іншими розрахунковими методами [40].

Програма DEFORM-3D має досить зручне модульне компонування, до якого входять три основних модуля: *Preprocessing* для підготовки вихідних даних, зовнішній вигляд якого показано на рис. 2.1, *Solver* або рішення, та *Postprocessing* для обробки та виведення результатів моделювання на екран або у вигляді таблиць та графіків.

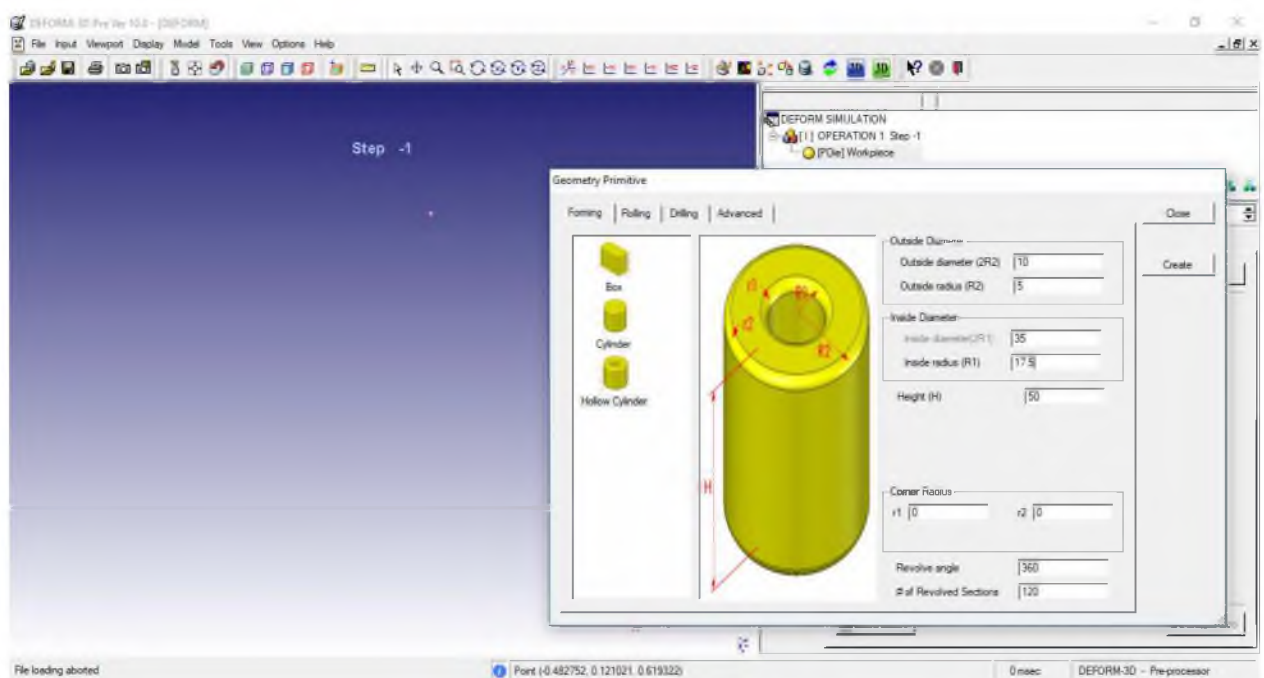


Рисунок 2.1 - Вікно підготовки вихідних даних програми DEFORM-
Preprocessing

Основними розрахунковими модулями DEFORM є:

- *DEFORM-3D* - який призначений для моделювання просторових 3D-процесів обробки металів тиском;
- DEFORM-2D - що призначений для моделювання плоских 2D-процесів обробки металів тиском (осесиметричні і плоскі задачі).
- DEFORM-F3 - він призначений саме для спеціального моделювання тривимірних процесів обробки металів тиском. Є так званою «легкою» версією DEFORM 3D.
- DEFORM-F2 – відповідно модуль, що призначений для моделювання плоских процесів обробки металів тиском (осесиметричні і плоскі задачі), «легка» версія DEFORM 2D.
- DEFORM HT3 і DEFORM HT2 – дані модулі призначені для моделювання відповідно 3D- і 2D- (осесиметричні і плоскі задачі) процесів термічної обробки моделей деталей або заготовок.
- DEFORM-TOOLS – цей модуль призначений для створення високоякісної анімацій і файлів презентацій.

Додатковими модулями DEFORM:

- RingRolling 3D, який призначений для моделювання характерних процесів розкочування кілець. Може працювати як окремий модуль, так і як додаток до основного модуля DEFORM-3D. Його алгоритми рішення оптимізовані саме під процес розкочування кілець.
- Cogging 3D є додатком до модуля DEFORM-3D і служить для моделювання процесів протягування на операціях з молотом. Цей модуль включає набір стандартної геометрії заготовок і маніпулятор для протягування.
- ShapeRolling 3D – це додаток до модуля DEFORM-3D і використовується для моделювання процесів прокатки, де треба запобігти утворення складок в матеріалі, розтяжок або вигинів і т.ін.

- InversePropertyExtraction (2D або 3D) є додатком до модулів DEFORM-3D або DEFORM-2D для визначення коефіцієнту теплопередачі на кордонах заготовки.
- SimulationQueue – цей модуль дозволяє реалізувати пакетний режим обробки декількох завдань одночасно на потужних робочих станціях.
- Microstructure 3D і Microstructure 2D – ці модулі є додатками до DEFORM-3D і DEFORM-2D відповідно й використовуються для моделювання тривимірних процесів термічної обробки.
- Machining 3D і Machining 2D є відповідно додатками до модулів DEFORM-3D і DEFORM-2D для моделювання процесів механічної обробки.

Після успішного рішення завдання отримані результати розрахунку виводяться за допомогою спеціального модуля виводу у вигляді наочних зображень, діаграм, епюр, графіків або табличних даних у форматі MS Excel.

Згідно поставленої теми дослідження нами були проведені моделювання процесу холодного деформуючого протягування круглих отворів у деталях типу втулка. Відповідно завдання було розглянуто конкретний випадок взаємодії одиничного деформуючого елемента та оброблюваної поверхні деталі типу втулка при монотонному навантаженні інструмента.

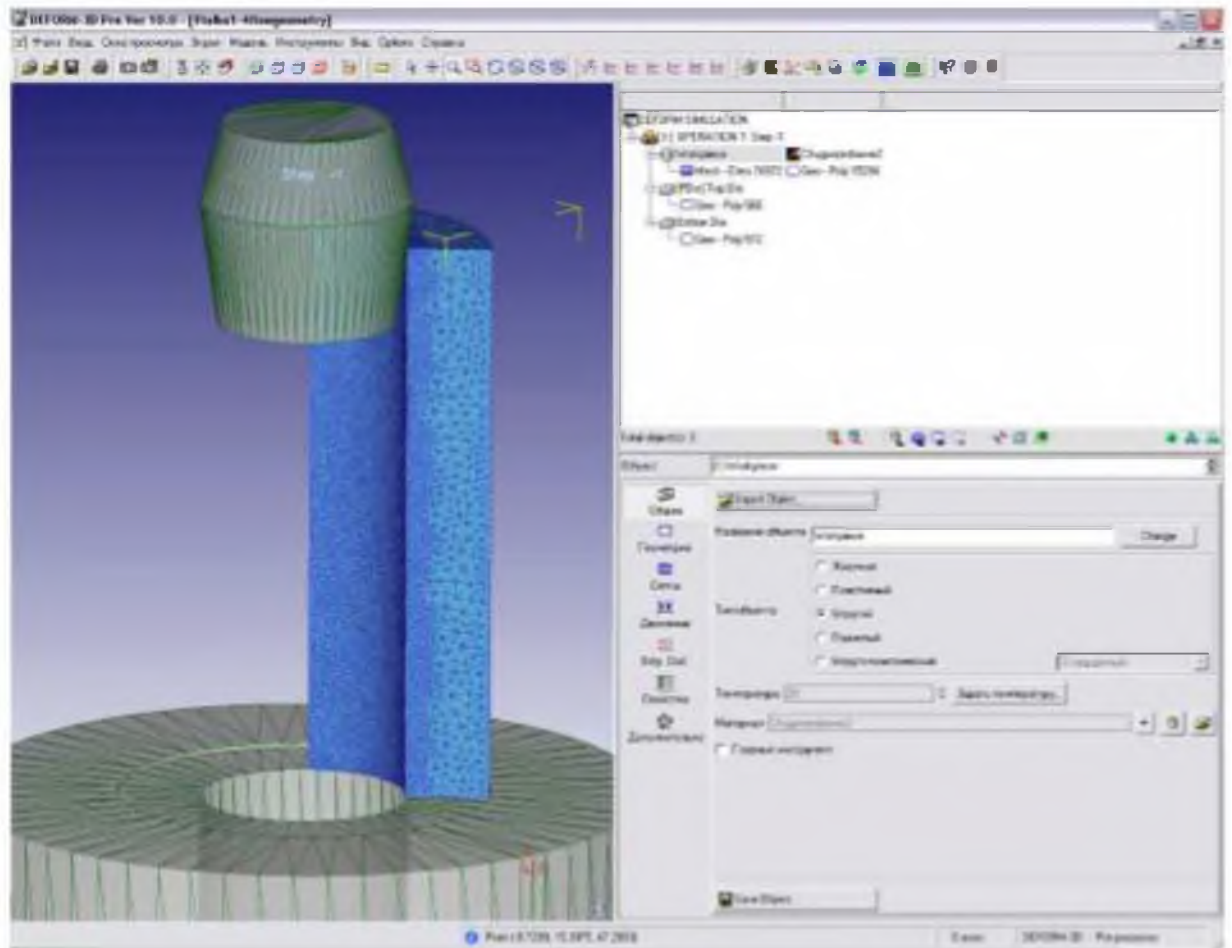


Рисунок 2.2 - Загальний вигляд вікна препроцесору програми DEFORM–
2D/ 3D

Для вивчення взаємодії інструменту та оброблюваної поверхні нами було розроблено та застосовано методику, сутність якої полягає у наступному. Дослідний зразок у формі циліндричної втулки з круглим отвором (див. рис. 2.3б) вільно встановлюється на опорній плиті 3 (рис. 2.3в), що жорстко закріплена за допомогою болтів. Зверху дослідного зразка на невеликий відстані на початковій позиції знаходиться деформуючий елемент (рис. 2.3а), геометричні розміри якого забезпечують потрібний натяг на сторону та кут робочого конуса.

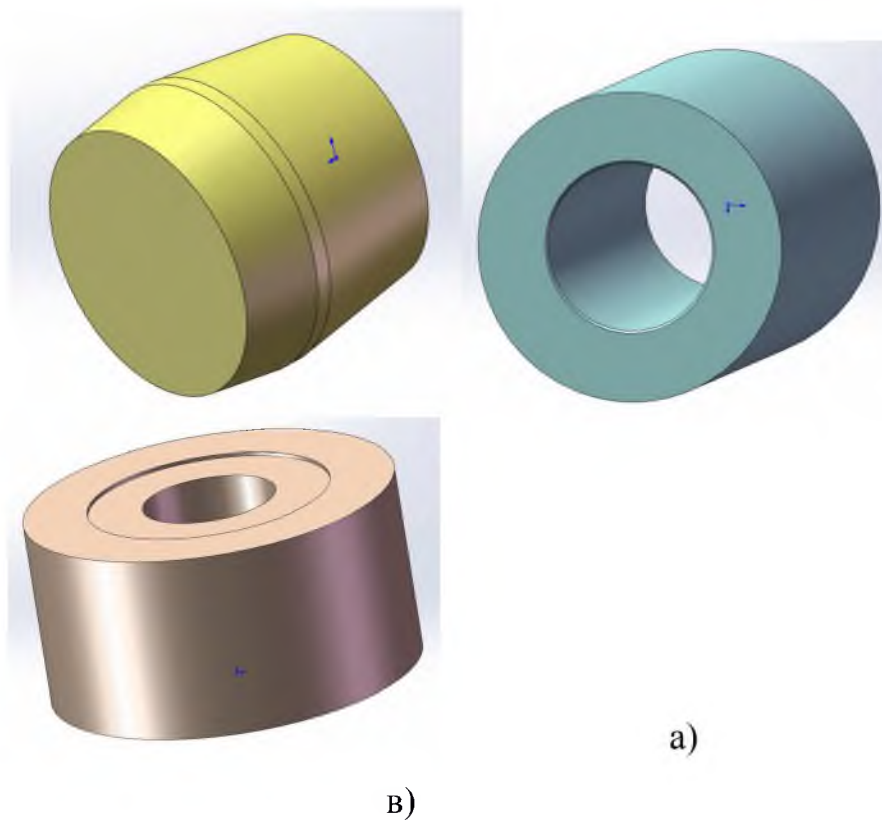


Рисунок 2.3 - а) деформуючий елемент; б) дослідний зразок; в) опора

Схему обробки зразків наведено на рис. 2.4

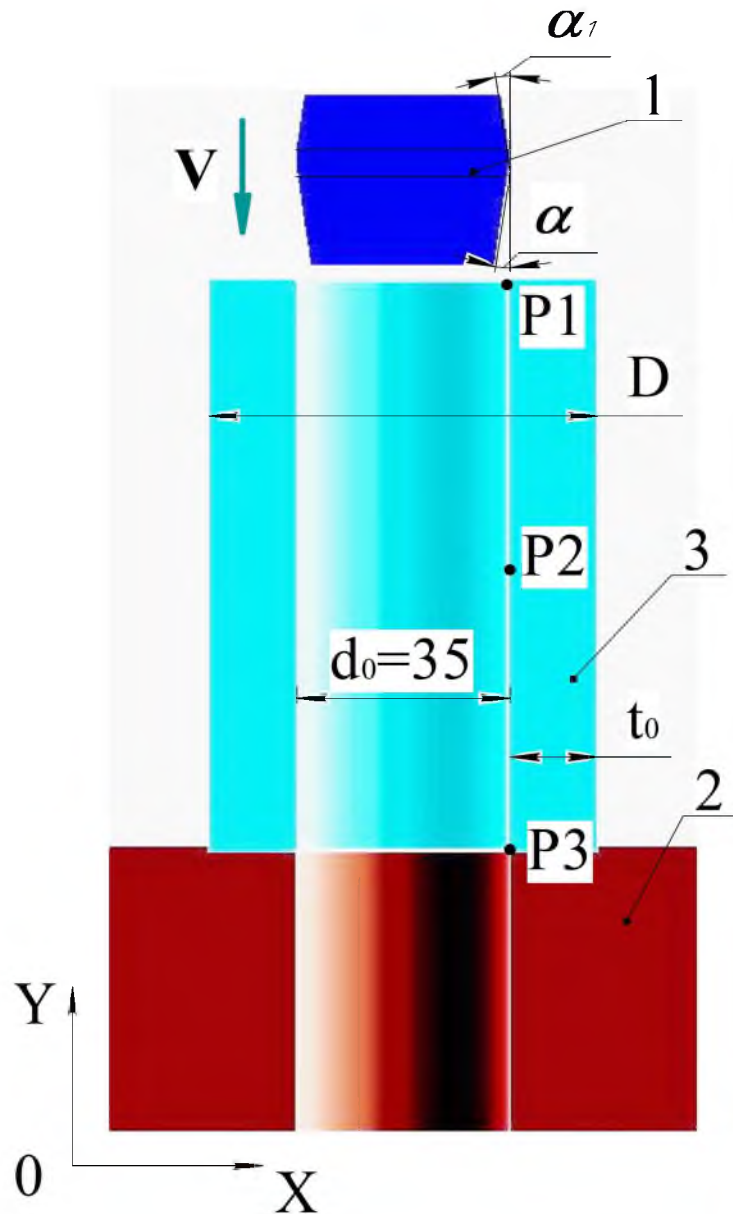


Рисунок 2.4 - Схема обробки

Робочий рух деформуючого інструмента задається його рівномірним повздовжнім переміщенням з заданим навантаженням та швидкістю скрізь отвір оброблюваної втулки, яка жорстко спирається на нерухому основу.

Кути робочого конуса деформуючого елемента показано на рис. 2.5

Розглянуто різні варіанти взаємодії деформуючого елемента та обробленої поверхні, залежності від товщини стінки втулки, на деформуючий елемент, матеріалу деталі та кута робочого конуса деформуючого елемента. У процесі теоретичного дослідження як постійні параметри були використані: довжина втулки ($l=100$ мм) та діаметр оброблюваного отвору ($d_0=35$ мм), а також номінальний натяг на деформуючий елемент ($a=0,2$ мм);

змінними параметрами є:

- матеріал втулки (відповідно, чавун СЧ20, сталь 45, латунь Л62);
- товщина стінки втулки ($t=10$ та 20 мм);
- величина кута робочого конуса деформуючого елемента ($\alpha=2, 4, 8, 12^\circ$)

Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона для досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 2.4.

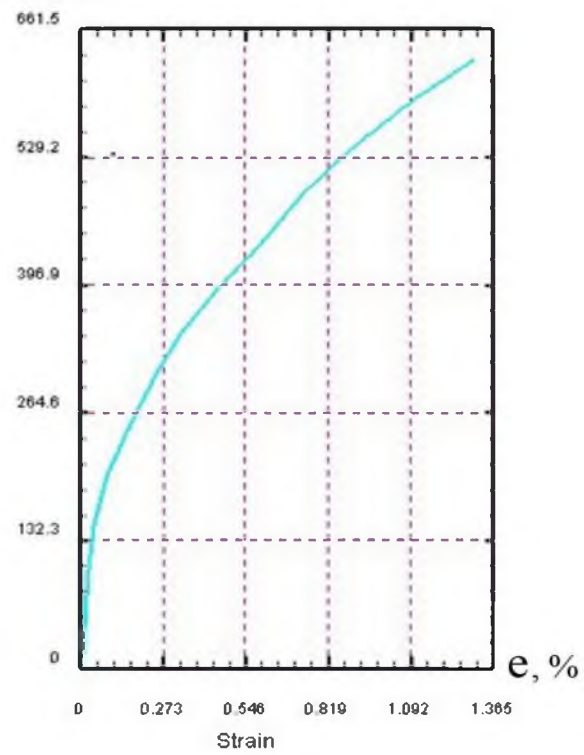
Таблиця 2.4

Матеріал	Модуль пружності Е, МПа	Коефіцієнт Пуассона
Латунь Л62	$1,04 \times 10^5$	0,40
Сталь 45	$2,07 \times 10^5$	0,30
Чавун СЧ20	$1,60 \times 10^5$	0,27

Криві зміцнення матеріалів [95] показано на рисунку 2.5

σ , МПа

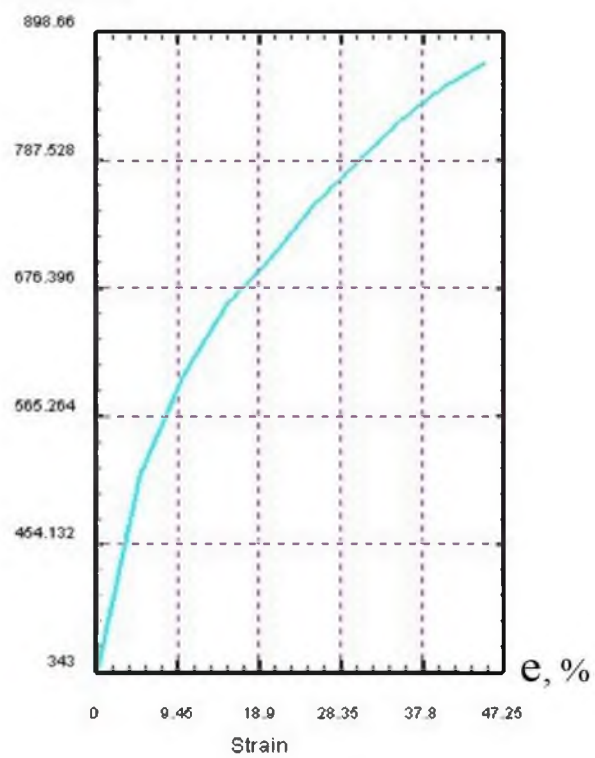
Flow Stress



a)

σ , МПа

Flow Stress



b)

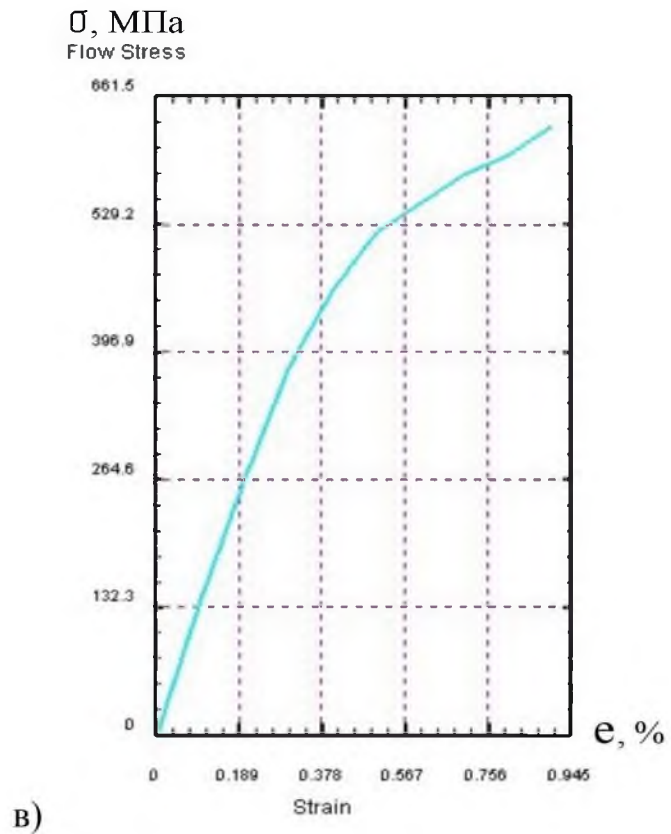


Рисунок 2.5 - Криві зміцнення: а) - латунь Л62; б) - сталь 45; в) - чавун СЧ20

Обробка проводиться одним деформуючим елементом. Об'єктом дослідження є переміщення по осі ОХ характерних точок Р1, Р2 та Р3, що розташовані на грані між оброблюваною поверхнею втулки та обома торцями деталі.

3. Моделювання процесу деформуючого протягування та розробка рекомендацій до вдосконалення конструкції збірних протяжок для обробки круглих отворів

3.1 Результати моделювання та графіки залежності розмірів обробленого отвору в характерних точках від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки

Згідно методики, що описана у розділі 2, нами було проведено ряд досліджень, в яких моделювалась обробка отвору у чавунній, сталевій, та латунній втулках одиничним деформуючим елементом при різних кутах його робочого конуса та різних товщинах стінки деталі. При цьому особлива увага приділялось деформації стінок втулки у характерних точках P1, P2, P3 які характеризують зміну геометричних розмірів деталі та розвиток деформацій у зоні контакту інструмента з деталлю, а після закінчення обробки втулки показує реальні геометричні розміри отвору у даних точках.

Розглянемо загальну картину взаємодії деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею деталі на основі візуалізації напружень та деформацій, отриманих в результаті моделювання програми DEFORM. Слід відмітити, що внаслідок тільки часткової локалізації цього програмного продукту деякі терміни позначаються англійською мовою, а саме:

Damage – руйнування;

Strain-effective – ефективне деформування (або накопичена ступінь деформування) в мм/мм;

Strain rate-effective – швидкість ефективного деформування;

Stress effective – ефективне (нормальне) напруження (або інтенсивність напруження) в МПа;

Stress max principal – основні максимальні напруження (МПа);

Velocity (total velocity) – швидкість (загальна швидкість) в мм/сек.;

Flow stress – напруження пластичної течії (або опір матеріалу його деформуванню);

Stroke – хід;

Step – крок розрахунку.

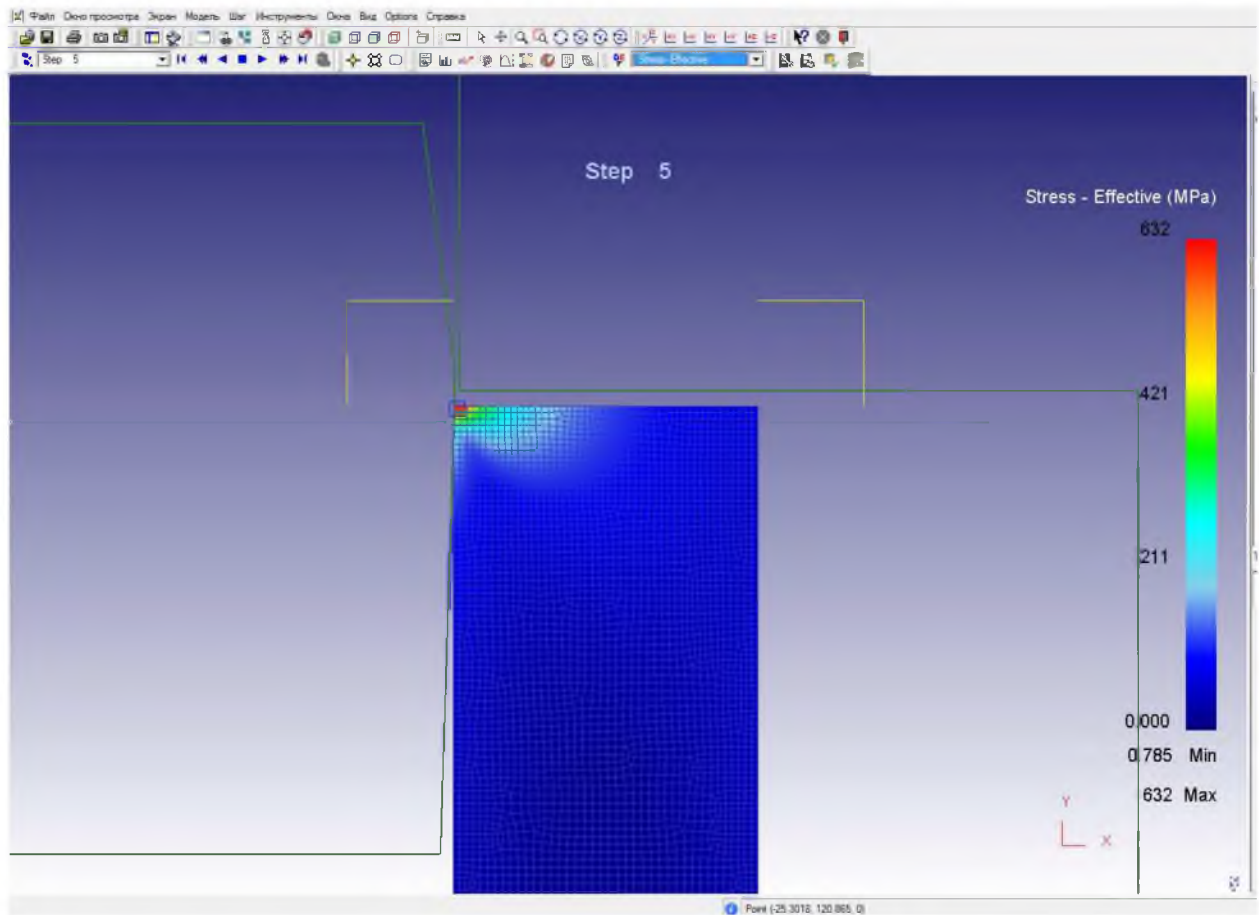


Рисунок 3.1 – Початок моделювання.

Початок контакту ДЕ з оброблюваною поверхнею втулки по лінії верхнього торцю показано на рис. 3.1. Саме в цей момент отвір втулки остаточно базується відносно робочого конуса ДЕ й вона притискується до нижньої опори. Дуже важливо, щоб обидва торці втулки були якомога більш перпендикулярні до її поздовжньої вісі, тому що при такій схемі обробки протягуванням/прошиванням саме вони відповідають за точність базування деталі.

На рис. 3.2 показано момент взаємодії оброблюваної поверхні з так званою стрічкою ДЕ, яка відповідає за формування кінцевого розміру отвору втулки та де зазвичай спостерігаються найбільші навантаження на робочий орган інструмента.

На рис. 3.3 показано зону верхньої кромки між торцем та отвором втулки в збільшеному вигляді. Можна побачити, що діаметральний розмір отвору в

зоні кромки після проходження ДЕ став дещо більше (в залежності від оброблюваного матеріалу ця величина складає 0,05-0,15 мм), ніж заданий, а верхній торець зазнав так званого «випучення». Саме цей ефект має назву «бочкоподібності» та є небажаним наслідком обробки в плані її точності.

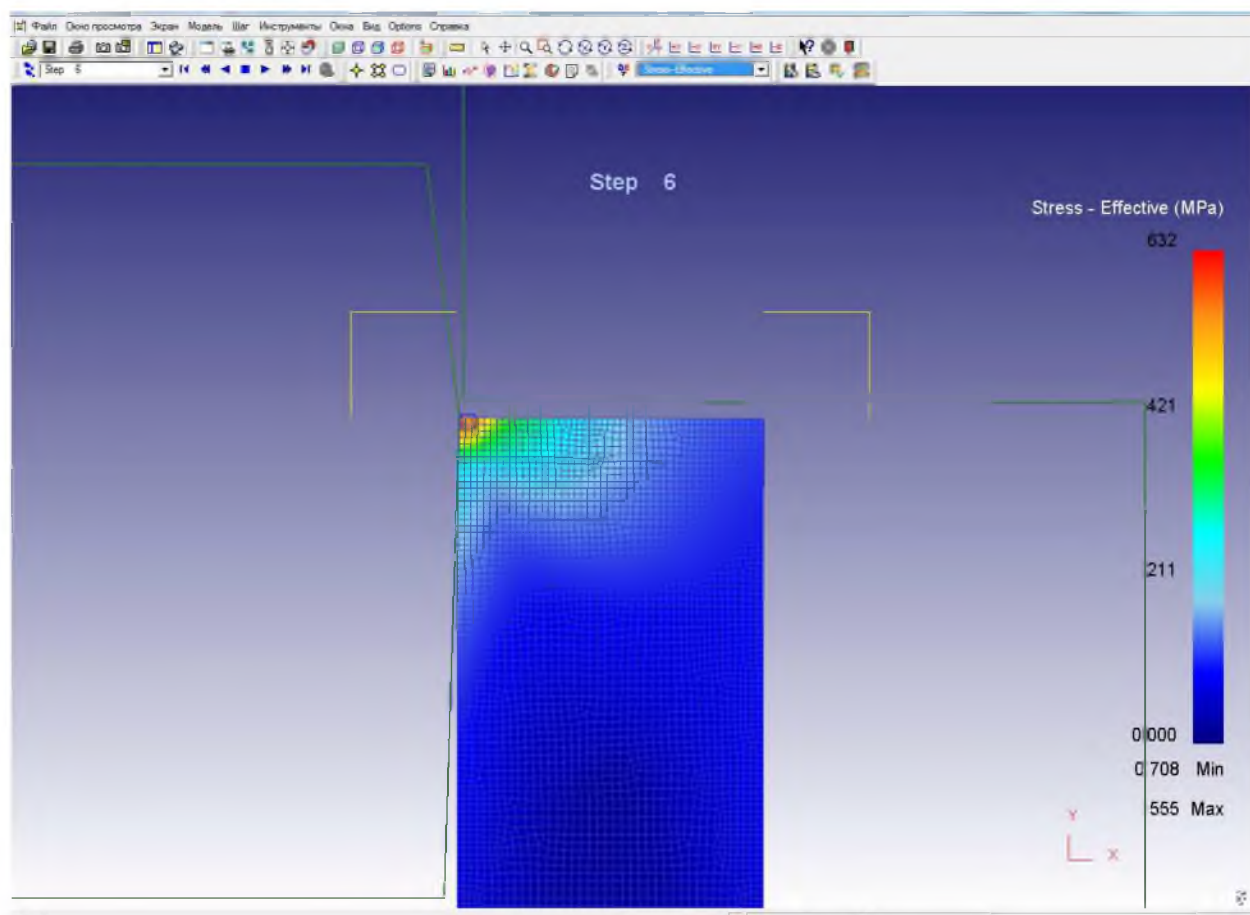


Рисунок 3.2 – Процес розбивки оброблюваного отвору в зоні верхнього торцю

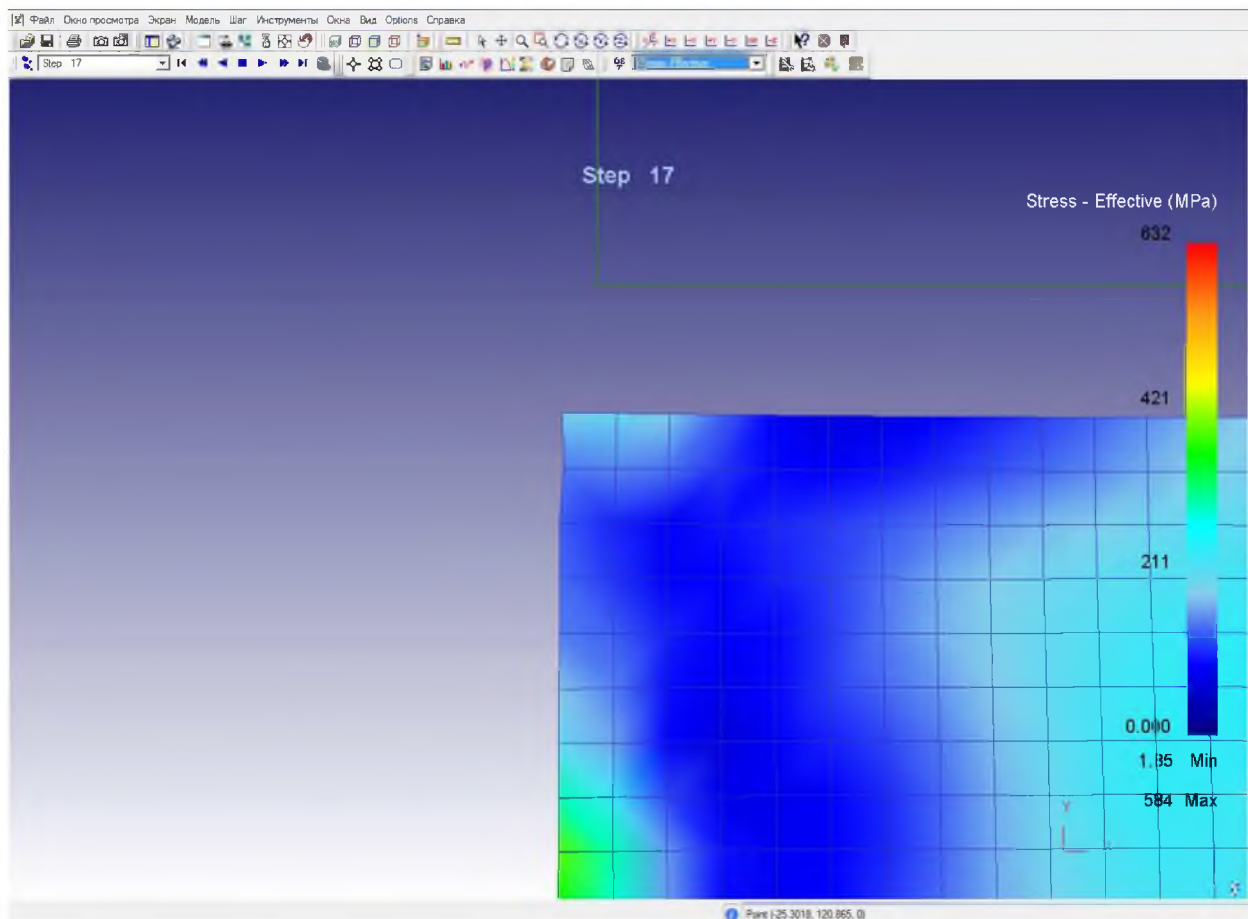


Рисунок 3.3 – Зона верхньої кромки між торцем та отвором втулки

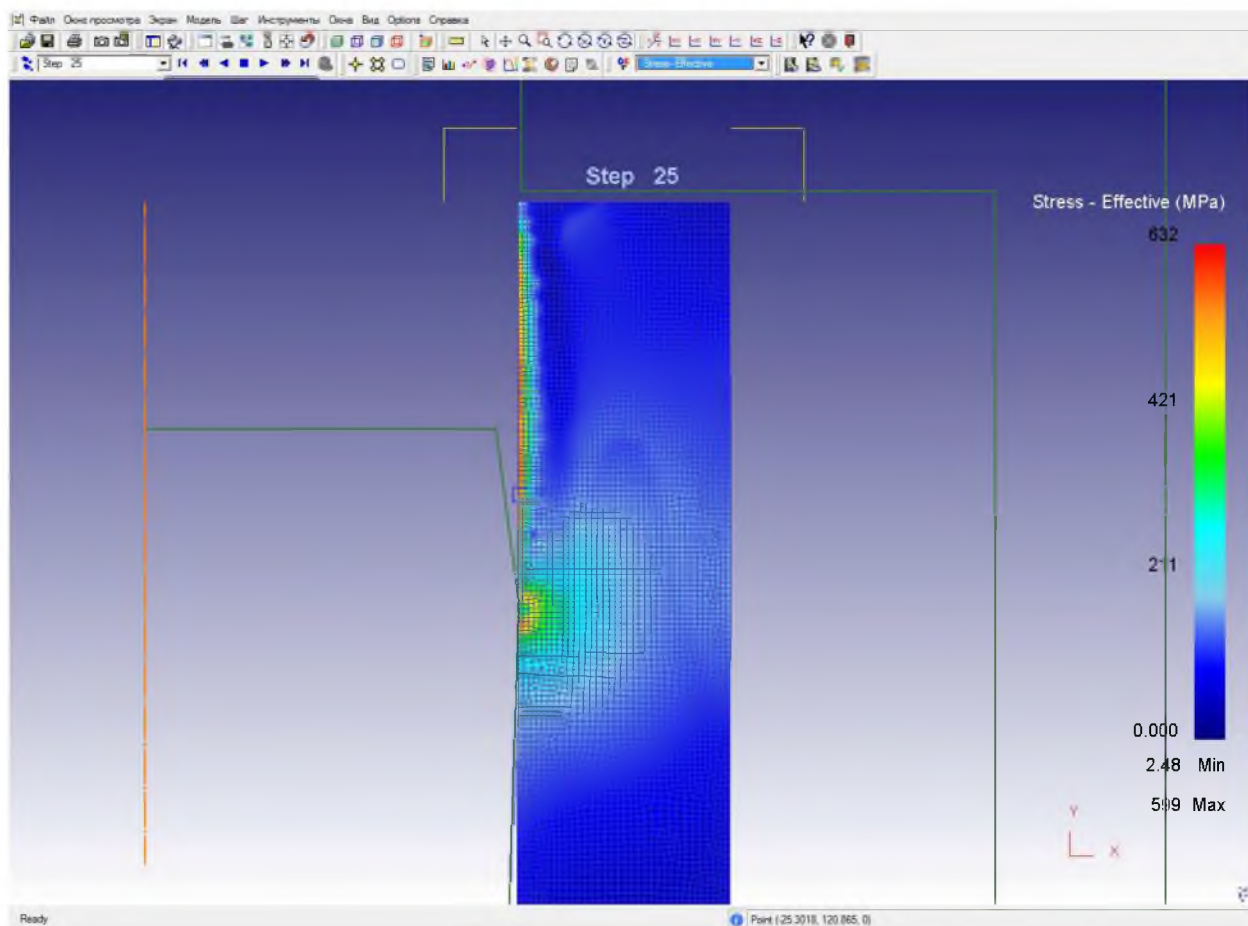


Рисунок 3.4 – Сталій процес обробки ДЕ отвору на внутрішній ділянці
довжини втулки

На рисунку 3.4 показано 25-й крок моделювання процесу протягування/прошивання. Можна побачити, що на оброблюваній поверхні втулки після проходження ДЕ спостерігається зона, де ефективне напруження наближається до червоної зони. У цьому місці за розрахунками програми відбулася максимальна пластична деформація поверхневого шару.

На рис. 3.5 показано 50-й крок моделювання, якій відповідає середині втулки за її висотою. На ньому добре видно характер зони деформації стінки втулки та її розподіл після проходження ДЕ. Треба врахувати те, що при куті робочого конуса ДЕ $\alpha=2^\circ$ процес протягування максимально наближений до так званого вигладжування, тому радіальні навантаження на деталь досить помірні, а основні деформації оброблюваного отвору зосереджені біля його поверхні.

На рис. 3.6 наведено напруження оброблюваної поверхні втулки під час виходу ДЕ із отвору деталі на 107 кроку розрахунку.

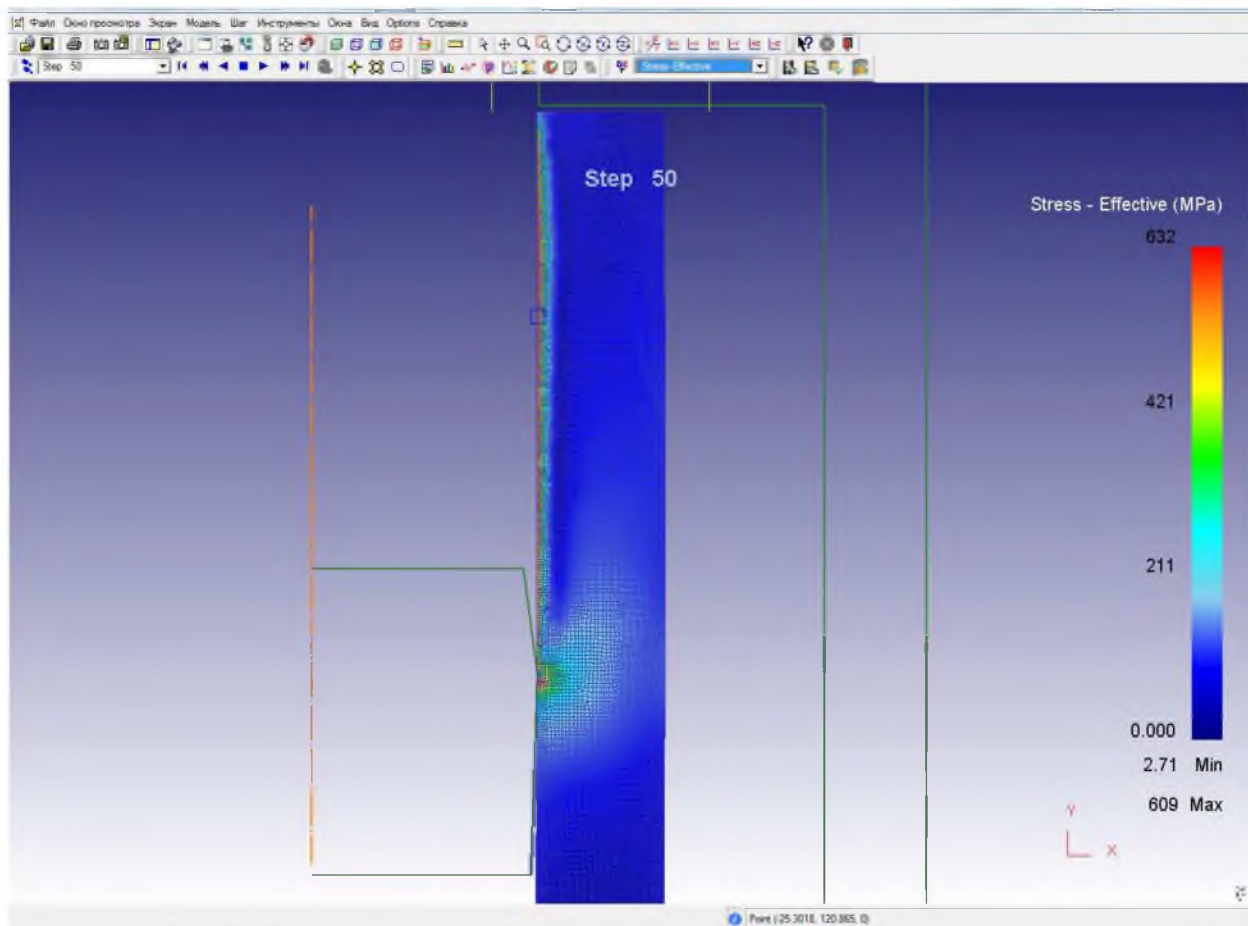


Рисунок 3.5 – Характер розподілу деформацій по товщині стінки втулки

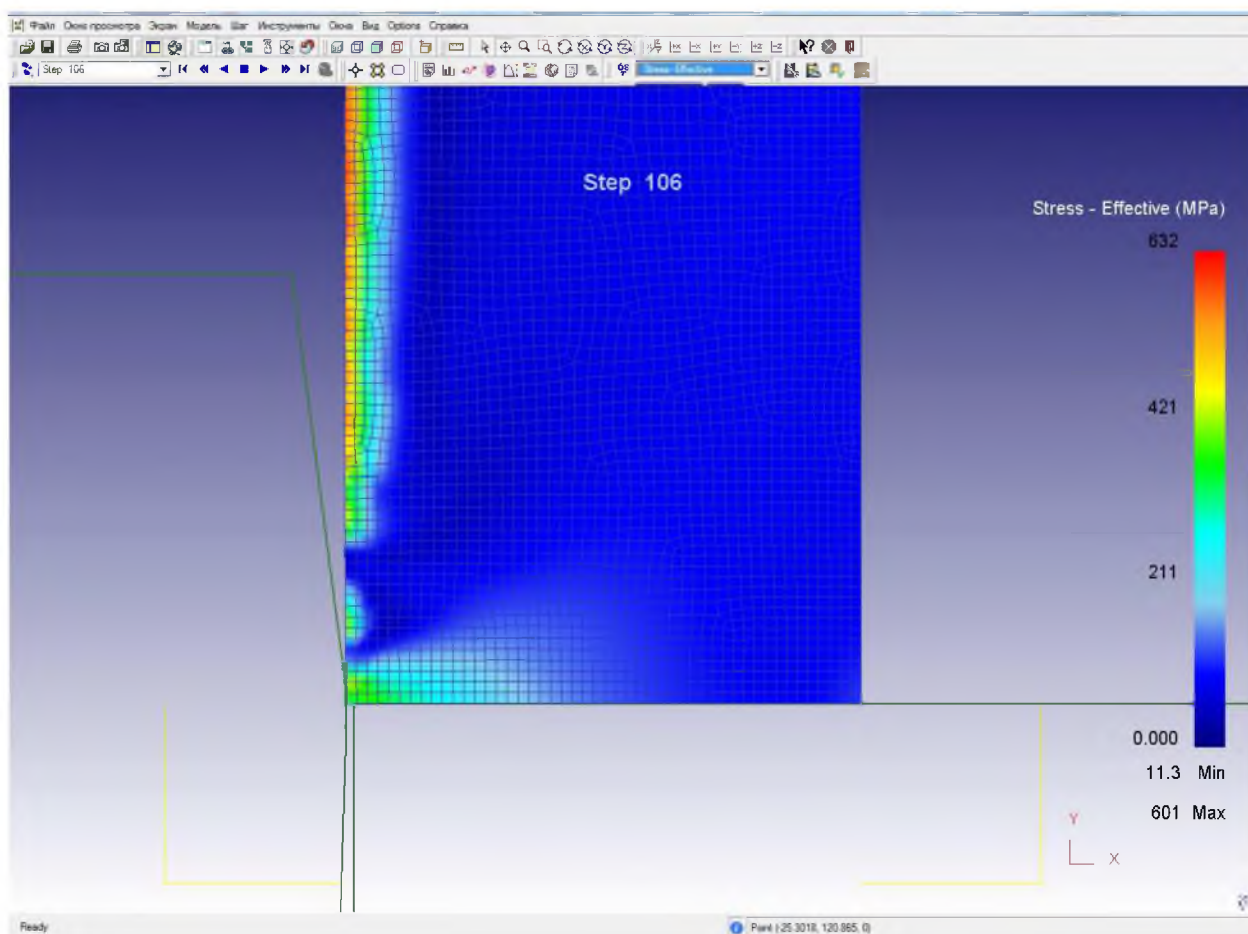


Рисунок 3.6 – Момент закінчення обробки

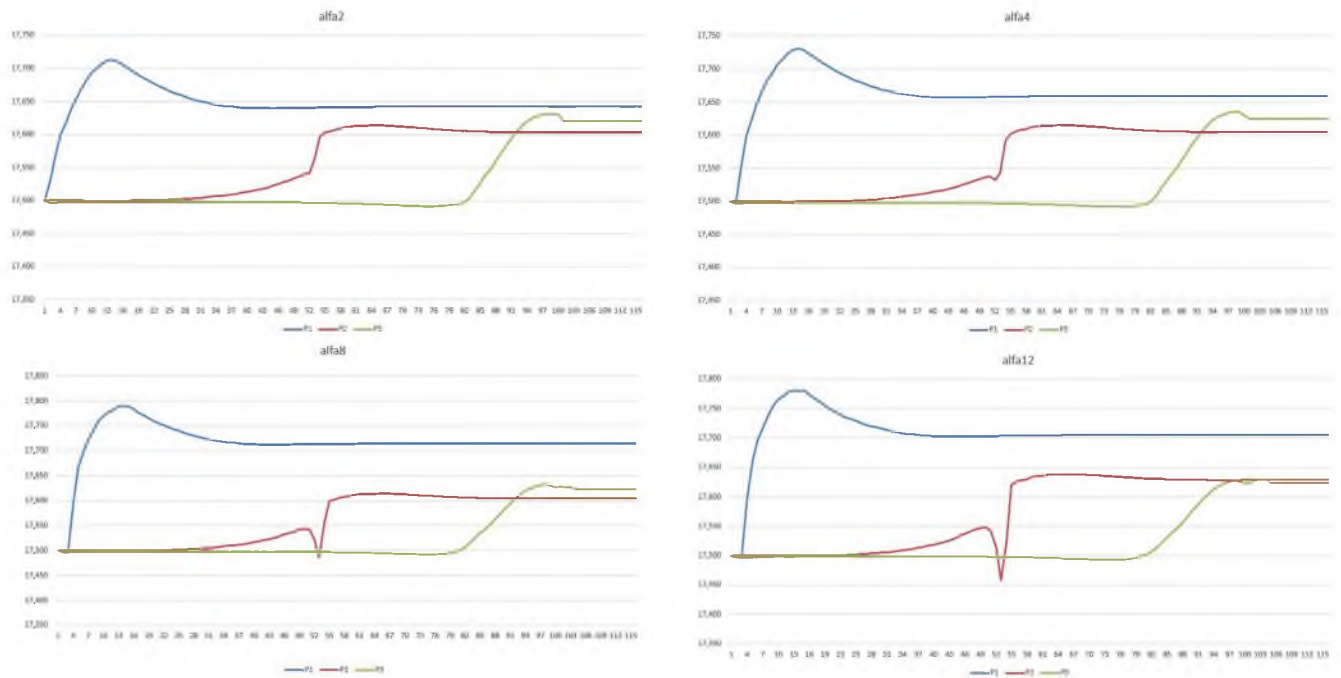
Слід відмітити, що після закінчення контакту робочого органа інструменту із втулкою, вона внаслідок пружних деформацій намагається «підстрибнути» догори. Це явище підтверджується й результатами практичних дослідів з деформуючого протягування втулок з чавуну, які були проведені Чернявським О.В. [], тому на нашу думку при проектуванні спеціальних пристосувань для виконання подібних операцій необхідно обмежити переміщення деталі по вертикалі до малих значень.

3.2 Аналіз результатів даних, отриманих під час моделювання процесу деформуючого протягування отворів у втулках із різних матеріалів

Результати обробки даних у вигляді різниці початкових та кінцевих геометричних координат точок за віссю X, що були отримані в результаті моделювання, наведено на рисунках 3.7-3.9.

Аналіз отриманих даних, які були зведені до графіків показує, що для втулок із латуні Л62 для всього діапазону досліджених кутів робочого конуса ДЕ спостерігається виключно розбивка обробленого отвору у верхній точці P1, причому із збільшенням товщини стінки втулки це явище стає менш вираженим. У точках P2 та P3 (відповідно середина та нижній торець втулки) розбивка отвору теж присутня, але вона дуже невелика. Це можна пояснити тим, що верхній торець втулки не має заневолення. У точці P2 жорсткість деталі вища, а нижній торець втулки точка P3 взагалі під час обробки щільно притискається до основи під дією осьових сил від інструмента. У точці P2 розбивка отвору мінімальна. Із зростанням кута робочого конуса α розбивка збільшується. Зі збільшенням кута робочого конуса та товщини стінки втулки спостерігається зростання так званого «валику» з металу перед ДЕ, що свідчить про наявність пластичної деформації у зоні контакту.

Латунь Л62, $t=10$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм



Латунь Л62, $t=20$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм

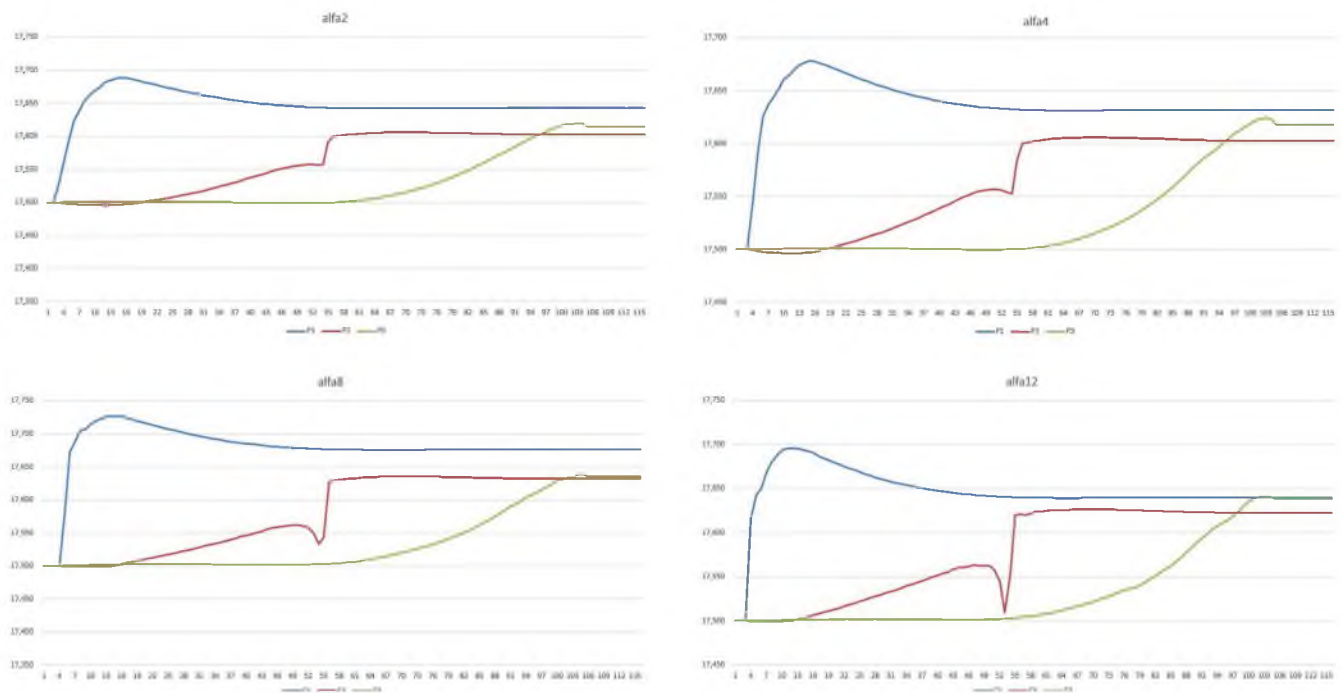
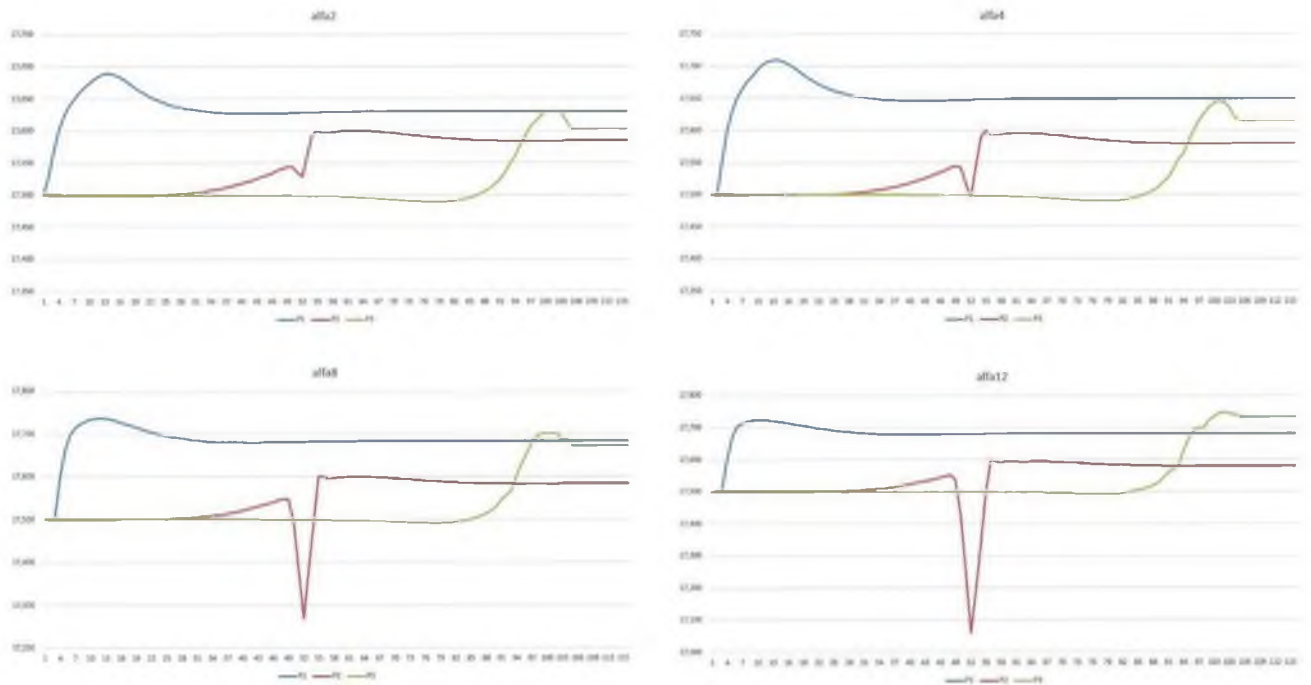


Рисунок 3.7 - Вплив кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки на розмірі оброблюваного отвору (матеріал латунь Л62)

Сталь 45, $t=10$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм



Сталь 45, $t=20$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм

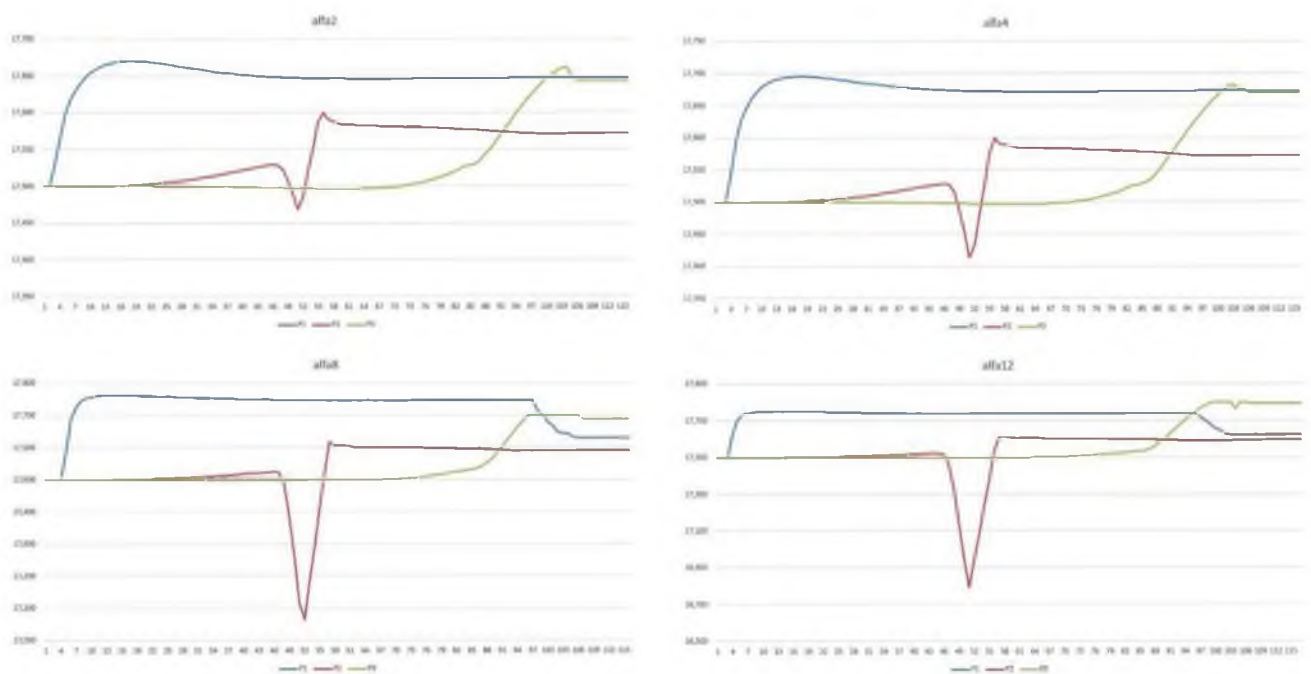
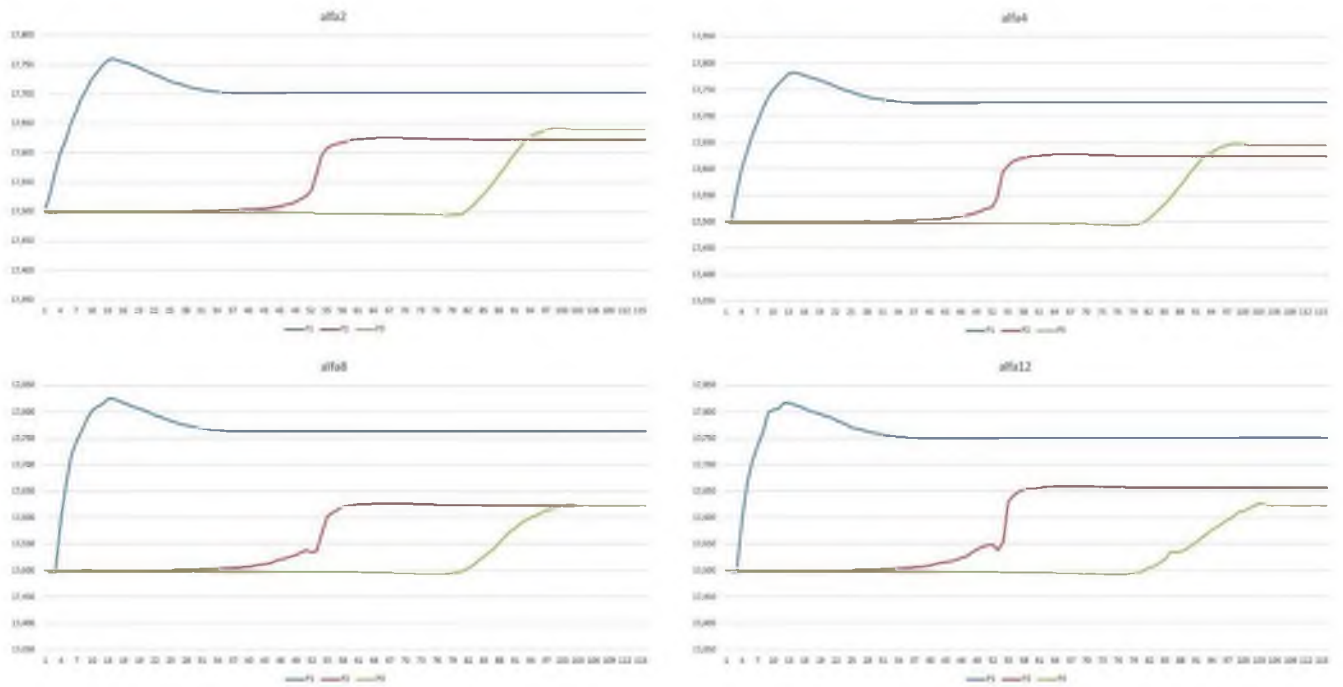


Рисунок 3.8 - Вплив кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки на розміри оброблюваного отвору (матеріал сталь 45)

Чавун СЧ20, $t=10$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм



Чавун СЧ20, $t=20$ мм, $a_0=35,0$ мм; натяг на сторону 0,1 мм

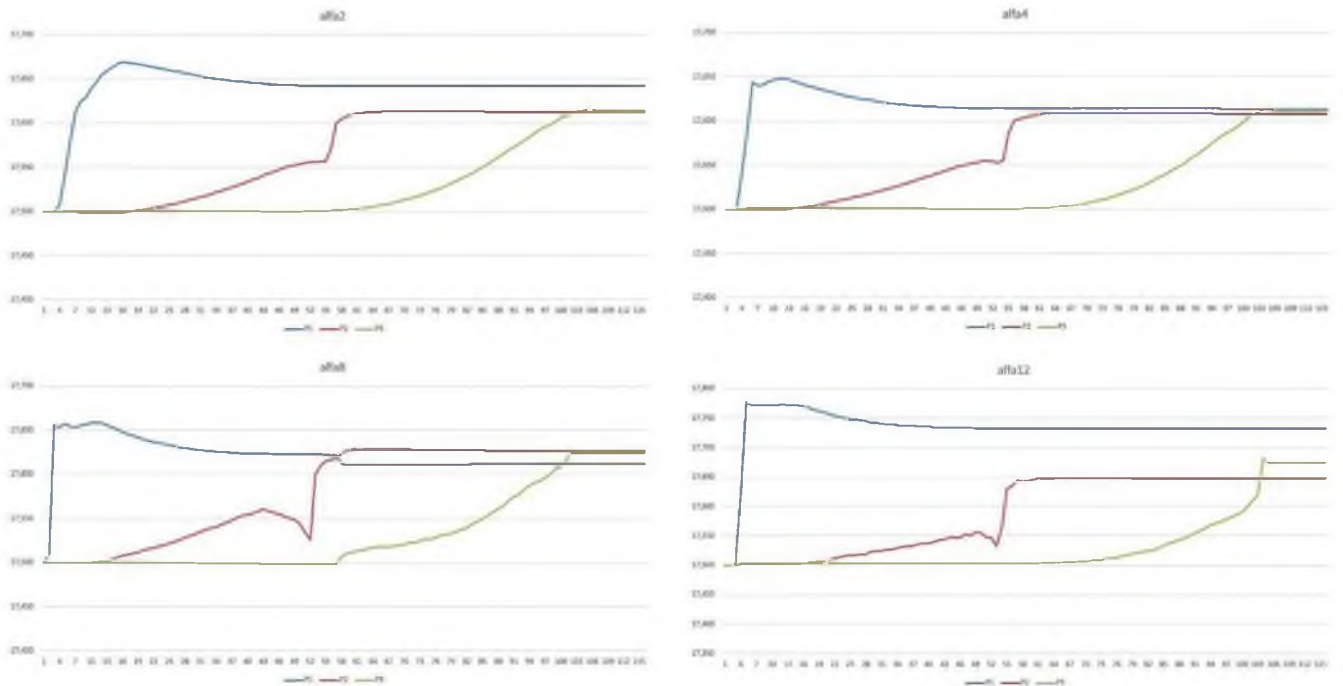


Рисунок 3.9 - Вплив кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки на розмір оброблюваного отвору (матеріал сірий чавун СЧ20)

Для сталі 45 характер деформацій дещо відрізняється. Розбивка отвору у точках Р1 та Р3 має ярко виражений характер. Зі збільшенням кута α при

товщині стінки $t_0 = 20$ мм розбивка верхнього торцю знижується. Це можна пояснити дією пружних деформацій та високими механічними якостями вуглецевої сталі. У точці P2 усадка отвору мінімальна і не перевищує 0,001...0,003 мм. Із зростанням кута робочого конуса α розбивка збільшується. В точці P3 при $t_0=10$ мм спостерігається розбивка отвору яка зростає зі збільшенням кута робочого конуса ДЕ. Для $t_0= 20$ мм характер деформацій схожий.

З аналізу графіків для чавуну СЧ20 ми бачимо, що для всіх кутів робочого конуса ДЕ спостерігається розбивка отвору у точці P1, при збільшенні товщини стінки втулки явище розбивки оброблюваного отвору в цієї зоні стає менш вираженим. У точках P2 та P3 також спостерігається розбивка отвору. Точка P2 (середина втулки) має найнижчий показник розбивки отвору. На нашу думку, це відбувається внаслідок більш високої жорсткості деталі у цьому перерізі, ніж у точці P1. Точка P3 (нижній торець втулки) завдяки дії осевих сил від інструменту досить щільно притискається до основи, тобто вона має певне заневолення внаслідок діючих сил тертя, тому показники розбивки отвору значно менші. Розбивка зростає зі збільшенням робочого конуса ДЕ для товщин стінок втулки $t_0=10$ та 20 мм.

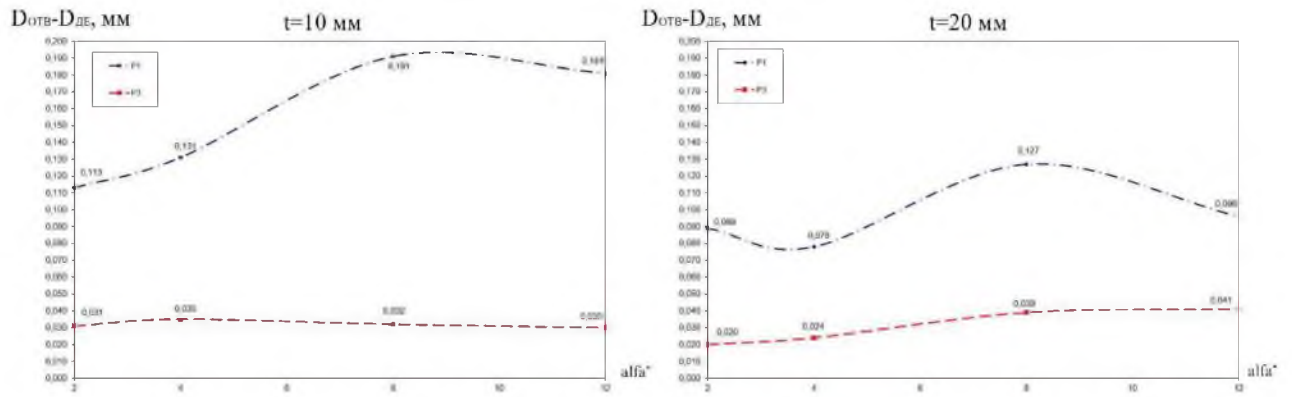
Слід зазначити також те, що процес протягування супроводжується певним випученням оброблюваного матеріалу деталі на вхідному і вихідному торцях, яке викликає неплоскостність останніх. Появи неплоскостності і можна пояснити тим, що при протягуванні втулок з товщиною стінки близької до нескінченної, контактні тиски в зоні контакту робочого конуса деформуючого елементу з оброблюваною поверхнею досягають великих значень (до 3 ГПа), при яких відбувається осьова течія оброблюваного матеріалу в значному об'ємі. При вході деформуючого елементу в оброблюваний отвір частина оброблюваного матеріалу витісняється в напрямі, протилежному до вектору швидкості переміщення інструменту, а по мірі наближення деформуючого елементу до виходу з отвору частина оброблюваного матеріалу витісняється в напрямі, співпадаючим з вектором швидкості переміщення.

3.3 Результати моделювання та графіки залежності розбивки отвору від товщини стінки втулки та кута робочого конуса ДЕ в характерних точках Р1 та Р3

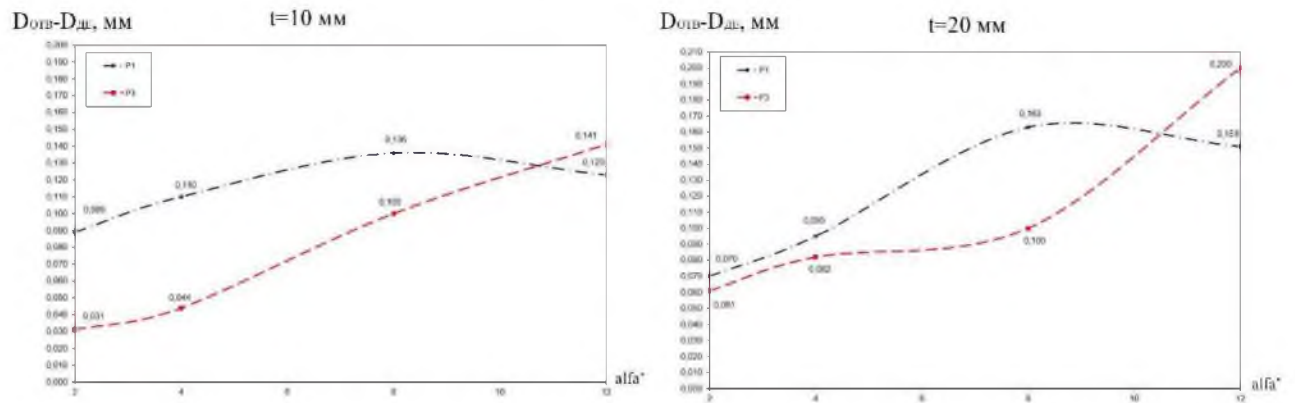
Після аналізу графіків залежностей розбивки отвору деталі в характерних точках Р1 та Р3, який наведено на рисунку 3.10, можна сказати наступне: на графіку для матеріалу латунь Л62 та товщини стінки втулки $t_0=10$ та 20 мм можна побачити, збільшення робочого кута ДЕ приводить до зростання величини розбивки отвору в досліджуваних точках. Особливо зростання спостерігається в точці Р1 для товщини стінки $t_0=10$ мм, а пік зростання припадає на величину кута ДЕ $\alpha=8^\circ$ та становить до 0,191 мм на сторону. Характерна точка Р3 суттєво відрізняється, з даних, що ми отримали в процесі моделювання обробки в програмному середовищі Deform 3D видно що точка Р3 практично не має зростання від збільшення кута ДЕ. Таке суттєве відхилення точок Р1 та Р3 можна пояснити тим, що в зоні верхнього торцю оброблювана деталь не має заневолення. В той же час нижній торець (точка Р3) під дією осьової сили протяжного інструмента щільно притискається до нерухомої основи. Для товщини стінки втулки $t_0=20$ мм точка Р1 має хвилеподібний вигляд, максимальна розбивка отвору становить для кута $\alpha=8^\circ$ і має розмір 0,127 мм на сторону. В точці Р3 спостерігається характерне зростання величини розбивки отвору при збільшенні кута ДЕ та максимальне значення якого становить до 0,041 мм на сторону для кута ДЕ $\alpha=12^\circ$.

Аналіз графіку залежності розбивки отвору в характерних точках Р1 та Р3 від кута робочого конуса ДЕ для сталі 45 показує, що досліджуване явище розбивки оброблюваного отвору досить виражене на дослідних зразках як при реальному, так й під час віртуального моделювання методом кінцевих елементів.

Латунь Л62, натяг на сторону 0,1 мм



Сталь 45, натяг на сторону 0,1 мм



Чавун СЧ20, натяг на сторону 0,1 мм

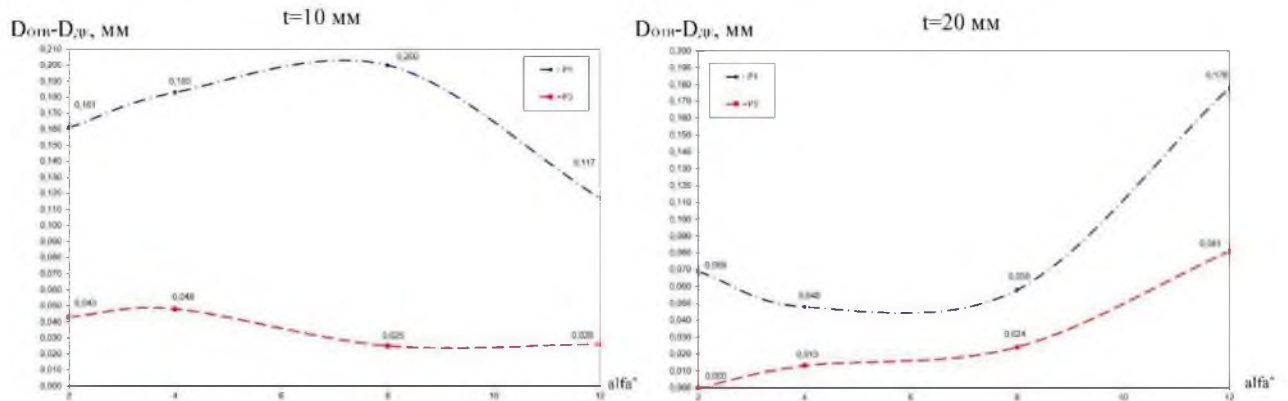


Рисунок 3.10 - Залежність розбивки отвору деталі в точках Р1, Р3 для матеріалів латунь Л62, сталь 45 та сірий чавун СЧ20 при натягу 0,2 мм на діаметр

Зростання величини розбивки отвору ярко виражено в точках Р1 та Р3. Найбільше зростання розбивки відбувається в точці Р3, де його величина починає зростати при куті ДЕ від $\alpha=4^\circ$ до кута $\alpha=12^\circ$ і має максимальний розмір

розбивки отвору до 0,141 мм на сторону. В точці P1 зростання розбивки отвору відбувається до кута ДЕ $\alpha=8^\circ$ і становить до 0,136 мм, а потім воно йде на незначний спад до кута $\alpha=12^\circ$. Графік, на якому показані дані для товщини стінки втулки $t_0=20$ мм має подібний характер, але величина розбивки отвору має більші значення, ніж для товщини $t_0=10$ мм. В точці P1 також спостерігається зростання розбивки до кута $\alpha=8^\circ$, яке становить 0,163 мм, а потім графік йде на спад. Також спостерігається зростання розбивки отвору в точці P3, при цьому слід відмітити, що найбільш виражене явище зростання відбувається при кутах ДЕ від $\alpha=8^\circ$ до $\alpha=12^\circ$. Максимальне значення розбивки становить до 0,2 мм на сторону, що є найбільшим зафіксованим показником розбивки отвору для сталі 45.

Після аналізу графіку, на якому зображено отримані значення для матеріалу сірий чавун СЧ20 видно, що для характерної точки P1 верхнього торцю розбивка зростає від кута ДЕ. Зростання розбивки відбувається при зростанні кута від $\alpha=2^\circ$ до $\alpha=8^\circ$ а потім графік йде на ярко виражений спад до робочого кута ДЕ $\alpha=12^\circ$. Слід відмітити, що при куті робочого конуса ДЕ $\alpha=12^\circ$ має місце найнижча розбивка отвору в точці P1. Максимальне значення розбивки оброблюваного отвору припадає на кут ДЕ $\alpha=8^\circ$ та складає до 0,2 мм на сторону. Зміни у характерній точці P3 мають протилежний характер: при зростанні кута робочого конуса ДЕ, спостерігається зменшення значення розбивки отвору для кутів $\alpha=8^\circ$ та $\alpha=12^\circ$, які складають до 0,025 мм на сторону. Для кутів ДЕ $\alpha=2^\circ$ та $\alpha=4^\circ$ розбивка має більші значення, які практично не відрізняються і становлять відповідно до 0,043 та 0,048 мм на сторону. З аналізу графіку, де була збільшена товщина стінки втулки до $t_0=20$ мм, бачимо, що в точці P1 різні показники розбивки отвору від зростання робочого кута ДЕ, найбільш максимальне зростання розбивки відбувається при кутах ДЕ від $\alpha=8^\circ$ до $\alpha=12^\circ$. Розмір розбивки оброблюваного отвору становить до 0,176 мм на сторону. В точці P3 спостерігається зростання розбивки отвору від робочого кута ДЕ, максимальний розмір розбивки має кут $\alpha=12^\circ$ та становить 0,061 мм на сторону. Слід зазначити, що при виході деформуючого елемента із зони

обробки (точка Р3) з кутом робочого конуса ДЕ $\alpha=2^\circ$ розбивка отвору не відбувається.

3.4 Характеристика запропонованої схеми деформуючої протяжки для обробки круглих отворів та принцип дії інструменту

Застосування деформуючого протягування в якості однієї із фінішних операцій в технологічному процесі обробки круглих отворів в деталях типу втулка можливе тільки при забезпеченні високої точності форми отвору на попередніх операціях.

На основі аналізу літературних джерел можливо зробити висновок, що найбільш раціональних схем протягування (у даному випадку під схемою протягування будемо розуміти порядок виконання роботи по деформуванню внутрішньої порожнини деталі типу втулка між деформуючими елементами) може бути схема, яка суміщає переваги напівчистового та чистового деформуючого протягування.

Одним із варіантів такої схеми є комбінація в одному інструменті жорстко зв'язаних поміж собою та послідовно розташованих груп чорнових деформуючих елементів, та розташованої за ними другої групи чистових деформуючих елементів. За таким варіантом чорнові деформуючі елементи при робочому ході інструмента на початку обробки центрують його відносно оброблюваного отвору деталі та виконують попередню обробку її внутрішньої поверхні. Далі вступає в роботу друга група деформуючих елементів, які виконують чистову (вигладжуючу) операцію по роздачі отвору і формуванню його остаточної поверхні.

Таким чином, однією із раціональних схем протягування круглих отворів в деталях типу втулка, із латуні Л62, сталі 45 та сірого чавуну СЧ20 може бути вище описана схема. Така схема і полягла в основу запропонованого інструменту для обробки вище перелічених деталей типу втулка.

Загальний вигляд деформуючої протяжки наведено на рис. 3.11.

Протяжка складається з наступних елементів: першого деформуючого блока з трьох елементів 2, та другого деформуючого блока з трьох елементів 3, оправки 1, дистанційних втулок 4 та 5, конусної гайки 6, та хвостовика 7.

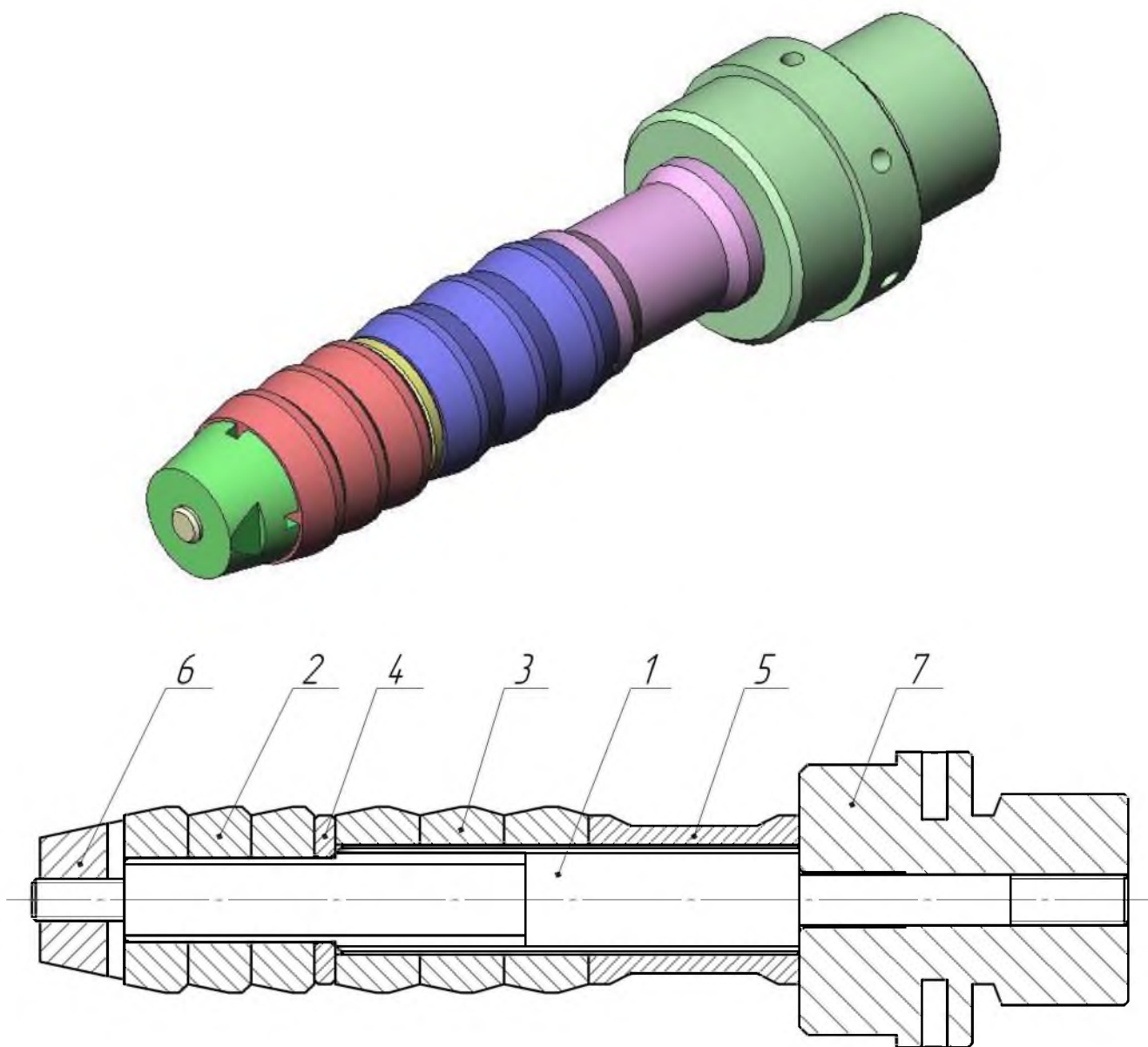


Рисунок 3.11 - Схема деформуючої протяжки для обробки круглих отворів

Оправка представляє з себе ступінчастий вал, на котрому з обох сторін нарізана різь. Лівий кінець вала з різзю М8 служить для накручування гайки, яка в затисненому стані забезпечує точне спраження елементів на оправці. Протилежний правий кінець оправки з різзю М12 потрібен для закріплення на неї робочого хвостовика інструмента. Хвостовик служить для закріплення

протяжки в патроні вертикального протяжного верстата або гідравлічного пресу з двома стійками.

Секція протяжки складається з двох груп деформуючих елементів. Чорнові деформуючі елементи групи 2 несуть найбільше навантаження і розташовані таким чином, щоб утворювана кожним із них хвиля позаконтактної деформації не впливала на умови роботи наступного деформуючого елемента. Елементи калібрувальної робочої групи 3 виконують послідовну обробку отвору втулки після проходження чорнового блока і формують його заданий розмір та необхідну чистоту поверхні. Дистанційна втулка 5 за рахунок своєї довжини забезпечує повне проходження всіх ДЕ групи 6 скрізь оброблюваний отвір.

3.5 Розрахунок на міцність деформуючих елементів

Розрахунок на міцність робочих елементів деформуючих протяжок виконується для визначення їх основних геометричних розмірів: товщини стінки, висоти, ширини циліндричної стрічки та її відстані до торця [68-70].

Даний розрахунок виконано по методиці, [68-70] в якій передбачалось, що деформуючий елемент виготовлений з твердого сплаву групи ВК і 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, якщо він має оптимальну висоту, володіє найбільшою несучою спроможністю при найменшій витраті металу на його виготовлення.

Розрахунок почнемо виконувати з визначення товщини стінки за емпіричною формулою:

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

де Q – сила протягування;

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

λ – фактична ширина контакту робочої поверхні елементу 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;

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

D_k – зовнішній діаметр деформуючого елементу, приймаємо конструктивно.

Дані для розрахунку;

$Q = 10$ кН; $K_L = 1,3$; $\lambda = 1,1$ мм при $d_0 = 35$ мм; $t_0 = 5$ мм; $a_\phi = 0,5$; $f = 0,037$.

Допустиме напруження від згину для твердого сплаву визначається за формулою:

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

де $\sigma_{из}$ – фактична межа міцності твердого сплаву при згині.

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

де $\sigma_{из.ст}$ – межа міцності твердого сплаву при згині, обумовлений вимогами ДСТУ;

$K_{n,c}$ – коефіцієнт, який залежить від посадки деформуючого елементу на стержень 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 елементу;

e – основа натурального логарифму;

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

K_ϕ – коефіцієнт форми отвору деформуючого елементу.

Дані для розрахунку;

$d_k = 15$ мм; $\Delta = -0,0235$ мм;

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

$t_k = 3,8$ мм, приймаємо попередньо.

$$K_{n,c} = 1,1 \cdot 15^{0,33} \cdot 3,8^{-0,42} \cdot e^{\frac{310-0,0235^{1,1}}{35}} \cdot 1 = 2,143$$

Приймаємо $K_{n,c} = 2,15$

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

Для ВК8 $\sigma_{uz,ст} = 1617$ Н/мм².

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

$$[\sigma_{uz}] = \frac{1380 \cdot 2,15}{2,2} = 1349 \text{ Н/мм}^2$$

$$t_k = 0,329 \cdot \frac{(10^4)^{0,735} \cdot 1,3^{0,71} \cdot 0,938^{1,1}}{0,037^{0,43} \cdot 1349^{0,735} \cdot 35,25^{0,36}} = 1,844 \text{ мм.}$$

Для подальшого розрахунку використано прийняте значення $t_k = 1,85$ 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.

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{35}{2} = 17,5 \text{ мм;}$$

$$r_k = \frac{d_k}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ мм;}$$

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 перерізі перпендикулярному до вісі, мм³. Значення W знаходимо по формулі:

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

$$W = \frac{9 \cdot (17,625^4 - 7,5^4) \cdot (17,625^2 - 7,5^2) - 8 \cdot (17,625^3 - 7,5^3)^2}{12 \cdot (17,625^3 - 7,5^3) - 18 \cdot (17,625^2 - 7,5^2) \cdot 7,5} \cdot 3,14 = 1124 \text{ мм}^3.$$

$$L_K = 1,3 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,1^2}{4} + \frac{8 \cdot 0,54 \cdot 17,625 \cdot 1124}{3,14 \cdot (17,625^2 - 7,5^2)}} \right] = 6,738 \text{ мм.}$$

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

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

де b – ширина циліндричної стрічки, $b = 0,3$ мм;

α – кут робочого конуса, $\alpha = 2^\circ$;

$b_{\phi ac}$ – ширина фаски, $b_{\phi ac} = 0,8$ мм;

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

$$L_{\kappa.\partial} = \frac{0,25}{2 \cdot \operatorname{tg} 2^\circ} + 0,3 + 2 \cdot (0,8 + 3) = 7,843 \text{ мм.}$$

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

Мінімальна відстань h' від торця деформуючого елемента 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 елемента.

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

Приймаємо $L'_{\kappa.\partial} = 6,75$ мм.

$$h' = \frac{6,75 + 1,1}{2} = 3,925 \text{ мм.}$$

Приймаємо по конструктивним міркуванням: $h' = 4$ мм. Приведений розрахунок дає гарантію, що деформуючий елемент, який має знайдені значення геометричних розмірів, задовольняє вимоги міцності на згин та стиск.

3.6 Рекомендації щодо вдосконалення конструкції деформуючої протяжки

Отримані результати моделювання методом кінцевих елементів, а також їх порівняння з ґрунтовними дослідями по протягуванні круглих отворів у втулках із чавунів [77,78] дозволяють зробити наступні висновки та рекомендації. По мірі збільшення кута робочого конуса деформуючого елемента та номінального натягу, початок перекичування форми отвору зміщається у бік меншої кількості циклів деформування. При протягуванні першим деформуючим елементом зазначена погрішність ліквідувалася, потім при подальшій обробці спостерігається поява корсетності. З нарощуванням циклів деформування перекичування форми отвору збільшується, причому більше інтенсивне збільшення відбувається з боку вхідного торця деталі. Слід зазначити також те, що поява корсетності супроводжується «витріщанням» оброблюваного матеріалу деталі на вхідному та вихідному торцях, що викликає неплоскостність останніх. Появу неплоскостності та корсетності можна пояснити тим, що при протягуванні втулок з товщиною стінки, близької до нескінченної, контактні тиски в зоні контакту робочого конуса деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею досягають більших значень ($q > 3 \text{ ГПа}$), при яких відбувається осьовий плин оброблюваного матеріалу в значному обсязі. При вході деформуючого елемента в оброблюваний отвір частина оброблюваного матеріалу витісняється в напрямку, протилежному вектору швидкості переміщення інструмента, а в міру наближення деформуючого елемента до вихідного торця частина оброблюваного матеріалу витісняється в напрямку, що збігається з вектором швидкості переміщення інструмента.

Що ж стосується точності форми отвору в поперечному перерізі, то в міру наближення товщини стінки до нескінченного, у процесі деформуючого протягання вихідна погрішність форми отвору зменшується.

З викладених вище положень можна зробити висновок, що якщо до оброблюваних виробів пред'являються високі вимоги по точності форми, то деформуюче протягування деталей з нескінченної (або близької до нескінченного) товщиною стінки можна застосовувати їх як фінішну операцію тільки при малих номінальних натягах на деформуючий елемент ($a = 0,03 \dots 0,05$

мм) і куті робочого конуса деформуючого елемента ($\alpha=2\ldots4^\circ$). Якщо разом з високої точністю деталі потрібно одержати мінімальну шорсткість обробленої поверхні, то необхідно здійснити протягування одним або двома деформуючими елементами при $a=0,03\ldots0,05$ мм і $\alpha=2\ldots4^\circ$, а потім, одним або двома деформуючими елементами з $a=0,03\ldots0,05$ мм і $\alpha=8^\circ$.

У роботах Я.Б. Неміровського [36] зазначено, що при обробці деталей групою елементів умови обробки в порівнянні із протягуванням одиночними елементами поліпшуються. При цьому відсутня можливість перекосу групи елементів, тому що крім базування по торці, деталь базується на попередніх елементах групи. Тому в порівнянні із протягуванням одиночними елементами, деякі параметри погрішності значно зменшуються.

Використовуваний в дослідженнях сірий чавун марки СЧ20 є досить крихким матеріалом, про що свідчать результати випробування зразків на розрив. Однак, при деформуючому протягуванні можна створити такі умови напруженого стану оброблюваного матеріалу, при яких буде мати місце пластична деформація навіть крихкого матеріалу. Так, гранична пластична деформація деталей із чавуна СЧ20, оброблених деформуючим протягуванням, в окремих випадках може досягати до 4...6%.

Процес деформуючого протягування може бути використаний у якості проміжної або фінішної операції обробки отворів у деталях типу втулка із чавуну замість або в доповнення до операцій різання.

При обробці отворів погрішність яких перебуває в межах 6-го квалітету точності та менше, деформуюче протягування можна застосовувати як фінішну операцію замість операцій різання, розточування, розгортання, ріжучого протягування, шліфування та хонінгування. У випадку обробки отворів, що мають точність вище 6-го квалітету, операцію деформуючого протягування необхідно виконувати разом з ріжучим протягуванням за схемою ріжуче-деформуюче або деформуюче-ріжуче-деформуюче протягування. Зазначені схеми найкраще реалізувати в одній конструкції інструмента, тому що це дозволяє обробити отвір без переустановлення деталі та інструмента.

Кут твірної робочого конуса деформуючих елементів доцільно призначати рівним $4...5^{\circ}$. У цьому випадку сила протягування буде мінімальною. Однак, з метою забезпечення низької шорсткості обробленої поверхні можна два-три останніх деформуючих елементів виконати з кутом твірної робочого конуса в межах $8...10^{\circ}$. При цьому зовнішній діаметр деформуючих елементів повинен бути однаковим або рівномірно зменшеним за розмірами на величину номінального натягу на деформуючий елемент у межах усадки оброблюваного отвору.

З погляду технологічності конструкції деформуючих елементів, кут твірної зворотного конуса найкраще призначати рівним куту твірної робочого конуса. Це дозволить при зношуванні робочої частини конусної поверхні перевернути деформуючий елемент на 180° та використати його зворотний конус у якості робочого. Якщо технологічний процес деформуючого протягування передбачає зворотний хід інструмента через оброблюваний отвір, то в такому випадку кути α та α_1 деформуючих елементів повинні бути рівними $4...5^{\circ}$, за винятком двох-трьох останніх деформуючих елементів, у яких кут призначається в межах $8...10^{\circ}$.

При використанні деформуючого протягування як чистової операції, номінальний натяг на деформуючий елемент не повинен перевищувати 0,10 мм, тому що в іншому випадку можлива поява перекручування форми отвору.

У процесі деформуючого протягання деталей із чавуну у вогнищі деформації оброблюваного матеріалу мають місце зони позаконтактної деформації. У цьому випадку розташування деформуючих елементів у зонах позаконтактної деформації не рекомендується, тому що не завжди можна забезпечити гарантований натяг на деформуючий елемент.

При фінішній обробці отворів у деталях із чавуну деформуючим протягуванням об'ємні пластичні деформації оброблюваної заготівлі не повинні перевищувати $1,75...2,0\%$, що відповідає збільшенню оброблюваного отвору на $0,5...0,6\%$. Особливо варто обмежувати пластичні деформації при обробці деталей з товщинами стінок рівними або близькими до нескінченної, тому що в протилежному випадку можливо надмірне зміцнення оброблюваного

матеріалу, що приводить до лущення обробленої поверхні, а також перекручування форми отвору в поздовжньому перетині (з'являється корсетність).

Деформуюче протягування можна використовувати в напівчистовій операції, що передує обробці різанням, при цьому, величина об'ємних пластичних деформацій обмежуватися лише міцністю заготовки та може бути доведена до 3...5%, що відповідає збільшенню оброблюваного отвору приблизно на 0,7...1,4%. Чим більше товщина стінки оброблюваної деталі та менше номінальний натяг на деформуючий елемент, тим більшу можна створити пластичну деформацію оброблюваної деталі, не довівши її до руйнування. Для чорнового деформуючого протягування величину номінального натягу на деформуючий елемент необхідно призначати в межах 0,10...0,15 мм. Кут твірної робочого та зворотного конусів деформуючих елементів можна вибрати в діапазоні 4...12°. Чим більше кут α , тим інтенсивніше відбувається зміцнення та надмірне зміцнення поверхневого шару.

Для всіх випадків деформуючого протягання деталей із чавуна як технологічне змащення можна застосовувати гас, сульфофрезол, мінеральні масла, а також емульсії.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на точність обробки, є матеріал деталі та геометричні параметри робочих елементів протяжки. З метою уникнення крайових ефектів (розбивка отвору та випучення його окрайок) рекомендується застосування обробки за схемою стискання з додатковим заневолюванням деталі у верхній частині (затискання деталі з боків напівкільцями або призми). Також рекомендується застосовувати кут робочого конуса ДЕ в межах від $\alpha=4^\circ$ до $\alpha=8^\circ$, що забезпечує мінімальну розбивку отвору та достатнє зміцнення оброблюваної поверхні. В якості змащення рекомендується застосовувати мінеральні мастила низької та середньої в'язкості.

В якості матеріалу для виготовлення робочих ДЕ використовуємо твердий сплав групи BK8 або BK15, а інші складові елементи протяжки виготовляємо із якісної конструкційної сталі марок сталь 40, 45, 40X.

3.7 Висновки

1) Із застосуванням програмного комплексу DEFORM-2D/3D розроблена модель процесу деформуючого протягування отворів у втулках із чавуна, сталі та латуні, яка дозволяє визначати формозміну деталі, напружений стан металу у вогнищі деформації та енергосилові параметри. Модель враховує пружно-пластичний характер холодної деформації металу та монотонний характер процесу. Досліджено вплив товщини стінки оброблюваної деталі, матеріалу деталі та кута робочого конуса деформуючого елемента на параметри розбивки оброблюваного отвору при протягуванні втулок із досліджуваних матеріалів;

2) Встановлено немонотонний характер зміни розбивки отвору в залежності від товщини стінки та матеріалу деталі, що оброблюється. Проведені експерименти підтверджують адекватність створеної моделі реальному процесу обробки. Отримані за її допомогою результати дозволяють проектувати технологічне встаткування та інструмент для даного виду металообробки, а також оцінити можливість використання існуючих протяжних верстатів та гідравлічних пресів для деформуючого протягування за даною схемою.

3) Підтверджено що наявність розбивки обробленого отвору залежить від початкових геометричних параметрів ДЕ, матеріалу деталі та товщини стінки втулки;

4) При збільшенні кута робочого конуса, а також при збільшенні товщини стінки втулки зафіксовано появу валика із оброблюваного матеріалу поперед ДЕ, що свідчить про наявність пластичної деформації у зоні контакту інструмента та виробу;

5) Проведені дослідження процесу протягування отворів у деталях типу втулка з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3D дозволили

підійти до раціонального використання протяжного інструмента та початкових геометричних параметрів його робочих елементів;

6) Отримані в результаті моделювання процесу дані дозволяють вести проектування інструменту і встаткування, призначеного для обробки отворів, оцінити можливість використання в цьому процесі уже наявних протяжних верстатів та гідравлічних пресів, а також управляти процесом протягування.

4. Економічне обґрунтування доцільності використання запропонованого програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу виготовлення та випробування комбінованих протяжок

Сучасні засоби проектування є одним з напрямків досягнення високого рівня розвитку сучасного машинобудування. У нинішній час створюються та розвиваються програми для моделювання технологічних процесів механічної обробки деталей та їх подальшого випробування.

Світовий досвід свідчить про можливість отримання значного економічного ефекту від застосування таких програм, завдяки скороченню часу, кількості застосовуваного технологічного обладнання, матеріалів та персоналу, необхідних для здійснення технологічних процесів виготовлення та випробування дослідних зразків деталей звичайним способом.

Використання прикладної програми, запропонованої у даній дипломній роботі, дає можливість відмовитися від трудомістких і високоточних операцій проектування, виготовлення та випробування дослідних зразків деформуючих протяжок, для виконання яких застосовується ряд технологічного обладнання (заготівельного, металообробного, пресового, термічного) та оснащення (вартість одного лише алмазного круга складає більш ніж 8000 грн.). Досягається також значна економія чисельності персоналу та дорогих витратних основних і допоміжних матеріалів, зокрема, твердого сплаву для виготовлення деформуючих елементів протяжки та абразивної пасти для високоточного шліфування. Крім того, використання програми дозволяє запобігти витратам, пов'язаним з необхідністю виготовлення додаткових дослідних зразків протяжок у випадку, якщо результати випробування виявили помилки, допущені при проектуванні та виготовленні інструменту.

Для визначення економічної ефективності використання запропонованої прикладної програми, у якості бази для порівняння приймемо описаний вище існуючий варіант проектування, виготовлення та випробування комбінованої протяжки.

4.1 Визначення витрат на підготовку виробництва інструменту

4.1.1 Витрати на проектування протяжки визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{op} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг}^к \cdot \left(1 + \frac{K_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (4.1)$$

де: H_{op} - кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

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

$Z_{сг.к}$ - середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

K_{∂} - додаткова заробітна плата конструктора, %;

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

H_e - накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{пк} = 6 \cdot 20 \cdot 68,18 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 6 \cdot 20 \cdot 68,18 \cdot \frac{45}{100} = 14661,06 \text{ грн.}$$

4.1.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{тех} \cdot Z_{сг}^м \cdot \left(1 + \frac{K_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (4.2)$$

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

$Z_{сг.м}$ - середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 6 \cdot 21 \cdot 65,70 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 6 \cdot 21 \cdot 65,70 \cdot \frac{50}{100} = 15248,44 \text{ грн.}$$

4.2 Визначення витрат на виготовлення інструменту в базовому варіанті

На основі встановленої трудомісткості виготовлення дослідного зразка комбінованої протяжки розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{\text{т}} \cdot T_i, \quad (4.3)$$

де n – кількість і-тих видів робіт;

$C_{z(i)}$ - середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують і-тий вид робіт (з урахуванням умов праці), грн.

Наприклад для механічних робіт.

$$Z_{op} = 66,048 \cdot 7,8 = 515,18 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^m Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{op}}{100} \quad (4.4)$$

де: $\Pi_{op(i)}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному і-му виду робіт (цеху) за заводською калькуляцією:

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

$$B_o = 515,18 \cdot (285/100) = 1468,26 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{цex} = \sum_{i=1}^m Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{цex}}{100}, \quad (4.5)$$

де $\Pi_{цex}$ – процент цехових витрат по кожному і-му виду робіт (цеху) за заводською калькуляцією.

$$K_{цex} = 515,18 \cdot (132/100) = 680,04 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Трудовісткість та окремі види витрат на виготовлення дослідного зразка комбінованої протяжки

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників Z_{op} грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання B_o		Загально виробничі (цехові) витрати , $B_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,1	3	59,392	5,94	220	13,06	150	8,90
Механічні	7,8	4	66,048	515,18	285	1468,26	132	680,04
Термічні	1,5	3	73,676	110,52	310	342,6	182	201,14
Слюсарсько-складальні	1,0	4	66,048	66,048	210	138,7	142	93,788
Всього	10,4	-	-	697,68	-	1962,61	-	983,86

Виробничу собівартість виготовлення протяжки розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій за формулою:

$$C_{нов} = M_o + M_d + T_v - B_{зв} + P_{тех} + E_{тех} + Z_{op} + Z_{др} + B_c + Z_{цп} + B_o + B_{цех} + B_{ін} \quad (4.6)$$

де M_o , M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали зведено до табл. 4.2.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

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

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

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

B_c – єдиний соціальний внесок, грн.;

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

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

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

Таблиця 4.2

Склад матеріальних витрат на інструмент

№ з/п	Матеріали , покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
1	2	3	4	5	6
	<u>Основні матеріали</u>				
1.	Сталь 40Х	кг	9,2	31,50	289,80
2.	Твердий сплав ВК8	кг	0,84	1490,00	1251,60
	Всього основних матеріалів	-	-	-	1541,40

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Виробнича собівартість дослідного зразка комбінованої протяжки

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.2	1541,40
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4 % від M_o	61,66
3.	Транспортно-заготівельні витрати	$T_{\text{в}}$	6 % від $(M_o + M_d)$	64,12
4.	Зворотні відходи (віднімаються)	$-B_{\text{зв}}$	5% від M_o	92,48
5.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$\Pi_{\text{tex}}, E_{\text{tex}}$	53,8 % від $З_{op}$	375,35
6.	Всього матеріальні витрати			1950,04

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
7.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	табл. 4.1	697,68
8.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	10 % від $З_{op}$	69,77
9.	Відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок)	B_c	22 % від $(З_{op} + З_{op})$	168,84
10.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші	$З_{\text{пр}}$	8,5% від $З_{op}$	50,93

	спеціальні витрати			
11.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.1	1962,61
12.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 4.1	983,86
13.	Загальновиробничі витрати	$B_{зав}$	141% від $З_{ор}$	983,72
14.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	1,4% від $З_{ор}$	9,77
15.	Виробнича собівартість інструменту	$C_{вир}$	Σст. 6-14	6877,0

4.3. Визначення витрат на випробування протяжки базовим методом

Випробовування дослідного зразка протяжки поводитья на гідравлічному пресі ПГ-100, технічні характеристики якого наведено у табл. 4.4.

Характеристика обладнання

Найменування обладнання	Модель	Габаритні розміри: довжина × ширина, м	Потужність електро-двигуна, кВт	Група ремонтної складності механічної/електричної частини, УРО	Площа в плані, м ²	Оптова ціна, грн.
1	2	3	4	6	7	8
Гідравлічний прес	ПГ-100	3,15×2,25	7,5	7/4,5	7,08	232500

Розрахунок витрат на випробування комбінованої протяжки виконуємо за формулою [82]:

$$B_{\text{в}} = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.7)$$

де $B_{\text{з}}$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди випробувача, грн.;

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

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

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

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

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

$B_{\text{н}}$ – витрати на налагодження пресу, грн.;

$B_{\text{накл}}$ – накладні витрати, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди інженера-випробувача:

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60} \cdot (1 + K_{\text{д}}) \cdot (1 + K_{\text{с}}), \quad (4.8)$$

де $C_{\text{г}}$ – середньогодинна заробітна плата інженера-випробувача, грн./год.;

$T_{\text{в}}$ – середній час випробування протяжки, хв.;

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

$$B_{\text{з}}^{\text{баз}} = 59,398 \cdot (4/60) \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 4,7774 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.9)$$

де: N_b – встановлена потужність електродвигунів преса, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів ($K_o=0,6...1,3$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю ($K_N=0,5...0,6$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d=0,6...0,7$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86...0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92...0,96$);

$\Pi_{\text{сел}}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_e^{\text{баз}} = \frac{4 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{4}{60} \cdot 4,21 = 0,2820 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мд}} = \frac{M_{\text{дм}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{в}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.10)$$

де $M_{\text{дм}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини обладнання, коп.;

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

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва.

$$B_{\text{мд}}^{\text{баз}} = \frac{29,5 \cdot 7,0 \cdot 4}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,0138 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт пресу:

$$B_p = \frac{R_{\text{м}} \cdot P_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot P_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.11)$$

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

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи преса (при однозмінному режимі роботи для серійного виробництва)

$$B_p^{баз} = \frac{7 \cdot 680 + 4,5 \cdot 520}{1975} \cdot \frac{4}{60} = 0,2397 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{уп} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_v}{60}, \quad (4.12)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає прес, m^2 ;

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

C – річні витрати, пов'язані з використанням $1m^2$ виробничого приміщення, грн./ m^2 .

$$B_{уп}^{баз} = \frac{7,1 \cdot 3,5 \cdot 480}{1975} \cdot \frac{4}{60} = 0,4026 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію пресу:

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a}{F_{дрм} \cdot 100} \cdot \frac{T_v}{60}, \quad (4.13)$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{бал}$ – балансова вартість пресу, грн., визначається за формулою:

$$\Phi_{бал} = \Pi_{опт} \cdot (1 + K_{тр} + K_m + K_{\phi}), \quad (4.14)$$

де $\Pi_{опт}$ – оптова ціна пресу, грн.;

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

$$\Phi_{бал}^{баз} = 232500 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 276675 \text{ грн.}$$

$$B_a^{баз} = \frac{276675 \cdot 15 \cdot 4}{1975 \cdot 60 \cdot 100} = 1,4009 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження пресу:

$$B_n = C_{гн} \cdot (1 + K_{\delta}) \cdot (1 + K_c) \cdot \frac{T_{нал} \cdot A}{60 \cdot N_{\delta}}, \quad (4.15)$$

де $C_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн./год.;

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{нал}$ – час налагодження, хв.;

N_{δ} – річна програма випробування інструменту, шт./рік.

$$B_{н} = 71,922 \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) \cdot \frac{15 \cdot 12}{60 \cdot 50} = 5,7912 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Витрати на випробування інструменту

№ п/п	Стаття витрат	Умовне позначення	Величина
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	B_z	4,7774
2.	Силовa електроенергія	B_e	0,2820
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\delta m}$	0,0138
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,2397
5.	Утримання приміщення	B_{yn}	0,4026
6.	Амортизація обладнання	B_a	1,4026
7.	Налагодження обладнання	$B_{н}$	5,7912
Загальна сума витрат на випробування		B_{ϵ}	12,909

4.4. Витрати на застосування моделюючої програми

Вихідні дані для розрахунку зведено до табл. 4.6.

Вихідні дані для розрахунку

№ п/п	Показники	Позна- чення	Одиниця виміру	Величина
1	2	3	4	5
1	Вартість технічних засобів (ПК)	$B_{пк}$	грн.	27600
2	Норма амортизації на реновацію ЕОМ	$H_{ам.пк}$	%	50
3	Норма амортизації на реновацію приміщення	$H_{ам.пр}$	%	5
4	Нормативний коефіцієнт ефективності	E_n		0,16
5	Річний фонд часу роботи оператора ПК	$F_{ч.оп}$	год.	1864

Продовження таблиці 4.6

1	2	3	4	5
6	Коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату	K_{δ}		0,1
7	Коефіцієнт, який враховує єдиний соціальний внесок	$K_{соц}$	%	0,22
8	Площа, яку займає робоче місце оператора	$S_{пк}$	м ²	4
9	Вартість 1кВ-год. електроенергії	$\Pi_{ел}$	грн.	4,21
10	Потужність технічних засобів (ПК і принтера)	N_k	кВт	0,6
11	Річні витрати на ремонт і технічне обслуговування ПК	$B_{р.пк}$	грн.	1470
12	Вартість 1 м ² виробничої площі	Π_n	грн.	3750
13	Витрати на придбання ліцензії на використання програми	$B_{п.з}$	грн.	702000
14	Кількість робочого часу на організацію підготовчих робіт, навчання персоналу та впровадження системи	H_o	год.	90
15	Коефіцієнт, який враховує накладні витрати	$K_{нак}$		65
16	Вартість носіїв інформації	$B_{н.інф}$	грн.	675
17	Кількість деталей на рік, конструкцію і техпроцес обробки яких необхідно змодельовати	N_{δ}	шт.	50
18	Витрати на утримання 1м ² приміщення	$B_{пр}$	грн.	480
19	Вартість господарчого інвентарю	$B_{інв}$	грн.	2950
20	Оклад оператора ПК	O_n	грн./міс.	17400
21	Час на організаційні роботи з ПК	$H_{о.пк}$	год.	8

22	Середньогодинна зарплата оператора ПК	$Z_{год.оп}$	грн./год.	98,864
23	Витрати на матеріали оператора ПК	B_m	грн.	428,6
24	Річний фонд роботи ПК	$F_{пк}$	год.	1800
25	Середні витрати часу на моделювання конструкції деталі і техпроцесу	$t_{пк}$	год.	20
26	Вартість принтера	$B_{пр}$	грн.	18000

4.4.1. Витрат на впровадження моделюючої програми визначаємо за формулою:

$$K_{пр} = K_{пт} + K_{т.з}, \quad (4.16)$$

де: $K_{пт}$ – витрати на придбання, налагодження, генерацію прикладної програми:

$$K_{пт} = B_{п.з} + B_{п.інф} + B_{опр}, \quad (4.17)$$

де: $B_{п.з}$ – витрати на придбання програмних засобів (ліцензії) та їх генерацію;

$B_{п.інф}$ – витрати на придбання носіїв інформації;

$B_{опр}$ – витрати на організацію підготовчих робіт по впровадженню програми. Визначається на основі трудомісткості виконання організаційно-підготовчих робіт та середньо-годинної заробітної плати оператора ПК:

$$B_{опр} = H_{о.еом} \cdot Z_{год.оп} = 90 \cdot 98,864 = 8897,76 \text{ грн.}$$

де: $H_{о.еом}$ – час на організаційні роботи, год.;

$Z_{год.пр}$ – середньогодинна зарплата оператора, грн./год.

$$K_{пт} = 702000 + 675 + 8897,76 = 711572,76 \text{ грн.}$$

$K_{т.з}$ – вартість технічних засобів, що використовуються у даному проєкті:

$$K_{т.з} = B_{пк} + B_m + B_{пр} + B_{інв}, \quad (4.18)$$

де: $B_{пк}$ – вартість ПК, грн.;

B_m – вартість матеріалів, грн.;

$B_{пр}$ – вартість принтера, грн.;

$B_{інв}$ – вартість господарського інвентарю, грн.

$$K_{т.з} = (27600 + 428,6 + 18000 + 2950) \cdot 0,55 = 26938,23 \text{ грн.}$$

Вартість усіх перелічених технічних засобів враховує коефіцієнт завантаження даною програмою, який визначається за формулою:

$$K_{зав} = \frac{N_{\partial} \cdot t_{еом}}{F_{еом}}, \quad (4.19)$$

де: $t_{нк}$ – час, який у середньому витрачається на моделювання конструкції деталі і техпроцесу її обробки, год.

$$K_{зав} = \frac{50 \cdot 20}{1800} = 0,55$$

Таким чином, капітальні витрат на впровадження моделюючої програми:

$$K_{np} = 711572,76 + 26938,23 = 738511 \text{ грн.}$$

4.4.2. Витрати на експлуатацію прикладної програми розраховуємо за формулою:[12,13]

$$B_{np} = \sum B_i, \quad (4.20)$$

де: B_{zn} – витрати на основну та додаткову заробітну плату оператора з урахуванням єдиного соціального внеску, грн.;

$B_{ам.тз}$ – витрати на амортизацію технічних засобів, грн.;

$B_{ел}$ – витрати на електроенергію для технічних засобів САПР, грн.;

$B_{рем}$ – витрати на технічне обслуговування та ремонт, грн.;

$B_{ам.пр}$ – витрати на амортизацію приміщення, грн.;

B_n – накладні витрати, грн.

Річні витрати на заробітну плату оператора:

$$B_{zn} = O_n \cdot (1 + K_{\partial}) \cdot (1 + K_{соц}) \cdot \chi_{оп} \cdot 12, \quad (4.21)$$

де: $\chi_{оп}$ – чисельність операторів для роботи з даною програмою, осіб:

$$\chi_{оп} = \frac{N_{\partial} \cdot t_{нк}}{F_{\chi.оп}} = \frac{50 \cdot 20}{1864} = 1,0 \text{ особа} \quad (4.22)$$

$$B_{zn} = 17400 \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot 1 \cdot 12 = 280209,6 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію технічних засобів (ПК та принтера):

$$B_{ам.мз} = \frac{B_{нк} \cdot H_{ам.нк} + B_{пр} \cdot H_{ам.пр}}{100} = \frac{(27600 + 18000) \cdot 50}{100} = 22800 \text{ грн.} \quad (4.23)$$

Витрати на електроенергію:

$$B_{ел} = N_k \cdot \Pi_{ел} \cdot F_{пх} \cdot K_{зов} = 0,6 \cdot 4,21 \cdot 1800 \cdot 1,11 = 4547,91 \text{ грн.} \quad (4.24)$$

Витрати на технічне обслуговування та ремонт:

$$B_{рем} = B_{р.нк} \cdot K_{зов} = 14700 \cdot 1,11 = 2398,6 \text{ грн.} \quad (4.25)$$

Витрати на амортизацію приміщення:

$$B_{ам.пр} = S_{пх} \cdot \Pi_n \cdot H_{ам.пр} \cdot K_{зов} = 4 \cdot 3750 \cdot 0,05 \cdot 1,11 = 832,5 \text{ грн.} \quad (4.26)$$

Розрахунок загальних поточних витрат на експлуатацію прикладної програми зведемо до табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Поточні витрати (річні) на експлуатацію прикладної програми

№ п/п	Стаття витрат	Умовне позначення	Величина
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	$B_{зп}$	280209,6
2.	Амортизація технічних засобів	$B_{ам.мз}$	22800
3.	Електроенергія	$B_{ел}$	4547,91
4.	Ремонт і технічне обслуговування технічних засобів	$B_{рем}$	2398,6
5.	Амортизація приміщення	$B_{ам.пр}$	832,5
Загальна сума витрат		$B_{пр}$	310788,6

4.5. Річний економічний ефект від застосування програми

Річний економічний ефект від застосування програми розраховується за формулою:[12]

$$E_p = E - E_n \cdot K_\delta, \quad (4.27)$$

де: E – річна економія від застосування програми, грн;

$$E = (C_{вир} + B_{\epsilon}) \cdot N_{ин} - B_{пр}, \quad (4.28)$$

де: $C_{вир}$ – виробнича собівартість виготовлення дослідного зразка комбінованої протяжки базовим способом, грн.;

B_{ϵ} – витрати на випробування протяжки базовим способом, грн.;

$N_{ин}$ – річна програма виготовлення інструменту з урахуванням додаткових дослідних зразків у випадку, якщо результати випробування виявили помилки, допущені при проектуванні та виготовленні інструменту, шт./рік;

$B_{пр}$ – річні поточні витрати на експлуатацію прикладної програми, грн.

$$E = (6877 + 12,909) \cdot 250 - 310788,6 = 1411688,7 \text{ грн.}$$

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат;

K_{δ} – додаткові капітальні витрати при впровадженні програмного забезпечення, грн., розраховуються за формулою:

$$K_{\delta} = K_{пр} - ((B_{нк} + B_m) \cdot N_{\delta} + B_{обл} + B_{осн}), \quad (4.29)$$

де: $K_{пр}$ – капітальні витрати на впровадження моделюючої програми, грн.;

$B_{нк}$, B_m – відповідно витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва комбінованої протяжки у базовому варіанті, грн.;

$B_{обл}$, $B_{осн}$ – відповідно вартість обладнання та оснащення (що належить до основних фондів), застосовуваного для виготовлення та випробування інструменту в базовому варіанті, грн.

Розрахунок вартості обладнання у базовому варіанті зведено до табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Балансова вартість обладнання та оснащення у базовому варіанті

– № з/п	– Найменування обладнання	– Опт ова ціна, грн.	– Кількі сть, шт.	– Баланс ова вартість, грн.
– 1	– Токарно-гвинторізний верстат 16K20	– 2236 00	– 1	– 266084
– 2	– Універсальний фрезерний верстат 676	– 3956 00	– 1	– 470764

– 3	– Круглошліфувальний верстат 3М132	– 670800	– 1	– 798252
– 4	– Гідравлічний прес ПГ-100	– 232200	– 1	– 276318
– 5	– Алмазний круг	– 13480	– 1	– 16041,2
–	– Всього	–	– -	– 1827459

$$K_o = 738511 - ((14661,06 + 15248,44) \cdot 50 + 1827459) = -1495475 \text{ грн.}$$

Таким чином, річний економічний ефект від використання програми:

$$E_p = 1411688,7 - 0,16 \cdot (-1495475) = 1651000 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків підсумкових показників ефективності використання моделюючої програми зведено до табл. 4.9.

Таблиця 4.9

Результати розрахунку економічної ефективності використання програми

Показник	Одиниця	Варіант	
		базовий	проектний
Кількість комбінованих протяжок на рік, конструкцію і техпроцес обробки яких необхідно змоделювати	шт./рік	-	50
Річна програма виготовлення дослідних зразків комбінованих протяжок	шт./рік	50	-
Річні експлуатаційні витрати, у тому числі	грн.	344496	310789
- на виготовлення дослідного зразка протяжки	грн.	343850	-
- на випробування протяжки	грн.	646	-
- на експлуатацію моделюючої програми	грн.	-	310789
Капітальні витрати	грн.	3322934	738511
Річний економічний ефект	грн.	-	1651000
Чисельність працівників, у тому числі:		6	1
- робітників	осіб	5	-
- випробувачів	осіб	1	-
- операторів ПК		-	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акименко Ю.А. Напряженно-деформированное состояние при дорновании деталей в обойме [Текст] / Ю.А. Акименко // Исследование технологических процессов упрочняюще–калибрующей и формообразующей обработки металлов. – Ростов на Дону : РИСХМ. – 1970.– С. 28–34.
2. Алямовский А.А. «SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов» [Текст] / А.А. Алямовский // Москва, 2004. – 421 с.
3. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. Пер. с англ. [Текст] / Д. Бакли // – М. :Машиностроение, 1986.–360 с.
4. Базанов М.А. Обработка на предприятиях отрасли деталей типа втулка протяжками с твердосплавными деформирующими элементами [Текст] / М.А. Базанов, А.Ф. Остроухов, В.П. Монченко // Внедрение инструмента и технологической оснастки, оснащенных твердыми сплавами и технология их изготовления. – Ташкент, 1972. – С. 9-11.
5. Белый В.А. Подбор материалов для трущихся деталей [Текст] / В.А. Белый, А.И. Свириденюк // Трение, изнашивание и смазка. –М: Машиностроение, 1978.-Т1-с. 127-159
6. Белов С.В. Предисловие к сборнику «Новые протяжные станки и прогрессивные методы протягивания» [Текст] // С.В. Белов // НИИМаш, М., 1966.
7. Бобров В.Ф. Упрочнение и чистота поверхности при обработке медистого чугуна шариковыми головками [Текст] / В.Ф. Бобров, С.С. Лябер, Я.Ф. Енджчак // Станки и инструмент.-1975.-№12.-с.27–28

8. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел. Пер. с англ. [Текст] / Ф. Боуден, Д. Тейбор // -М.: Машиностроение, 1968.–544 с.
9. Вейсалов Г.М. Опыт эксплуатации сборных протяжек [Текст] / Г.М. Вейсалов // Синтет. алмазы. -1970 .-Вып. I. -с. 17-18.
10. Верлин В.И. Износостойкость чугуновых отверстий упрочненных выглаживанием [Текст] / В.И. Верлин // Машиностроитель.-1981.-№6.-с. 18–19
11. Воронков В.Д. Подшипники сухого трения [Текст] / В.Д. Воронков // - М. Машиностроение, 1980.–224 с.
12. Гельфонд М.И. Протяжной инструмент с твердосплавными деформирующими элементами [Текст] / М.И. Гельфонд, А.И. Репьев // Машиностроитель. – 1977. – №6. – С. 22–23.
13. Гоголицын М.А. Повышение долговечности цилиндров двигателей внутреннего сгорания дорнованием [Текст] / М.А. Гоголицын, А.А. Козин // Вест. машиностроения. -1986. №4. -с. 58-59
14. Горбачевич А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / А.Ф. Горбачевич, В.А. Шкред // Минск, Высшая школа, 1984.
15. Грановский Г.И. Расчет и конструирование протяжек [Текст] / Г.И. Грановский // – М. : Машгиз. – 1960. – 252 с.
16. Губанов А.П. Вибровихревой метод упрочняюще-чистовой обработки деталей машин [Текст] / А.П. Губанов, М.Б. Житомирский // Технол. и автоматиз. произв. процессов в машиностр. - Пенза.–1979–№8.–с. 58-59.
17. Добровольский Г.Г. Коэффициент трения при деформирующем протягивании [Текст]/ Г.Г. Добровольский // Физические явления при деформирующем протягивании и резании пластичных металлов. - Киев: ИСМ АН-УССР, 1978.– с. 22-30

18. Елизаветин М.А. Технологические способы повышения долговечности машин [Текст] / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель // М. Машиностроение 1979. -438с.

19. Иконников В.И. Повышение износостойкости чугуновых деталей пластическим деформированием [Текст] / В.И. Иконников // Вестн. машиностроения.-1970.-№6.-с. 39-40

20. Исаев В.А. Исследование и оптимизация обработки гильз двигателей ЗМЗ-24 методом поверхностно-пластического деформирования. Автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / В.А. Исаев // М., 1981-19 с.

21. Кацев П.Г. Обработка протягиванием [Текст] / П.Г. Кацев // Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. - 272 с.

22. Каледин Б.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием [Текст] / Б.А. Каледин, Л.А. Чепа // Минск: Наука и техника, 1974-232 с.

23. Розенберг А.М. Качество поверхности обработанной деформирующим протягиванием [Текст] / А.М. Розенберг, О.А.Розенберг, Э.И. Гриценко, Э.К. Посвятенко // Киев: Наук, думка, 1977.-188 с.

24. Кобзарь Е.П. Упрочнение чугуновых гильз раскаткой шариками [Текст] / Е.П. Кобзарь // Вестн. Машиностроения.-1965.-№6. -с.50-51

25. Колкер Л.Д. Чистовая обработка отверстий в чугуновых деталях холодным пластическим деформированием [Текст] / Л.Д. Колкер // Киев: Техника, 1972.-13с.

26. Коновалов Е.Г. Сборные твердосплавные протяжки [Текст] / Е.Г. Коновалов, Э.Е. Рабинович // Синтет. алмазы.– 1970. – Вып. 4. – С. 15–17.

27. Коновалов Е.Г. Чистовая и упрочняющая обработка поверхностей [Текст] / Е.Г. Коновалов, В.А.Сидоренко // Минск: Высшая школа, 1968.-364 с.

28. Крагельский И.В. Узлы трения машин [Текст] / И.В. Крагельский, И.М. Михин // М.: Машиностроение, 1980.-280 с.
29. Крицкий А.Д. Особенности разработки твердосплавных деформирующих протяжек для обработки отверстий в деталях из труднообрабатываемых металлов и сплавов: Автореф. дис...канд. техн. наук [Текст] / А.Д. Крицкий // Киев, 1983.-26с.
30. Кудрявцев Л.Б. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин [Текст] / Л.Б. Кудрявцев // М.: Машиностроение, 1969.-100с.
31. Кузнецов А.М. Обработка комбинированным протягиванием круглых отверстий в деталях из вязких материалов [Текст] / А.М. Кузнецов, А.З. Марин // Автомобильная промышленность.-1970.-№4. -С. 33-35.
32. Кузнецов А.М. Проблемы и перспективы развития деформирующего протягивания [Текст] / А.М. Кузнецов // Новые сверхтвердые материалы и прогрессивные технологии их применения : Тез. докл. всесоюзн. науч.-тех. конф. Канев, сент. 1985г. – Киев, 1985. – С. 161–163.
33. Маргулис Д.К. Протяжки для обработки отверстий [Текст] / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.И. Ашихмин и др.// – М. : Машиностроение, 1986. – 232 с.
34. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости [Текст] / М.П. Марковец // М. : Машиностроение ,1979.-191 с.
35. Монченко В.П. Дорнование отверстий в длинных гильзах и втулках [Текст] / В.П. Монченко // – М. : НИИАвтопром, 1967. – 112 с.
36. Немировский Я.Б. Точность отверстий, обработанных протяжками с групповым расположением деформирующих элементов [Текст] / Я.Б. Немировский // Синтез и применение сверхтвердых материалов : сб. науч. тр. / [отв. ред. П.С. Кислый]; АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов. – К., 1981. – С. 80–87.

37. Новиков Н.В. Об экспериментальном подтверждении усиленного постулата идеальной пластичности при монотонном нагружении [Текст] / Н.В. Новиков, В.И. Левитас // Докл. АН УССР. Сер. А 1984.-№2.-с.42-46

38. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д.Д. Папшев // М. :Машиностроение, 1978.-151 с.

39. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обработкой шариками [Текст] / Д.Д. Папшев // М. :Машиностроение, 1978.-132 с.

40. Паршин В.С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D [Текст] / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. / Учебное пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с..

41. Подураев В.Н. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием [Текст] / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева // Вестн. машиностроения.-1971.-№4.-с. 64–65

42. Позднякова И.В. Исследование процесса дорнования малопластичных материалов [Текст] / И.В. Позднякова, А.Я. Кривонос // Размерно-чистовая и упрочняющая обработка поверхностным деформированием. Материалы семинара М.: МС и П, 1968.-с. 109-115

43. Позднякова И.В. Применение дорнующих протяжек при обработке чугуна [Текст] / И.В. Позднякова, А.Я. Кривонос // Протяжной инструмент: Материалы конф. -Челябинск 1969. –с. 48-51

44. Попов Е.А. Основы теории обработки металлов давлением Под. ред. М.В. Сторожева [Текст] / Е.А. Попов // М.:Машгиз,1959, гл.9,10.-с. 369-460

45. Посвятенко Э.К. Исследование обрабатываемости металла, упрочненного черновым деформирующим протягиванием :Автореф. дис...канд. техн. наук [Текст] / Э.К. Посвятенко // Киев, 1974.-29 с.

46. Проскуряков Ю.Г. Объемное дорнование отверстий [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев // М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

47. Проскуряков Ю.Г. Фактическая площадь контакта обработанных дорнованием поверхностей [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, И.В. Позднякова // Технология чистовой и отделочной обработки поверхностей деталей. - Челябинск: Изд-во Челябинского политехн. ин-та, 1960.-с. 50-54

48. Проскуряков Ю.Г. Чистовая обработка отверстий длинных гильз гидроцилиндров дорнованием с большими натягами по схеме растяжения [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, Л.В. Попов, В.Н. Романов // Размерная, чистовая и упрочняющая обработка поверхностном пластическим деформированием деталей тракторов и сельхозмашин. Тр. НИИТракторосельхозмаша. -К.:ОНТЭИ, 1971.-с.32-37.

49. Проскуряков Ю.Г. Тяговые усилия при обработке цилиндрических отверстий многозубыми дорнами [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, Я.А. Симахин // Вестн. машиностроения. -1964. -№4. –с. 65-68

50. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю.Г. Проскуряков // М. Машиностроение, 1971,-208.

51. Проскуряков Ю.Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки :Справ. пособ [Текст] / Ю.Г. Проскуряков // М. Машиностроение, 1965 –205 с.

52. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий деталей [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, В.И. Федотов, // Машиностроитель.-1971.-№7.-с.34.

53. Проскуряков О.Г. Контактные давления при дорновании отверстий с большими натягами [Текст] / Ю.Г. Проскуряков, Г.И. Шельвинский // Исследование технологических процессов упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. -Ростов н/Д: РИСХМ, 1970.-с. 20-27.

54. Д.К. Маргулис Протяжки для обработки отверстий [Текст] / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.И. Ашихмин и др. // М.: Машиностроение, 1986.- 232 с.

55. Рабинович Э.Е. Исследование провеса протягивания отверстий в чугунных деталях твердосплавными протяжками: Автореф. дис...канд. техн. наук [Текст] / Э.Е. Рабинович // Минск, 1968.-23 с.

56. Розенберг А.М. Расчет сил протягивания отверстий твердосплавной деформирующей протяжкой [Текст] /А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, А.Д. Крицкий, Ю.Ф. Бусел // Киев: Наук.думка, 1975.-56 с.

57. Резание металлов и инструмент /Под. ред. А.М. Розенберга [Текст] / А.М. Розенберг и др. // М.: Машиностроение, 1964.-228 с.

58. Розенберг А.М. Деформирующее протягивание – высокопроизводительный и экономичный процесс обработки цилиндрических отверстий в автоматизированном производстве [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг // Автоматизация процессов литья и обработки давлением. – М.: Наука 1979. – С. 111–117.

59. Розенберг А.М. Твердосплавные протяжки для обработки отверстий методом пластического деформирования [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Д.А. Сирота // Киев: Укр.НИИНТИ, 1968.-40 с.

60. Розенберг А.М. Обработка отверстий твердосплавными выглаживающими протяжками [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг // – Киев : Техника, 1966. – 62 с.

61. Розенберг О.А. Методика определения коэффициента трения при деформирующем протягивании и его зависимость от основных факторов процесса [Текст] // О.А. Розенберг, Ю.Ф. Бусел, А.Д. Крицкий // Физические явления при деформирующем протягивании и резании пластичных металлов. - Киев: ИСМ АН УССР, 1978.-с.3-22.

62. Розенберг О.А. Взаимодействие инструмента с изделием при деформирующем протягивании и создание оптимальных конструкций твердосплавных протяжек [Текст] / О.А. Розенберг // Повышение эффективности обработки металлов протягиванием: Тез. докд. Всесоюзн. научн.-техн. конф., Челябинск, окт.1978 г –М.; ЦПНТО Машпрома,1978.-с. 18-26

63. Розенберг О.А. Применение твердых смазок для изучения контактного и силового взаимодействия при деформирующем протягивании [Текст] / О.А. Розенберг, А.Д. Крицкий // Повышение эффективности протягивания.–Рига: Рижск. Политехн. ин-т, 1986. -с. 149-156

64. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании [Текст] / О.А. Розенберг // Киев: Наук. думка, 1981.-288 с.

65. Розенберг О.А. Современное состояние вопроса деформирующего протягивания [Текст] / О.А. Розенберг, А.М. Розенберг // Повышение эффективности протягивания. – Рига : Рижск. Политехн. ин-т, 1986. – С. 107–116.

66. Розенберг О.А. Исследование твердости серого чугуна в приложении к процессу резания [Текст] / О.А. Розенберг, А.Л. Байкалов // Известия Томского политехнического института.-Т.96, 21 (отд. оттиск). -Изд-во Томского ун-та, 1961.

67. Прочность твердосплавных рабочих элементов деформирующих протяжек [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Ю.Ф. Бусел, А.Д. Крицкий; УкрНИКТИССМИ. – К., «Техніка», 1971. – 124 с.

68. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.К. Посвя-тенко и др. / АН УССР. ИСМ. – К. : Наук. думка, 1978. – 256 с.

69. Розенберг А.М. Расчет на прочность деформирующих элементов протяжек [Текст] / А.М. Розенберг, Л.В. Лобанова, С.Б. Полотняк // Повышение эффективности протягивания. – Рига : Рижский политехн. ин-т, 1986. – С. 157–169.

70. Розенберг А.М. Схема деформации при протягивании [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, А.Д. Крицкий, Ю.Ф. Бусел // Прикл. механика.-1974.-№2-с. 107-111

71. Розенберг А.М. Тензометрическое устройство и метод определения коэффициента трения при деформирующем протягивании [Текст] / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, А.Д. Крицкий, Ю.Ф. Бусел // Кузнечно-штамповое пр-во,-1978.-№7.-с. 18-20

72. Торбыло В.М. Алмазное выглаживание [Текст] / В.М. Торбыло // М.: Машиностроение, 1972.-105 с.

73. Торбыло В.М. Качество и износостойкость поверхности, выглаженной алмазным инструментом [Текст] / В.М. Торбыло // Автомобильная промышленность . -1967. -№3. -с. 33-39.

74. Лапиро А.А. Влияние поверхностного упрочнения на усталостные свойства ковкого чугуна [Текст] / А.А. Лапиро, О.С. Фролов, В.С. Данилина // Вестн. машиностроения.-1970.-№6.-с. 41-42

75. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением [Текст] / Ю.Г. Шнейдер // М. :Машгиз, 1963.-257 с.

76. Щеголев А.В. Конструирование протяжек [Текст] / А.В. Щеголев // М.-Л.: Машгиз, 1952.-320 с.

77. Чернявський О.В. Обробка круглих отворів протягуванням [Текст]/ О.В. Чернявський // Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2008 – 72 с.

78. Чернявский А.В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из чугуна деформирующим протягиванием: автореф. дис. на соискание

степени канд. техн. наук спец. 05.03.01 «Процессы механической и физико-химической обработки, станки и инструмент» / А.В. Чернявский // – Киев, 1988. – 17 с

79. Bowden F. The friction and lubrication of solide [Текст] / F. Bowden and D. Tabor //Vol. 2, Oxford clarendon press, 1964.–p.115

80. Holinsky R. Experimental study of the lubricating mechanism of molybdenum disulphide [Текст] / R. Holinsky // In. proc. internet. conf. solid lubrication.– Denver ASLE. 1971.–p. 70-73

81. Цеханов Ю.А. Механика процесса деформирующего протягивания: Дисс. канд. техн. наук. – Воронеж, 1974 г.

82. Расчеты экономической эффективности новой техники [Текст] / Справочник, 2-е издание, дополненное и переработанное // Под. ред. К.М. Великанова – Л., Машиностроение, 1990.–358 с.