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

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

«Підвищення ефективності роботи протяжного інструмента для обробки деталей типу втулка»
«Increasing the efficiency of the broaching tool for processing bushing-type parts»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року магістратури групи ГМ-23М-3
ОПП «Галузеве машинобудування»
Спеціальності
133 «Галузеве машинобудування»
_____ Олександр МЕЗЕНЦЕВ

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

Рецензент: д.т.н., професор
_____ Ігор ШЕПЕЛЕНКО

Кропивницький – 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2025 р.

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

ЗДОБУВАЧА
Олександра МЕЗЕНЦЕВА
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Підвищення ефективності роботи протяжного інструмента для обробки деталей типу втулка

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

3. Строк подання роботи до захисту « 20 » травня 2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

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

Завдання:

– вивчити процеси, що відбуваються в зоні контакту деформуючого елемента протяжки та оброблюваної поверхні деталей типу втулка із різних конструкційних матеріалів за допомогою методу кінцевих елементів у програмних середовищах SolidWorks та Deform;
– визначити методи та засоби деформуючого протягування круглих отворів в деталях типу втулка;
– розробити вдосконалений метод моделювання процесу деформуючого протягування в деталях типу втулка;
– розробити рекомендації для виготовлення вдосконаленого протяжного інструменту;
– провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання вдосконаленого інструменту;
– розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Лютий 2025	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Лютий 2025	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Лютий-березень 2025	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Березень 2025	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Квітень 2025	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Травень 2025	вик.
7	Графічна частина та оформлення	Травень 2025	вик.
8			
9			
10			

Дата видачі завдання «_03_» __лютого__ 2025 р.

Керівник роботи _____ Павло ЄРЬОМІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_03_» _лютого_ 2025 р.

Здобувач _____ Олександр МЕЗЕНЦЕВ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Мезенцев О.О.

Підвищення ефективності роботи протяжного інструмента для обробки деталей типу втулка.
Вип. квал. роб. – ЦНТУ, 2025. – 95 с., 28 іл., бібліогр., 18 арк.

Із застосуванням сучасних програмних комплексів вдосконалена модель процесу деформуючого протягування отворів у деталях типу втулка із найбільш розповсюджених конструктивних матеріалів, а саме – сірого чавуну СЧ20, сталей марок 20, 45 та латуні Л62, яка дозволяє аналітично методом кінцевих елементів визначати зміну форми деталі, напружений стан металу у середовищі деформації, а також енергетичні та силові параметри процесу.

Встановлено характерні особливості характеру зміни розмірів оброблюваного отвору в залежності від товщини стінки та матеріалу деталі типу втулка. Підтверджено, що зміна кінцевого розміру отвору, а також деформація втулок по торцям залежить від механічних характеристик оброблюваного матеріалу та заданих геометричних параметрів робочого деформуючого елемента протяжки. Проведені дослідження підтверджують адекватність створеної моделі реальному процесу обробки.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень при вдосконаленні конструкції, виробництві та подальшій експлуатації запропонованого протяжного інструменту складає 2934000 грн.

Актуальність: Проведені дослідження процесу протягування отворів у деталях типу втулка з використанням програмних комплексів, що використовують метод кінцевих елементів, дозволили підібрати раціональні параметри протяжного інструмента, а саме – геометричні параметри його робочих елементів та їх взаємне розташування у складі модульної конструкції деформуючої прошивки.

Практичне значення: Отримані результати моделювання дозволяють вдосконалювати технологічний процес та протяжний інструмент для даного виду

обробки металів, а також оцінити ефективність використання наявних протяжних верстатів та гідравлічних пресів для деформуючого протягування за даною схемою.

Ключові слова: деформуюче протягування, метод кінцевих елементів, енергосилові параметри, втулка, сірий чавун, сталь, латунь.

Summary

Mezentsev Oleksandr. Increasing the efficiency of the broaching tool for processing bushing-type parts. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, 2025. - 95 p. Presentation materials 18 slides.

Using modern software packages, an improved model of the process of deforming broaching of holes in sleeve-type parts made of the most common structural materials – namely grey cast iron, steels grades 20 and 45, and brass L62 – has been developed. This model allows for analytical determination using the finite element method of shape changes in the part, the stress state of the metal in the deformation zone, as well as energy and force parameters.

Characteristic features of the change in dimensions of the processed hole depending on the wall thickness and the material of the sleeve-type part have been identified. It has been confirmed that the change in the final size of the hole, as well as the deformation of the bushings at the ends, depends on the mechanical characteristics of the processed material and the specified geometric parameters of the working deforming element of the broach. The conducted studies confirm the adequacy of the developed model to the real processing procedure.

The expected annual economic effect from the implementation of research results in improving the design, production and further operation of the proposed drawing tool is 2,934,000 UAH.

Relevance: The studies of the broaching process of holes in sleeve-type parts using software based on the finite element method enabled the selection of optimal parameters of the broaching tool, particularly the geometric parameters of its working elements and their mutual arrangement within the modular design of the deforming broach.

Practical significance: The obtained modeling results allow for improvement of the technological process and the broaching tool for this type of metal processing, as well as for evaluating the efficiency of using existing broaching machines and hydraulic presses for deforming broaching based on this method.

Keywords: deforming broaching, finite element method, energy-force parameters, sleeve, grey cast iron, steel, brass.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень термінів ……. 8
Вступ 9
1. Огляд та аналіз літературних джерел, мета та завдання роботи 11
1.1. Сутність процесу деформуючого протягування 11
1.2. Деформуюче протягування матеріалів із обмеженою пластичністю та його особливості 18
1.3. Використання змащувальних та охолоджуючих рідин при деформуючому протягуванні ……..... 22
1.4 Вплив основних параметрів процесу деформуючого протягування на точність форми та розмірів оброблюваних деталей ……... 27
1.5 Висновки, мета та задачі кваліфікаційної роботи ……..…….. 28
2. Методика проведення моделювання деформуючого протягування та обробки результатів експериментів …… 30
2.1. Взаємодія деформуючого елемента та поверхні оброблюваного отвору втулки 30
2.2. Методика дослідження методом кінцевих елементів ……..…… 33
2.3. Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних матеріалів ….. 35
2.4 Методика дослідження впливу параметрів деформуючого протягування на радиальні розміри обробленого внутрішнього отвору, а також на інтенсивність його деформацій та напружень його методом кінцевих елементів …… 37
2.5 Методика аналізу контактних взаємодій за допомогою COSMOSWorks . 43
3. Моделювання процесу обробки деформуючим протягуванням та розробка рекомендацій для вдосконалення конструкції збірного протяжного інструмента для обробки циліндричних отворів 46
3.1 Результати моделювання процесу обробки та графіки залежності розмірів в характерних точках обробленого циліндричного отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщин стінки втулки 46

3.2 Аналіз результатів масиву даних, які були отримані під час моделювання процесу деформуючого протягування циліндричних отворів у втулках із сталей 20,45 та латуні Л62 52
3.3. Інтенсивність деформації та напружень в характерних точках досліджувальних втулок із різних матеріалів 61
3.4 Характеристика вдосконаленої схеми збірної деформуючої прошивки для обробки циліндричних отворів та принцип дії інструменту ……..... 66
3.5 Рекомендації щодо вдосконалення конструкції збірної деформуючої прошивки ……..…… 69
4. Економічне обґрунтування доцільності використання запропонованого програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу виготовлення та випробування збірних деформуючих протяжок 73
4.1. Визначення витрат на підготовку виробництва прошивки …… 74
4.2. Визначення витрат на виготовлення прошивки в базовому варіанті 75
4.3. Визначення витрат на випробування деформуючої прошивки базовим методом 79
4.4. Витрати на застосування моделюючої програми 82
4.5. Річний економічний ефект від застосування програми 87
Загальні висновки …….. 90
Список літератури .....……..... 92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ ТЕРМІНІВ

ДЕ – деформуючий елемент

ДП – деформуюче протягування

МКЕ – метод кінцевих елементів

МОР – мастильно-охолоджуюча рідина

НДС – напружено-деформований стан

ОМ – оброблюваний матеріал

ОП – оброблена поверхня

ПКД – позаконтактна деформація

ХПД – холодне пластичне деформування

ХПКД – хвиля позаконтактної деформації

ФМВ – фізико-механічні властивості матеріалу деталі

V – лінійна швидкість різання деформуючого протягування, м/с

d_e – діаметр деформуючого елемента протяжки, мм

D_0, d_0, L_0, t_0 – відповідно зовнішній діаметр, діаметр отвору, довжина і товщина стінки заготовки, мм

$a_ф$ – натяг на деформуючий елемент, мм

α – кут робочого конуса деформуючого елемента, град

l_2, l_3, h_2 – відповідно: відстань до максимуму хвилі позаконтактної деформації, висота і довжина хвилі, мм

D, d, L, t – відповідно: зовнішній діаметр, діаметр отвору, довжина і товщина стінки обробленої втулки, мм

E – модуль Юнга, МПа

μ – коефіцієнт Пуассона

δ – відносне видовження, %

Вступ

Актуальність теми. Соціально-економічний розвиток сучасної України передбачає суттєву та всебічну технічну модернізацію всіх провідних галузей промисловості, що, у свою чергу, вимагає вирішення ряду важливих завдань.

Важливе місце у цьому процесі належить вітчизняній металообробній промисловості. Подальший розвиток машинобудування в Україні не може відбуватись без впровадження сучасних технологій, інноваційного обладнання та високоефективного інструменту. Саме їх комплексне використання дозволить істотно підвищити продуктивність праці, випуск конкурентоспроможної продукції, яка відповідає міжнародним стандартам, а також забезпечить раціональне використання дефіцитних ресурсів і матеріалів.

У сучасному машинобудуванні зростає попит на технології, що забезпечують високу точність, якість обробленої поверхні та підвищені експлуатаційні характеристики деталей. Одним із ефективних методів фінішної обробки отворів є деформуюче протягування (дорнування), яке забезпечує зміцнення поверхні, покращення геометричної точності та зниження шорсткості без зняття матеріалу. Завдяки високій продуктивності, зносостійкості, економічності та ряду інших переваг цей метод знайшов широке застосування в багатьох галузях машинобудування, особливо в умовах серійного виробництва.

Одним із найбільш ефективних відомих методів холодної пластичної обробки отворів у деталях типу втулка є деформуюче протягування з використанням твердосплавних робочих елементів. В ряді наукових робіт, виконаних відомими українськими вченими Андрієм Кузнєцовим, Юрієм Проскуряковим, Олександром та Олегом Розенбергами, Едуардом Посвятенко та ін., наведені результати досліджень процесу деформуючого протягування, його впливу на основні енергетичні та силові параметри процесу, а також характеристики якості і експлуатаційні показники обробленої поверхні деталей. Наведені рекомендації щодо проектування та виготовлення протяжного інструмента, а також параметри процеса протягування.

Однак, літературний огляд свідчить, що традиційні методи моделювання процесів обробки деформуючим протягуванням та проектування на основі їх результатів інструмента для обробки сталей або кольорових металів дуже затратні по часу та фінансам й потребують великої кількості кваліфікованих фахівців. В той же час, стримкий розвиток сучасної обчислювальної техніки та програмного забезпечення для неї дозволяє значно скоротити ці витрати, зокрема за допомогою моделювання процесів протягування методом кінцевих елементів (МКЕ) з урахуванням специфіки матеріалу деталі, геометрії інструмента, силових та температурних впливів, контактних умов тощо.

Удосконалення конструкції протяжного інструмента та оптимізація параметрів процесу деформуючого протягування (дорнування) потребують глибокого розуміння фізико-механічних процесів, що відбуваються в зоні обробки. У цьому контексті значну допомогу надають сучасні програмні комплекси, що базуються на методі кінцевих елементів. Використання МКЕ-моделювання дозволяє отримати вірогідну картину розподілу напружень, деформацій, контактних тисків і температур у процесі деформуючого протягування (дорнування), що є основою для науково обґрунтованого вдосконалення конструкції інструмента, підбору режимів обробки та підвищення ресурсу як інструменту, так і оброблюваних деталей. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності виробництва та якості готової продукції. Особливо актуальним є удосконалення процесу деформуючого протягування для деталей типу «втулка», виготовлених із таких поширених конструкційних матеріалів, як сірий чавун СЧ20, сталь 20, сталь 45 та латунь Л62.

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

1.1 Сутність процесу деформуючого протягування

Деформуючим протягуванням (надалі - ДП) є метод обробки циліндричних отворів у деталях шляхом одноразового або послідовного ступінчастого пластичного деформування оброблюваної поверхні (надалі – ОП) робочими елементами спеціальної форми. Також цей процес ще називають вигладжуючим протягуванням, він використовується у промисловості вже багато часу, починаючи з 1959 року. Процес ДП є обробкою циліндричних отворів в трубних заготовках або втулках із пластичних матеріалів типу сталей або кольорових сплавів, а також деяких марок чавунів локальним холодним пластичним деформуванням, при якому деформуючий інструмент (протяжка) переміщується з рівномірною швидкістю по твірній отвору за кінематичною схемою ковзання.

За рахунок натягу на кожний ДЕ та у цілому сумарного натягу на всі робочі елементи протяжки після обробки змінюються фізико-механічні та геометричні характеристики поверхні отвору, а також поверхневий шар та серцевина заготовки. Так, наприклад, у заготовках із безшовних труб звичайної точності за один робочий хід деформуючого інструмента можна отримати отвори 11…12 квалітетів точності. У процесі ДП із сумарною деформацією близько 10% за допомогою інструмента, що містить 3…5 деформуючих елементів (надалі – ДЕ), можливо досягти зростання твердості і мікротвердості поверхневого шару металу в 1,5…2,5 рази, а твердість серцевини трубчастої деталі збільшується на 10…30%. Багато науковців також відмічають появу у поверхневому шарі оброблених деформуючим протягуванням деталей залишкових напружень стиску та утворення характерної текстури [9]. За рахунок поділу сумарної деформації на декілька зон тертя ковзання, що супроводжують переміщення кожного ДЕ, початкова шорсткість отвору трубної заготовки зменшується до величини Ra=0,63 мкм. ДП змінює не тільки розміри отворів деталей із оброблюваних матеріалів (надалі – ОМ), але також й

зовнішній діаметр (він збільшується), а також й довжину (вона зменшується). При цьому погрішності геометрії отвору можуть частково переходити на зовнішню поверхню заготовки, оскільки обробка ДП, на відміну від процесів різання, не викликає появу стружки.

Зазвичай ДП застосовують як фінальний або напівфінальний етап після лезової та абразивної обробки внутрішніх поверхонь деталей. Робочі частини протяжок та дорнів для цього процесу спочатку виготовляли з загартованих інструментальних сталей. Однак, внаслідок низької зносостійкості деформуючих елементів і частих випадків так званого «схоплення» інструмента та ОМ, такий вид обробки обмежувався мінімальними натягами та деформаціями.

Істотний прорив в деформуючому протягуванні відбувся після освоєння випуску мінералокерамічних твердих сплавів та синтезу штучних алмазів у 1960–1961 роках, а також застосуванню кубічного нітриду бору. Розробка та подальше промислове впровадження інструментів з надтвердими абразивними частками дозволила значно розширити можливості деформуючого протягування та сфери його застосування.

Накопичений виробничий досвід і дослідження показали [7,9], що деформуюче протягування має ряд важливих відмінностей від різальних методів обробки, а саме:

– ДП забезпечує збереження структури металу без пошкодження його волокон, що суттєво покращує механічні характеристики деталі;

– ДП дозволяє досягати малої шорсткості ОП з високим коефіцієнтом опорної площі, що підвищує зносостійкість, полегшує роботу тертьових пар і покращує прироблення деталей із кольорових та в’язких металів;

– поєднання згладженої поверхні з її поверхневим зміцненням після обробки створює залишкові стискуючі напруження, що особливо важливо при циклічних навантаженнях;

– ДП дає можливість суттєво знизити шорсткість вже за один прохід, що робить процес дуже продуктивним.

Простота конструкції інструментів, надійність та стабільність обробки деформуючим протягуванням дозволяють впроваджувати цей метод у різні виробничі умови. Висока зносостійкість робочих елементів протяжок забезпечує постійну якість обробки, що створює передумови для автоматизації процесу та можливість залучення робітників, які мають невисоку кваліфікацію.

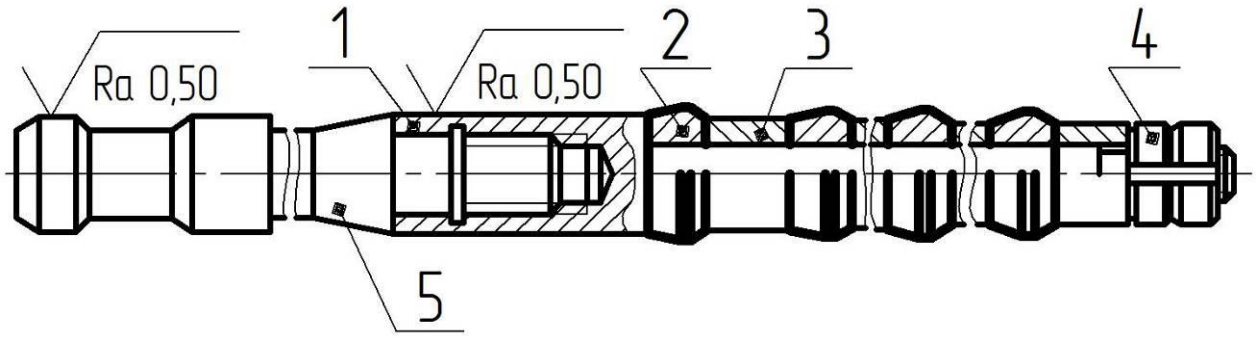


Рисунок 1.1 – Деформуюча протяжка та її конструкція

Протяжка складається з загартованого сталевого стрижня (поз. 1), одного або декількох деформуючих елементів (поз. 2) із твердого мінералокерамічного сплаву та дистанційних втулок (поз. 3). Весь набор складових елементів протяжки фіксується стяжними гайками (поз. 4), які забезпечують їх щільне прилягання поміж собою. Стрижень вкручується у передній хвостовик (поз. 5), розміри якого задаються в залежності від того, на якому верстаті буде застосована протяжка. Також існують й інші варіанти конструкції, так як вона може бути модульного типу

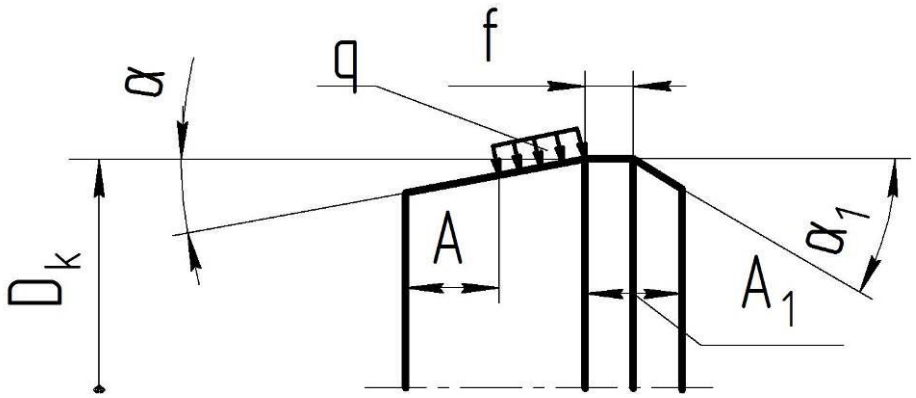


Рисунок 1.2 – Робоча частина типового деформуючого елементу

Робоча частина типового ДЕ являє собою втулку з робочим і зворотним конусами на зовнішній поверхні, циліндричною стрічкою між ними та внутрішнім отвором. Зовнішній діаметр кожного наступного елемента більший попереднього на певний розмір, що забезпечує поступове роздавання отвору під час проходження протяжки скрізь нього. Часто ДЕ виконують симетричної форми для рівномірного навантаження та можливості використання зворотнього руху протяжки як робочого.

На рисунку 1.3 представлені типові схеми обробки обробки деформуючим протягуванням. Схема стиснення найчастіше застосовується для коротких і жорстких деталей, зовнішній діаметер яких не перевищує величину в 3…4 їх довжини. Заготовка 2 своїм вихідним торцем опирається на опору 3. Робочий рух інструмента 1 показано стрілкою. Схема розтягування більш придатна для обробки довгих або гнучких деталей. Опора знаходиться з боку входу. В цьому випадку вхідний торець деталі 1 є опорним. Для закріплення деталі в опорі 3 (на цій схемі позиція 2 – інструмент, 4 – опорна плита) у її вхідного торця по зовнішній поверхні на токарному верстаті точать кільцеву канавку, або деталь закріпляється за фланець, різьбові отвори або виступи на корпусі, які розташовані біля вхідного торця. За такою схемою найчастіше обробляють довгі деталі, яких висувають підвищені вимоги до прямолінійності їх твірної, а також деталі з невеликою жорсткістю.

Схема обробки довгих тонкостінних труб та втулок з вісьовим заневоленням була розроблена в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля національної академії наук України. Цей спосіб забезпечує прямолінійність твірної отвору за рахунок жорсткої фіксації обох торців за допомогою спеціальних технологічних елементів. Обробка за такою схемою виконується деформуючим елементом 2, який рухається в напрямку показаному стрілкою та роздає отвір. Під час обробки в стінках деталі, попереду ДЕ і за ним виникають напруження розтягу, які не дають деталі скоротитись.

Схема обробки протягуванням з радіальним заневоленням використовується при обробці тонкостінних деталей, розміщених у жорсткій

або пружній обоймі, яка охопляє їх по зовнишній поверхні. Оброблювана деталь 3 одним із своїх торців опирається на розтискну опору 2, яка встановлена в жорсткій обоймі 5. Обойма закріплена в опорній плиті 1 протяжного верстата. Деформуючий елемент 4 рухається через оброблюваний отвір в напрямку стрілки. Високі контактні тиски, які виникає на завершальній стадії процесу протягування, дозволяють отримати високу якість і точність ОП. До недоліків такого процесу відноситься складність вилучення виробу із обойми.

Деформуюче протягування поєднують з редукуванням для підвищення якості обробки та зменшення товщини стінки виробу. Застосовують два варіанти виконання такого способу. В одному робоча частина деформуючої протяжки 3 розташована за волокою 1, яка установлена в опорній плиті 2 волочильного верстата. Трубна заготовка 4 рухається в напрямку за стрілкою. За другим варіантом ДЕ протяжного інструменту встановлюється в зоні калібрувальної стрічки волоки, що дає можливість зменшити на необхідну величину товщину стінки виробу.

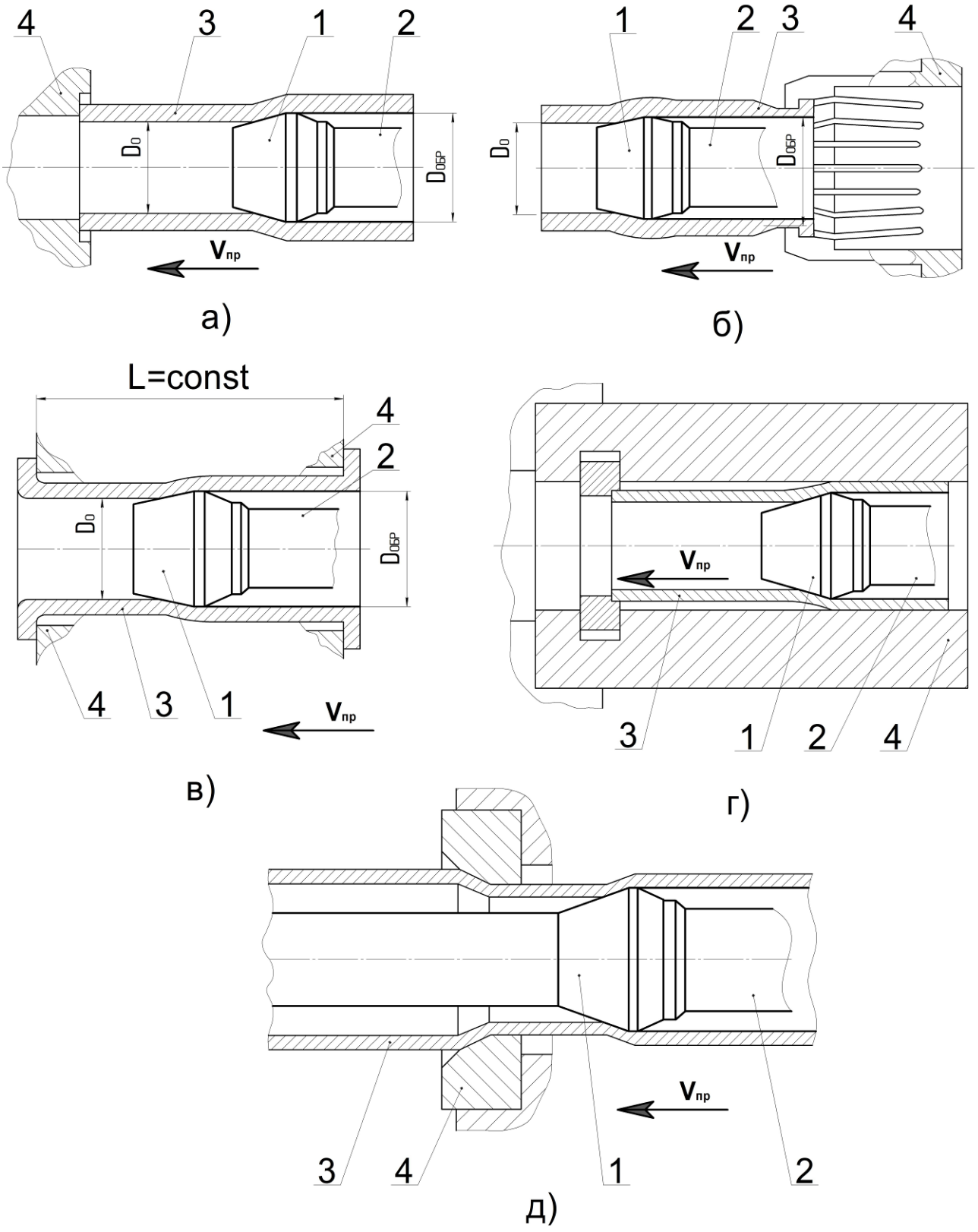


Рисунок 1.3 – Типові схеми обробки деформуючим протягуванням:
а) стиснення; б) розтягування; в) вісьове заневолення; г) радіальне заневолення; д) поєднання з редукуванням.

На рисунку 1.4 наведена класифікація основних схем протягування

Класифікація основних схем деформуючого протягування

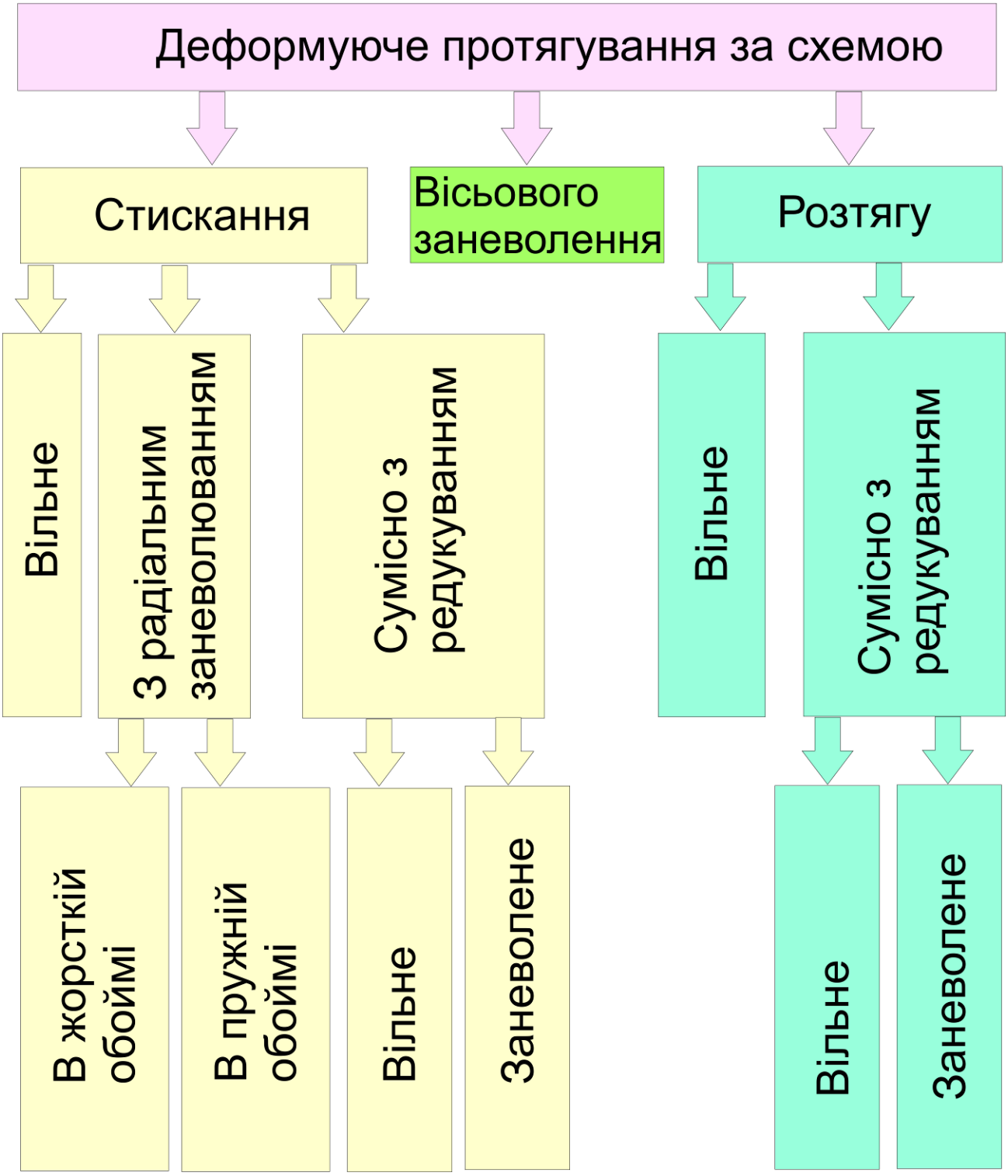


Рисунок 1.4 – Класифікація основних схем деформуючого протягування

1.2 Деформуюче протягування матеріалів із обмеженою пластичністю та його особливості

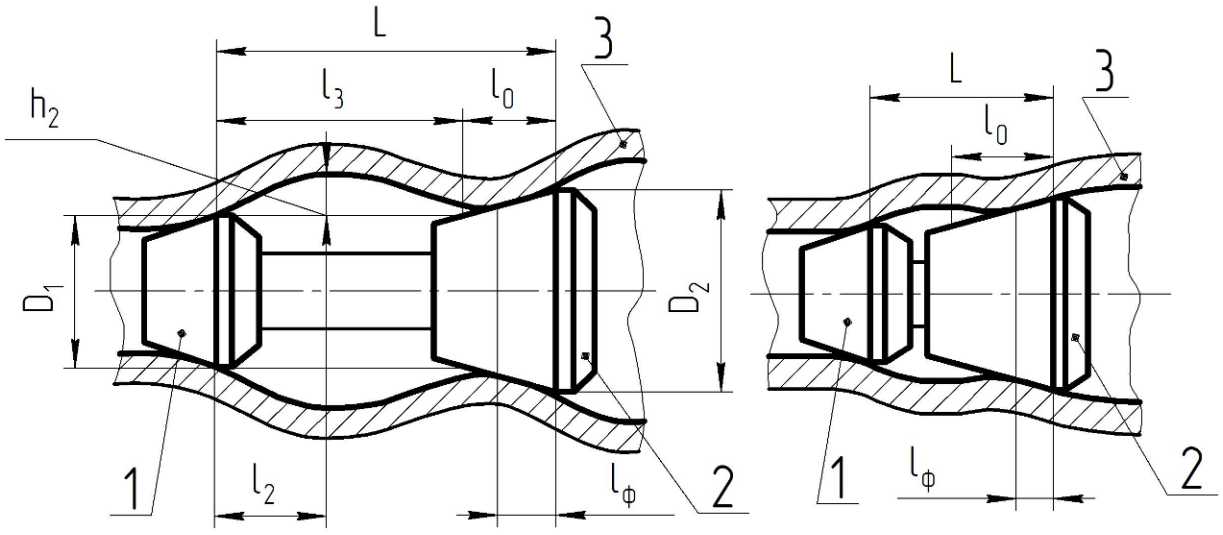
Деформуюче протягування є спосібом холодної пластичної обробки круглих отворів та найбільше задовольняє вимогам до зміцнення обробленої поверхні та підвищення її зносостійкості [7,9-11]. Завдяки високої продуктивності обробки та ряду інших причин цей спосіб знайшов широке застосування в багатьох галузях машинобудування, особливо в одиничному, мілкосерійному та серійному виробництвах.

В наш час питання вдосконалення деформуючого протягування деталей з сірих чавунів є актуальним та потребує додаткових та систематичних досліджень. У літературних джерелах наявні дані по впливу параметрів процесу деформуючого протягування на характеристики якості, геометричної точності і експлуатаційні властивості деталей розглядаються переважно щодо окремих випадків обробки, тому питання контактної взаємодії деформуючого інструмента з оброблюваною поверхнею в умовах обробки матеріалів з з різними властивостями, в тому числі з обмеженою пластичністю є актуальними.

За останні роки фінішну обробку точних отворів у деталях з матеріалів з обмеженою пластичністю в Україні та за кордоном всі частіше проводять за допомогою різних методів поверхнево-пластичного деформування (надалі - ППД) [1-4,7]. У літературних джерелах наводяться приклади протягування точних отворів у деталях із чавуну різних марок комбінованими [9] і деформуючими (вигладжуваючими) [10] протяжками, які забезпечують невелики пластичні деформації. Ці приклади носять периодичний характер, вони не розкривають всі можливості деформуючого протягування, але вказують на подальшу перспективність його використання для обробки отворів в деталях із сірого чавуну.

Так, наприклад, в роботах [9-14] наведені результати експериментальних і теоретичних досліджень впливу параметрів процесу деформуючого протягування (або дорнування) циліндричних отворів на силу

протягування при обробці різних по своїм властивостям конструкційних матеріалів. Показано, що величина сили деформуючого протягування в значній мірі залежить від кількості одночасно працюючих ДЕ та кроку між ними, геометрії робочої поверхні, довжини деталі та діаметра оброблюваного отвору, товщини стінки деталі та фізико-механічних властивостей ОМ. Приклад впливу розташування робочого елемента або їх групи на деформацію обробленої поверхні деталі типу втулка показано на рис. 1.5. Однак наведені результати стосуються в основному пластичних матеріалів і лише в одному випадку згадується сірий чавун СЧ15.



а) б)

Рисунок 1.5 – Схема протягування з груповим розташуванням деформуючих елементів за хвилею (а) або в хвилі (б) позаконтактної деформації.

Установлено, що відстань, на якій розташовуються деформуючі елементи між собою в групі, може суттєво впливати на сумарну силу протягування. Якщо кожний наступний ДЕ розташовувати у хвилі позаконтактної деформації, яка створена попереднім ДЕ, то в цьому випадку їх умови взаємодії з оброблюваною поверхнею заготовки значно зміняться та забезпечать тим самим зменшення навантаження на кожний робочий елемент і сумарне навантаження на групу з ДЕ до двох разів.

Роботи [13-14] присвячені питанню 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 статичному гідравлічному протитиску, що сприяє підвищенню точності геометричної форми оброблюваних деталей і зменшенню швидкості утворення наросту з наволоченого металу на деформуючих елементах.

У роботах [7,9] вивчався процес протягування отворів у чавунних деталях за допомогою збірних твердосплавних протяжок, які оснащені різальними, калібрувальними та деформуючими елементами (рис. 1.6).

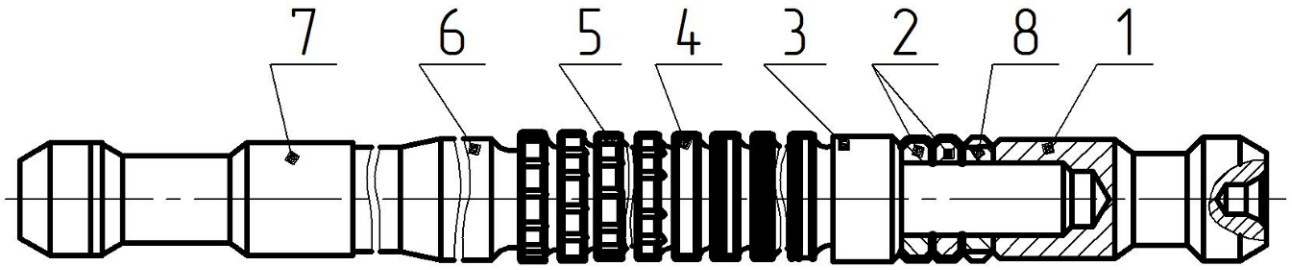


Рисунок 1.6 – Збірна твердосплавна протяжка з різальними, калібрувальними та деформуючими елементами

Елементи різальної 5 та калібруючої частини 4, напрямні 3, 6 та хвостовик 7 виготовлені суцільними із швидкорізальної інструментальної сталі. Деформуючі елементи 2 і задній хвостовик 1 збірної конструкції. Деформуючі елементи виготовлені із твердого сплаву марок ВК8 та ВК10М. Вони міцно затиснуті на стріжні оправки за допомогою гайки 8 та заднього різьбового хвостовика.

Представлені рекомендації для практичного використання таких протяжок з вибором діаметральних розмірів ДЕ, з метою забезпечення високої точності обробленого отвору і мінімальної шорсткості його поверхні. Наведені дані, що такий інструмент, оснащений різальними, калібрувальними і деформуючими елементами, здатен забезпечити у деталях із сірих чавунів СЧ12, СЧ15 та СЧ18 шорсткість обробленої поверхні отворів у диапазоні Ra=0,16…0,32 мкм. При цьому в якості МОР рекомендують використовувати 5% емульсію або гас. Згідно результатів практичних випробувань, при обробці деталей із сірого чавуну стійкість протяжки між переточками робочих

елементів, виготовлених із твердого сплаву ВК10М, дорівнює 5-6 км довжини протягування. Це приблизно в сорок разів перевищує стійкість протяжок із традиційної швидкорізальної сталі.

Також відомо [7,9], що при протягуванні чавунних втулок сили протягування потребує значно менше сил, ніж під час обробки ідентичних сталевих. Така різниця в силах, необхідних для протягування інструменту, пояснюється тім, що у втулках із чавуну пластична деформація поширюється тільки на шар малої товщини. При аналогічних умовах у сталевій втулці деформація може охопити всю товщину стінки. Однак, в той же час, на чавунних втулках під час обробки не можна доводити деформацію до великих величин, як на сталевих, для того, щоб запобігти раптовому руйнуванню деталей.

Вивчаючи вплив величини номінального натягу на ДЕ і сумарної деформації на шорсткість обробленої поверхні, автори показують, що деформуюче протягування чавунних втулок не дає настільки значного зниження шорсткості ОП, як це спостерігається на сталевих, тому що до чавуну не можуть бути прикладені великі пластичні деформації через його крихкість. Практичними дослідженнями встановлено, що для ДЕ із твердих сплавів найкраща геометрична форма є такою, що утворена робочим конусом, циліндричною стрічкою та зворотним конусом. Кут твірної робочого та зворотного конусів лежить у межах $\alpha=4\ldots5^{\circ}$. Для ДЕ зі швидкорізальної сталі Р18 рекомендований кут твірної робочого конуса α лежить в межах $2\ldots5^{\circ}$, а кут зворотного конуса повинен бути рівним $4\ldots5^{\circ}$.

Обробка деформуючим протягуванням сприяє підвищенню довговічності чавунних деталей машин. На прикладі обробки гільз двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) показано [17-19] переваги деформуючого протягування отворів перед хонінгуванням. При заміні хонінгування деформуючим протягуванням скорочується час обробки на фінішних операціях, знижуються потреби в верстатному обладнанні та площі під нього. Також зменшується витрата інструмента, а час припрацювання зразків з гільз,

які були оброблені деформуючим протягуванням, на третину менший, ніж у зразків гільз після хонінгування.

Для обробки деталей із чавуну рекомендується застосовувати протяжки з вигладжуючими елементами конічної форми, які виготовлені із твердих сплавів марок ВК та ТК. Дуже важливе значення при вивченні процесу деформуючого протягування мають грунтовні дослідження умов взаємодії між робочими елементами протяжки і виробом. Такі дослідження дозволяють визначити сили, деформації та коефіцієнт тертя в зоні контакту ДЕ з ОП деталі, а також визначити залежність цих параметрів від різних умов обробки.

1.3 Використання змащувальних та охолоджуючих рідин при деформуючому протягуванні

В роботах [7,9] приділено велику увагу вивченню умов тертя в зоні контакту деформуючого елемента з оброблюваною деталлю. На підставі експериментів, які було проведено на різних пластичних матеріалах з використанням різноманітних МОР, показано вплив контактних тисків, що діють між інструментом і деталлю, на коефіцієнт тертя в залежності від шорсткості ОП та її твердості. Дослідження показують, що підвищення контактних тисків (до певної межі) та твердості оброблюваного матеріалу сприяє зменшенню коефіцієнта тертя. Він також зменшується при підвищенні мікронерівностей ОП, які виступають у ролі мікрорезервуарів для МОР.

Взагалі МОР робить величезний вплив на умови тертя між деформуючим елементом і оброблюваною деталлю. Ефективність застосування того або іншого виду МОР визначається її впливом на коефіцієнт тертя, забезпеченням мінімальної сили протягування та уникненням «схоплюванню» матеріалу деталі з робочим органом інструмента. При деформуючому протягуванні найбільш широко застосовуються рідкі технологічні змащення типу 10% емульсії, сульфофрезолу, рослинних мастил та т. ін. Однак, як свідчать експериментальні дані [9], область ефективного використання рідких технологічних змащень обмежується величиною контактних тисків. Однак [7],

у процесі деформуючого протягування деталей зі сталі типу 18Х2Н4ВА-Ш із застосуванням МОР сульфофрезол несуча здатність змащення зникає при досягненні контактних тисків до величин 1,9…2,1 ГПа. Це явище супроводжується різким збільшенням коефіцієнта тертя. Тому, під час обробки деталей ХПД при високих контактних тисках рекомендується використовувати тверді технологічні змащення на основі сполучень дисульфіду молібдену MoS_2 або дрібнодисперсного графіту. Несуча здатність таких змащень значно вища, ніж у рідких технологічних змащень.

Відомо [20], що графіт є дуже гарним природним змащенням. Під час тертя частки графіту міцно зчіплюються з поверхнею конструкційних матеріалів (чавуни, сталі, кольорові метали) і, розташовуючись у певному напрямку, утворюють захисну антифрикційну плівку товщиною до ста ангстрем [21]. Зволоження графіту сприяє підвищенню його мастильної здатності, також корисним є додавання у зону тертя рідких мастил, а також зміцнення поверхневого шару металевої основи різними методами механічної обробки [22]. Завдяки своєї високій змащувальної здатності графіт широко застосовується для виготовлення різноманітних змащень, що закладаються у вузли тертя машин [20]. Також графіт ефективно змащує при гарячій обробці металів тиском [23]. В якості компонента твердого змащення графіт досить часто застосовується при обробці деталей деформуючим протягуванням [7]. По даним авторів робіт [9,17] тверді технологічні змащення, що містять у своєму складі дисульфід молібдену або графіт, мають вищу несучу здатність. Вони можуть витримувати без руйнування більші контактні тиски, ніж рідкі технологічні змащення (наприклад, 5% емульсія, сульфофрезол та т. ін.). Також графіт застосовують в якості наповнювача для виготовлення вуглепластів, графітизованих сталей, текстолітів та інших матеріалів, що використовуються для вузлів тертя деталей [20-21].

Графітовмісні чавуни займають велику питому вагу серед конструкційних матеріалів, що застосовуються для виготовлення вузлів тертя, [9]. Характеристика тертя графітовмісного чавуну завжди вища, ніж у сплавів на основі заліза, що не містить графіт. При терті графіт розподіляється по

поверхні чавуну та утворює захисну сталу плівку, що запобігає поверхні тертя від схоплювання. У цьому випадку чавун розглядається як матеріал, що здатен самостійно змащуватись. Це пояснюється тим, що мікропори в об'ємі чавуну служать безпосереднім джерелом змащення і проблеми самовідновлення змащувальної плівки після її стирання вирішуються без додаткого втручання.

У процесі деформуючого протягування внаслідок інтенсивного тертя між робочим елементом та ОП отвору, а також пластичної деформації (або стискання) поверхневого шару металу виділяється значна кількість тепла. В результаті приблизно три чверті усього виділеного тепла приходиться на пластичну деформацію, а залишок (одна чверть) виділяється в результаті тертя між поверхнею, що оброблюється та передньою поверхнею ДЕ. Це викликає зношування робочих поверхонь деформуючих елементів інструмента. Для його зменшення застосовують певні мастильно-охолоджувальні рідини (надалі – МОР), які понижують коефіцієнт тертя (змащувальна дія рідини) і водночас знижують температуру в зоні обробки (охолоджуюча дія).

Правильний вибір ОР та її використання дозволяють значно підвищити стійкість протяжки, поліпшити чистоту обробленої поверхні виробу, суттєво зменшити зусилля протягування та одержати потрібний зовнішній розмір протягненого профілю виробу. Як мастильно-охолоджувальні рідини (МОР) найбільше широко застосовуються мінеральні мастила з різними присадками, що зменшують зусилля протягування (фосфор, сірка, хлор, мила жирних і нафтенових кислот та ін.), а також водно-мастильні емульсії різного складу та концентрації. Рекомендований склад найбільш розповсюджених МОР наведено в табл. 1.1

Рослинні масла та тваринні жири дають високу чистоту поверхні, але рідко застосовуються внаслідок своєї високої вартості. Для протягування вуглецевих і легованих сталей рекомендується використовувати емульсії, в складі яких присутній товарний емульсол нефтеторга (20…30%) та кип'ячена вода (70…80%). Якщо треба знизити зусилля при протягуванні, то

застосовують речовину сульфофрезол або його суміш із 10…40% рослинної олії, в залежності від вимог конструкторської документації до чистоти поверхні.

Таблиця 1.1

Рекомендований склад мастильно-охолоджувальних рідин

Назва оброблюваний матеріалу	Види протягування		
	Протягування звичайне	Протягування з підвищеними вимогами до чистоти обробленої поверхні	Протягування зі зняттям значних припусків
Вуглецеві сталі (вміст вуглецю 0,3%) і низьколеговані сталі	Б. В, Г, И, II	Л, Г, К, Л	Г, К
Середньовуглецеві та леговані сталі з твердістю НВ 180…240	Б, Г, И, К, Л	Е, К, Л	Г
Високовуглецеві та леговані сталі з твердістю НВ 240, межа міцності σ_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	-
Мідь, латунь, бронза	БО, И, К	БО, К, Л	-

Позначення: А - 10% емульсія; Б - 15% емульсія; В - 20% емульсія; Г - сульфофрезол; Е - мінеральне (веретенне) мастило з вмістом сірки; І - суміш емульсора (25%), касторового мастила (8%), кальцинованої соди (0,5%) та води (66,5%); К - суміш емульсола (30%), касторового мастила (15%), кальцинованої соди (0,5%) та води (54,5%); Л - суміш емульсола (30%), касторового мастила (30%), кальцинованої соди (0,5%) та води (39,5%); Р - суміш авіаційного мастила та гасу в пропорції 1:1; БО - без МОР.

Застосування 10…20% емульсії з добавкою 4% рідкого мила, а також алізаринова емульсія дають високу чистоту поверхні. При підвищених вимогах

до чистоти поверхні при деформуючому протягуванні високовуглецевих і легованих сталей застосовують наступні МОР: від 8 до 30% касторового мастила, від 25 до 30% емульсола, 0,2% кальцинованої соди, інше – чиста вода. При протягуванні сплавів з алюмінію застосовують легке мінеральне мастило в суміші з касторового мастилом (до 30%), а також гас або скипидар (для силумінів). Чавунне лиття з сірого, ковкого та модифікованого чавунів, деталі з алюмінію, латуні, бронзи та міді можна протягувати без охолодження. Для охолодження при протягуванні сплаву типу «електрон» вживають 40% розчин фтористого натрію. Додавання до МОР 3…5% олеїнової кислоти також значно поліпшує чистоту поверхні. Розмір обробленого 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 МОР повинна бути досить рясною (об’ємні витрати від 10 до 20 л/хв), в залежності від величини поперечного перетину робочих елементів протяжок. Подавати МОР треба як у зону входу протяжки у виріб, так і в місці виходу інструмента для видалення стружки. При зовнішньому протягуванні подачу МОР доводять до 30…40 л/хв. Під час роботі круглими протяжками великого перетину застосовують кільцеві підводчики для рівномірної подачі рідини до робочих елементів. При протягуванні глибоких отворів МОР подається через спеціальний осьовий канал у оправці протяжки та радіальні канали до кожного деформуючого елемента.

1.4. Вплив основних параметрів процесу деформуючого протягування на точність форми та розмірів оброблюваних деталей

Результати, отримані у ході досліджень точності розмірів отворів, оброблених деформучим протягування [10], дозволили оцінити зміну геометричних розмірів і форми деталі в залежності від сумарних деформацій, початкової точності отвору, величин номінального натягу на ДЕ та їх геометрії.

Досліди, проведені на втулках із чавуну СЧ20, показали [7], що після протягування деталей з малою товщиною стінки (d_0=35,5 мм, t_0=5 та 10 мм) кут робочого конуса ДЕ, номінальний натяг на нього та величина сумарної деформації майже не впливають на точність форми отвору як у поздовжньому, так і в поперечному перерізах. Відмічено, що в процесі накопичення деформацій може бути як зменшення, так і певне збільшення погрішності форми отвору. Однак ці коливання погрішності не перевищують величину 0,02 мм. Імовірно, що в окремих випадках збільшення погрішності форми отвору може бути пов’язане з точністю виготовлення самих ДЕ, їх правильним встановленням на оправці, а також способами базування деталі у пристосуванні.

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 ДЕ 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 ДЕ (a=0,03…0,05 мм) і куті робочого конуса α=2…4° 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 кваліфікаційної роботи

Аналіз літературних джерел по темі кваліфікаційної роботи дозволяє зробити наступні висновки:

– у відомих джерелах наукової літератури присутні лише окремі відомості про картину взаємодії між деформуючими елементами та оброблюваною поверхнею деталей;

– деформуюче протягування з невеликими деформаціями (з сумарним натягом в межах від 0,05 до 0,1 мм) є найбільш придатним процесом для обробки круглих циліндричних отворів у деталях типу втулка;

– в якості інструмента для обробки круглих отворів в межах даної роботи обираємо збірну деформуючу протяжку як таку, що є найбільш досконалою серед відомих і випробовуваних конструкцій. Вона може оброблювати отвори діаметром від 15 до 100 мм в різних конструкційних матеріалах (наприклад, з чавуну, сталі та латуні) твердістю НВ100...400.

Дана випускна кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуальної задачі, а саме – підвищенню ефективності процесу деформуючого протягування втулок шляхом використання чисельного моделювання методом кінцевих елементів для аналізу напружено-деформованого стану втулки та удосконалення конструкції протяжного інструмента. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути наступні питання:

– проаналізувати конструктивні особливості та принцип роботи протяжного інструмента для деформуючої обробки отворів;

– розробити 3D-модель процесу протягування (або дорнування) деталей типу втулка з різних матеріалів (сірий чавун СЧ20, сталь 20, сталь 45, латунь Л62);

– провести моделювання процесу деформуючого дорнування в програмному середовищі DEFORM та SolidWorks з використанням методу кінцевих елементів;

– проаналізувати розподіл напружень, деформацій та контактних взаємодій між робочим елементом протяжного інструмента і оброблюваною поверхнею деталі типу втулка;

– оцінити вплив матеріалу деталі та конструкції інструмента на ефективність процесу;

– надати рекомендації щодо вдосконалення геометрії інструмента та підбору оптимальних технологічних параметрів обробки.

– розробити вдосконалений метод моделювання процесу деформуючого дорнування у деталях типу втулка;

– розробити рекомендації для практичного створення технологічних процесів оригінального інструменту.

Таким чином після проведеного аналізу літературних джерел можливо зробити висновок, що використання спеціального інструмента для деформуючого протягування круглих отворів може значно покращити якість ОП, а також 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 та SolidWorks, а також розробка рекомендацій щодо покращення інструмента для деформуючого протягування круглих отворів в деталях з латуні Л62, сталей 20, 45 та сірого чавуну СЧ20 в умовах сучасного виробництва є актуальною і потребує досконалого вивчення і подальшого розв’язання.

2. Методика проведення моделювання деформуючого протягування та обробки результатів експериментів

2.1. Взаємодія деформуючого елемента та поверхні оброблюваного отвору втулки

Відомі проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесів деформуючого протягування для різних конструкційних матеріалів дозволили вирішити багато актуальних практичних задач. Наприклад, широке застосування у виробництві отримали розроблені в ІНМ ім. Бакуля (НАН України) зносостійкі ДЕ із твердих сплавів, які мають високу надійність і несучу здатність. Також було реалізовано значне зниження витрат енергії на процес деформуючого протягування та силові навантаження на протяжний інструмент. Було розроблено рекомендації щодо вибору технологічних рідких та твердих змащень, а також факторів режиму протягування для різних видів матеріалів. Багато зусиль було спрямовано на ефективне керування параметрів точності і якісті обробленої поверхні виробів і т. ін. При цьому використовуваний у цих дослідженнях інструмент – а саме твердосплавні деформуючі протяжки та прошивки збірної конструкції було визнано простим, технологічним у виготовленні і надійним в експлуатації.

Робочі ДЕ протяжки виправляють некруглість попереднього отвору в оброблюваній деталі, коригуючі її до десятих або сотих часток міліметра. Тим самим процесс деформування металу дозволяє, за потреби, в декілька разів знизити припуск на наступну обробку різанням або хонінгуванням, що дозволяє зменшити відходи матеріалу в стружку. Для ще більш ефективного застосування деформуючого протягування, потрібно за допомогою сучасніх методів моделювання аналітично дослідити процес одиночного пластичного та пружно-пластичного деформування вісесиметричних деталей типу втулка. Ці дослідження мають за мету оцінити напружено-здеформований стан ОП виробу, механіку взаємодії робочої зони ДЕ та виробу, контактні процеси, зони деформацій втулки. Отримані результати дозволять оптимізувати розміри і

форму ДЕ та інших складових протяжки; визначити силові параметри та енергетичні витрати на виконання досліджуваного процесу.

Процес деформування при роздачі вісесиметричної заготовки шляхом протягування скрізь її отвір одного або групи ДЕ дуже складний. У невеликій за розмірами кільцеподібній зоні, яка розташована між деформуючим елементом та оброблюваної поверхні заготовки, та рухається в процесі деформування по довжині заготовки, виникають значні контактні тиски. Ці тиски, в залежності від умов деформування, можуть значно збільшуватися та у численних випадках досягати декількох сотень кілограмів на квадратний міліметр (ГПа). Тертя, що виникає при цьому, викликає появу на обробленій поверхні текстури. Ця текстура складає по товщині істотний шар, ступінь деформації в якому може досягати десятків або навіть декількох сотень відсотків [11]. Внаслідок цього, розподіл ступеня деформації, зміцнення і напруг по товщині стінки обробленої деталі виявляється нерівномірним, складним та не піддається повному теоретичному опису.

При обробці міцних конструкційних матеріалів типу вуглецевих сталей або сірих чавунів зона контакту ДЕ з виробом доповнюється зонами позаконтактної деформації виробу [5-7]. Одна з цих зон розташована попереду ДЕ, вона визначає ширину зони контакту і змінює її при зміні умов деформування. Друга зона розташована позаду ДЕ, вона запобігає контакту обробленої поверхні із циліндричною стрічкою ДЕ, а також має значний вплив на остаточні розміри обробленого виробу. Деформація у позаконтактних зонах має пружно-пластичний характер, причому характер та місце її розповсюдження в значній мірі відрізняються в залежності від того, який матеріал оброблюється. Деформації в зоні контакту між ДЕ та оброблюваною поверхнею супроводжується адгезійними явищами. Величина цих явищ може змінюватися від досить малих (при застосуванні напіврідких або твердих змащень) до інтенсивних, що можуть привести до так званого «схоплювання» поверхонь виробу та робочих елементів протяжки. 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 на даний час розробити повністю 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...0,25 м/хв$^{-1}$. Тому більшість практичних експериментів по вивченню процесу деформуючого протягування проводилося при швидкості 0,032…0,048 м/хв$^{-1}$ [11].

Застосування у збірних протяжках одного або декількох робочих ДЕ не прибирає такі погрішності інструмента, як перекіс окремих кілець щодо осі, який пов’язаний з відхиленням від перпендикулярності торців цих кілець та взаємний зсув окремих кілець у радіальному напрямку. Окрім того, при різьбовому з’єднанні хвостовика та оправки, на якій розташовуються робочі ДЕ, можливий їх перекіс через неспівпадіння опорних торців нарізного сполучення. При цьому не тільки знижується точність обробленого отвору, ще можливе руйнування елементів твердого сплаву. Тому усе більш широке застосування в промисловості знаходять конструктивні варіанти протяжки із деформуючою частиною у вигляді суцільного твердосплавного блоку з багатьма елементами та замковим кріпленням робочої частини.

Процес деформуючого протягування у більшості випадків здійснюється за схемою стискання. Саме така схема буде використовуватись при розробці методики комп’ютерного моделювання методом кінцевих елементів у спеціалізованих програмних пакетах Deform та SolidWorks.

Під час деформуючого протягування (дорнування) циліндричних отворів у деталях типу втулка, які мають різну товщину стінки, фіксується зміна геометричних розмірів заготовки, а саме – збільшення діаметру отвору та зовнішнього діаметру втулки. Окрім цього може бути так зване «осадження» деталі. Ці зміни в значній мірі залежать від початкових розмірів заготовки, марки матеріалу, умов взаємодії інструмента з виробом, геометрії ДЕ, ступеня

сумарної деформації та схеми протягування (стиску або розтягу). Таку зміну розмірів необхідно знати при виборі заготовки, щоб призначити її розміри: товщина стінки t, зовнішній діаметр D/D_o, довжина L/L_o або L_o/L, де відповідно, D_o, L_o - товщина стінки, зовнішній діаметр і довжина до протягування; D, L – після протягування.

2.2 Методика дослідження методом кінцевих елементів

Метод кінцевих елементів (надалі - МКЕ) – це чисельний метод розв'язування диференціальних рівнянь, який застосовується для аналізу складних механічних, теплових, електричних, магнітних та інших фізичних систем. При використанні цього методу деталь або механізм у зборі поділяється на певну велику кількість елементів простої геометричної форми (відрізки ліній, трикутники, тетраедри, чотирикутники, кубики і т. ін.), які з'єднані між собою в вузлових точках. Для таких елементів, названих кінцевими, спеціально розробленими аналітичними методами находять точні або максимально 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. Зазвичай, 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 (COSMOSWorks), DEFORM, MASTRAN, ANSYS, MARC, DINA, ЛІРА, Прінс і ін. Всі ці програми добре відомі і дозволяють їх самостійне використання широким колом фахівців. До переваг методу кінцевих елементів відноситься його здатність працювати з дуже складними геометріями та матеріалами, можливість моделювати різні фізичні явища одночасно, висока точність при належній вибірці та коректному розбитті досліджуваної області. До недоліків слід віднести високі вимоги до обчислювальних ресурсів, особливо при розв'язуванні великих систем рівнянь

та складність побудови моделі і вибору правильних параметрів для елементів. В даній кваліфікаційній роботі використані програмні продукти DEFORM та COSMOSWorks, як такі, що знайшли широке застосування серед науковців та інженерів як в нашій країні, так й за кордоном.

DEFORM – це спеціалізована програма для чисельного моделювання процесів обробки матеріалів за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ). Вона застосовується для аналізу та оптимізації процесів, пов'язаних з пластичними деформаціями матеріалів, таких як ковка, штампування, пресування, деформуюче протягування та інші види обробки металів.

Основні можливості DEFORM:

Цей програмний комплекс дозволяє моделювати процеси пластичних деформацій, аналізувати напруження, температурні зміни, швидкості деформації та інші параметри. Моделювання температурних полів, що виникають під час обробки матеріалів, є важливою частиною процесу, оскільки температура значно впливає на механічні властивості матеріалу. DEFORM дозволяє обчислювати розподіл температур у реальному часі та прогнозувати вплив температури на кінцевий результат. Програма має потужні алгоритми для моделювання взаємодії між оброблюваним матеріалом та інструментом (наприклад, пресом або штампом). Вона враховує процеси зношування інструментів і допомагає оптимізувати їх проектування. Також DEFORM здатен аналізувати як статичні, так і динамічні процеси, що дуже важливо для розуміння, як матеріал буде поводитися під час швидких або повільних деформацій, наприклад, при великих швидкостях обробки. DEFORM дає можливість тестувати різні сценарії обробки, щоб знайти оптимальні умови для досягнення необхідних властивостей матеріалу (наприклад, мінімізація дефектів або покращення міцності). Програма підтримує широкий спектр матеріалів, зокрема метали, сплави, полімери, а також їх різні модифікації та комбіновані матеріали, що дозволяє використовувати DEFORM в різних галузях промисловості. Є можливість використовувати вбудовану бібліотеку найбільш розповсюджених конструкційних матеріалів або додавати свої. DEFORM дозволяє прогнозувати дефекти, що можуть виникати під час обробки

матеріалів, такі як тріщини, пори або інші проблеми, що знижують якість продукції.

До переваг DEFORMa відносяться високоточні результати завдяки використанню МКЕ та потужним алгоритмам моделювання. За допомогою чисельного моделювання можна зменшити кількість експериментів, що знижує витрати на виробництво та тестування. DEFORM добре підходить для моделювання різноманітних процесів обробки матеріалів, як для металів, так і для інших матеріалів. Програма має зрозумілий інтерфейс з можливістю вибору декількох мов, що дозволяє користувачам швидко освоїти основи моделювання. Є вбудований посібник з використання, де описані основні прийоми роботи з програмою. Недоліками є високи вимоги до обчислювальних ресурсів, так як моделювання складних процесів потребує великих обчислювальних потужностей, особливо для великих та складних моделей з дрібною сіткою кінцевих елементів. Як і більшість спеціалізованих програм, DEFORM має високий рівень застосовуваних алгоритмів, тому для того, щоб максимально ефективно використовувати цей програмний продукт, треба добре розуміти фізику процесів обробки матеріалів для коректної постановки завдань.

2.3 Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних матеріалів

Для проведення досліджень в якості конструкційних матеріалів було обрано сірий чавун марки СЧ20, вуглецеву конструкційну сталь 20 та 45, а також латунь Л62, як такі, що широко розповсюджені у сучасному машинобудуванні для виготовлення різноманітних деталей. Склад хімічних елементів та твердість ціх матеріалів наведено у таблицях 2.1; 2.2; 2.3.

Таблиця 2.1

Хімічний склад в % та твердість оброблюваного матеріалу

Оброблюваний матеріал	C	Cr	Si	Mn	Ni	P	S	HB, ГПа
Сталь 20	0,17-0,24	Не більше 0,25	0,17-0,37	0,35-0,65	Не більше 0,30	Не більше 0,030	Не більше 0,035	1,21-1,56
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	1,43-2,55

Механічні властивості зразків відповідно до ГОСТ 1050/ ДСТУ 7809, що визначаються на нормалізованих зразках [24,25]

Оброблюваний матеріал	Межа міцності $\sigma_т$, Н/мм^2	Тимчасовий опір $\sigma_в$, МПа	Відносне подовження δ_5, %	Відносне звуження Ψ, %
Чавун СЧ20	≈200	≥200	≤0,5	≈0
Сталь 20	не менш 245	не менш 410	не менш 25	не менш 55
Сталь 45	не менш 355	не менш 600	не менш 16	не менш 40
Латунь Л62	Відпалений (м'який) ≈ 295…340 МПа Напівтвердий ≈ 390…440 МПа Твердий (наклепаний) ≈ 460…490 МПа	Відпалена (м'яка) 295…340 МПа Напівтверда 390…440 МПа Тверда (наклепана) 460…490 МПа	10…35 (в залежності від стану обробки)	Відпалена (м'яка) 40…50 % Напівтверда 20…30 % Тверда (наклепана) < 10…15 %

Вибір форми поверхні досліджуваних деталей та їх геометричних розмірів проводився з оглядом найбільш поширеної промислової номенклатури таких виробів. Тому моделювання проводилися на 3D зразках деталей типу втулка із початковим діаметром отвору d_0=35,0 міліметрів, довжина (висота) втулки L=100 міліметрів і товщина її стінки t_0=10 або 20 міліметрів.

Дослідження процесу деформуючого протягування проводилось за допомогою програм Deform та COSMOSWorks (додаток до SolidWorks).

Межі експериментальних досліджень: характеристики та режими протягування: стала швидкість V=0,05 м/с; натяг на сторону між ДЕ на оброблюваним отвором втулки $a_{ном}$=0,05 мм (номінальний натяг дорівнює 0,1 мм).

Параметри та характеристики протяжного інструменту: деформуюча (робоча) частина – одиничний елемент із твердого сплаву ВК8 або ВК10М, кут робочого конусу ДЕ $\alpha=\alpha_1$=2,4,8 та 12°; спосіб його закріплення на циліндричній оправці протяжки – посадка із зазором 0,01 міліметра .

2.4 Методика дослідження впливу параметрів деформуючого протягування на радиальні розміри обробленого внутрішнього отвору, а також на інтенсивність його деформацій та напружень його методом кінцевих елементів

Програма DEFORM-3D має зручну модульну структуру, що включає три основні модулі: Preprocessing для підготовки вихідних даних (вигляд цього модуля показано на рис. 2.1), Solver для проведення розрахунків та Postprocessing для обробки та візуалізації результатів моделювання у вигляді таблиць, графіків або вікон перегляду [15].

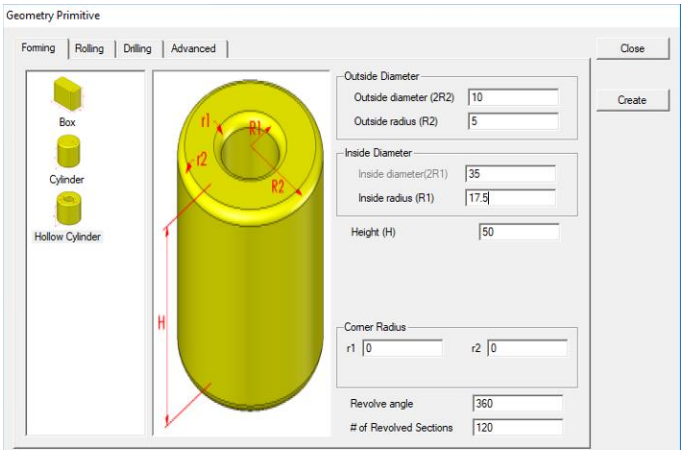


Рисунок 2.1 - Вікно модуля підготовки вихідних даних програми DEFORM- *Preprocessing*

Основними модулями для розрахунків є:

- DEFORM-3D – для моделювання об’ємних (3D) процесів обробки металів тиском;
- DEFORM-2D – для аналізу плоских (2D) процесів (осесиметричних та плоских задач);
- DEFORM-F3 – спрощена версія DEFORM-3D для моделювання 3D-процесів;
- DEFORM-F2 – спрощений модуль для 2D-моделювання;
- DEFORM HT3 та HT2 – для моделювання термічної обробки в 3D та 2D відповідно;
- DEFORM-TOOLS – для створення анімацій та презентаційних матеріалів.

Додаткові модулі:

- RingRolling 3D – для моделювання процесів розкочування кілець;
- Cogging 3D – для симуляції протягування за допомогою молота;
- ShapeRolling 3D – для процесів прокатки із контролем виникнення дефектів;
- InversePropertyExtraction (2D/3D) — для визначення теплопередачі на межах заготовки;
- SimulationQueue – для пакетного обрахунку кількох задач;
- Microstructure 3D та 2D – для термічної обробки з урахуванням мікроструктури;

- Machining 3D та 2D – для моделювання механічної обробки.

Після успішного рішення завдання отримані результати розрахунку записуються у спеціальний файл бази даних з розширенням *.db та виводяться за допомогою штатного модуля виводу «Postprocessing» у вигляді табличних даних у форматі MS Excel, наочних зображень, діаграм, епюр, графіків тощо.

Відповідно завдання кваліфікаційної роботи були розглянуті конкретні випадки взаємодії одиничного ДЕ протяжки та ОП циліндричного отвору у деталі типу втулка при монотонному навантаженні та русі протяжного інструмента.

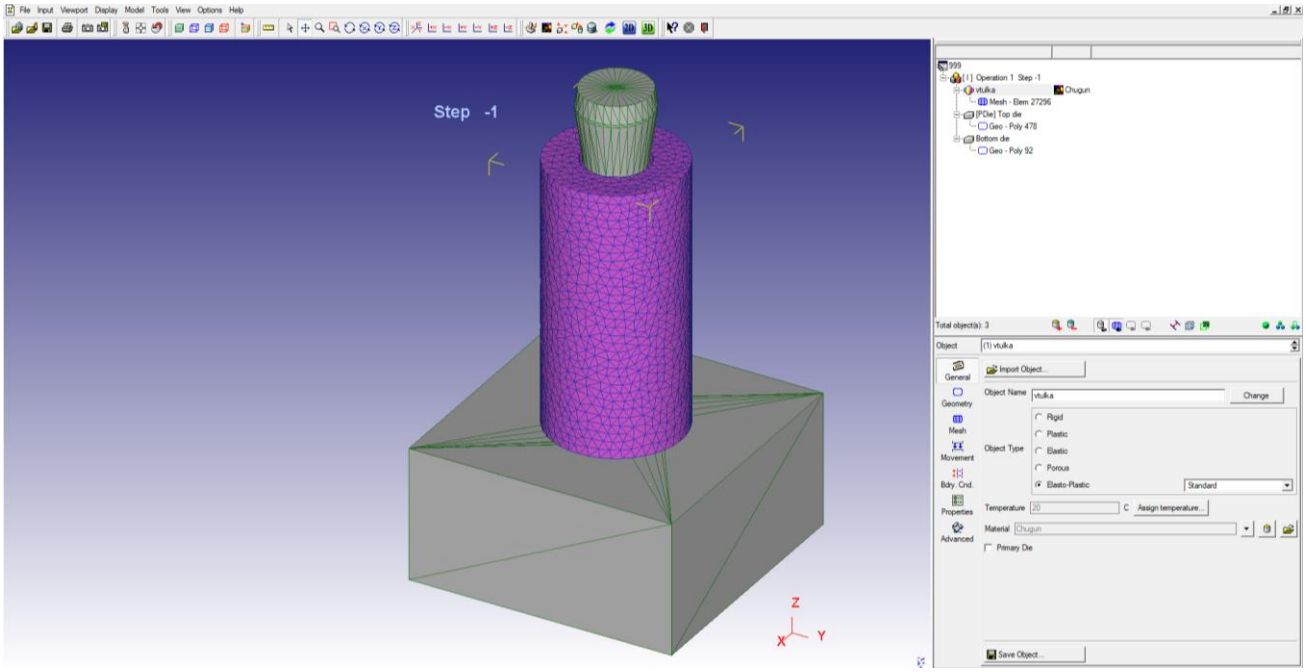
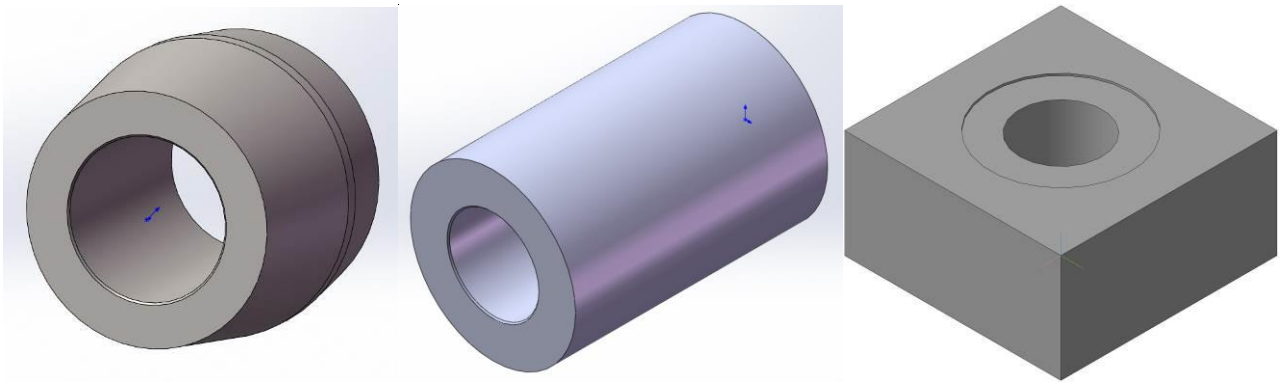


Рисунок 2.2 - Загальний вигляд вікна препроцесору у програми DEFORM

Для вивчення взаємодії інструменту та поверхні оброблюваного циліндричного отвору була розроблена та застосована методика, сутність якої полягає у наступному. Дослідний зразок у формі втулки з циліндричним отвором (показаний на рис. 2.3*б*) встановлюється у виточку на опорній плиті 3 (див. рис. 2.3*в*), що жорстко закріплена. Над дослідним зразком на початковій позиції знаходиться ДЕ (рис. 2.3*а*), якій впритул підведений до втулки. Геометричні розміри ДЕ забезпечують потрібний натяг на сторону та кут його робочого конуса.



а) б) в)

Рисунок 2.3 - а) ДЕ; б) втулка; в) жорстка опора

Схему обробки дослідного зразка наведено на рис. 2.4

V=0,05 м/хв

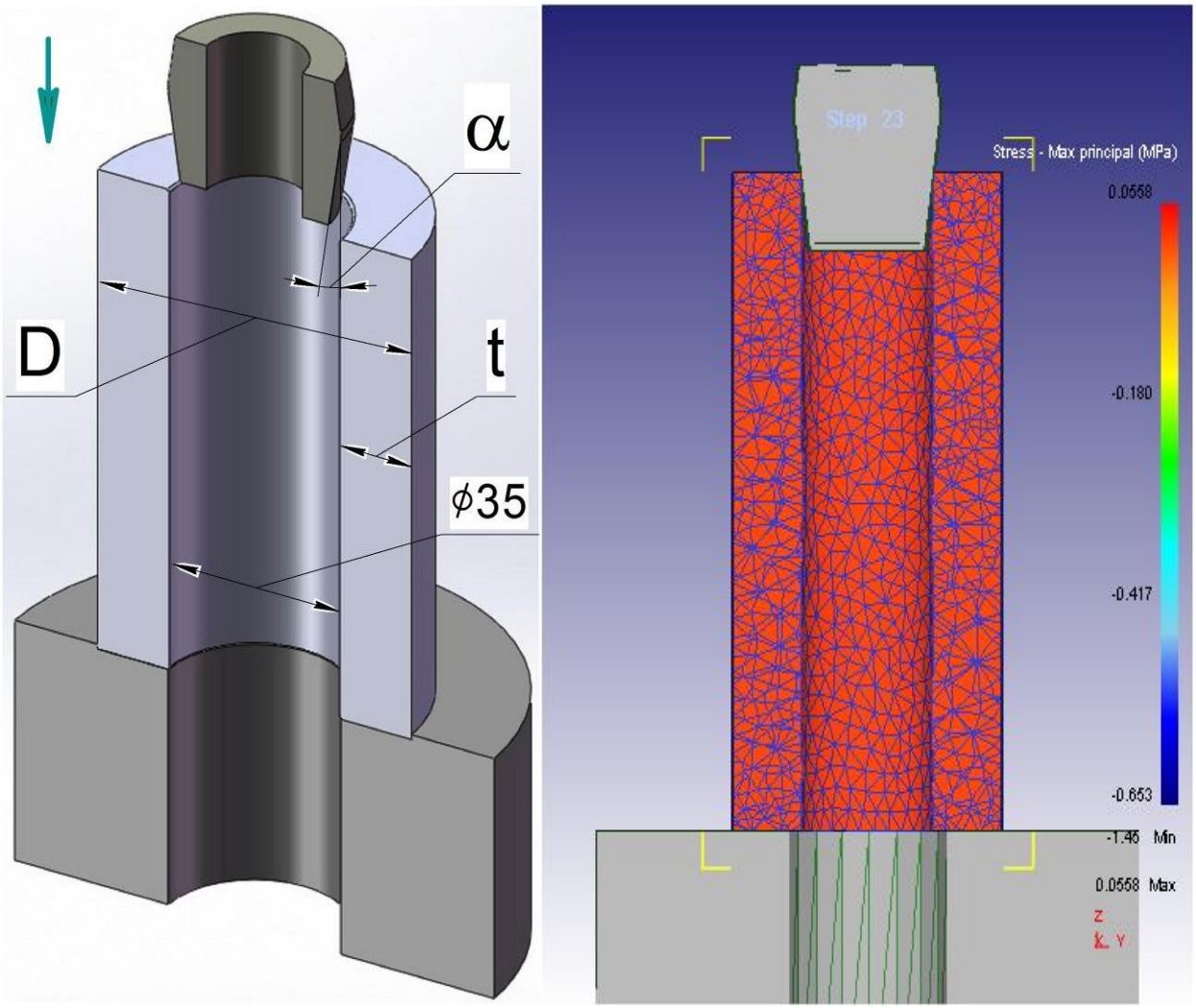


Рисунок 2.4 - Схема обробки

Робочий рух ДЕ задається його рівномірним переміщенням вздовж циліндричного отвору втулки зі сталими навантаженням та швидкістю. Обробка проводиться за схемою стискання, при якій втулка опирається на жорстку нерухому основу.

Змодельовано декілька варіантів взаємодії ДЕ та поверхні циліндричного отвору втулки, в залежності від:

– товщини її стінки;

– матеріалу дослідного зразка;

– кута робочого конуса ДЕ.

У процесі моделювання постійними параметрами були:

– довжина (висота) втулки (L=100 міліметрів);

– діаметр оброблюваного циліндричного отвору (d_0=35 міліметрів);

– номінальний натяг на ДЕ (a=0,1 міліметра, або 0,05 міліметра на сторону);

Змінними параметрами є:

– матеріал досліджуваної деталі (чавун СЧ20, сталь 20 та 45, латунь Л62);

– товщина стінки деталі (t=10 та 20 мм);

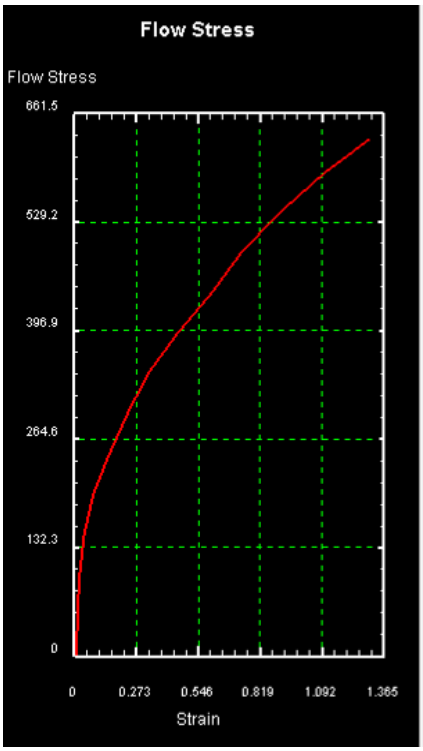
– величина кута робочого конуса ДЕ (α=2, 4, 8 та 12°)

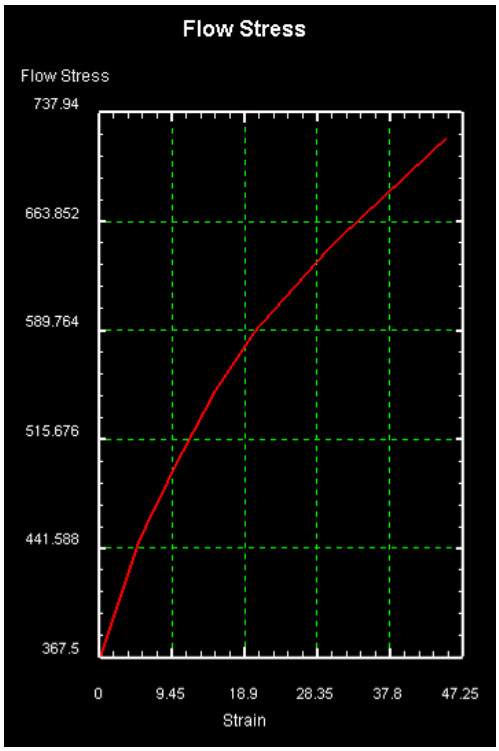
Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона для досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 2.4.

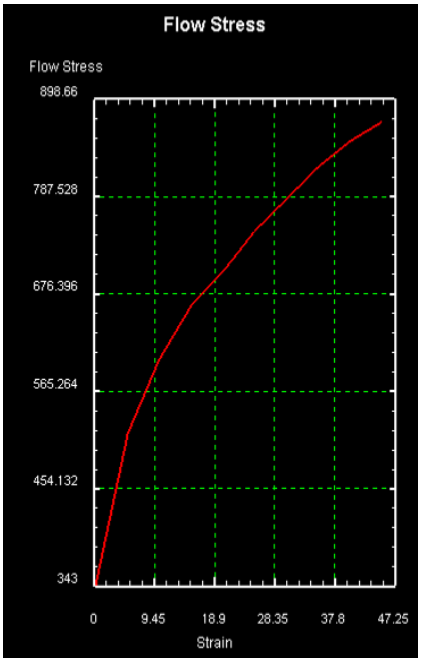
Таблиця 2.4

Матеріал	Модуль пружності Е, МПа	Коефіцієнт Пуассона
Латунь Л62	$1,04x10^5$	0,40
Сталь 20	$2x10^5$	0,27…0,30
Сталь 45	$2,07x10^5$	0,30
Чавун СЧ20	$1,60x10^5$	0,27

Криві зміцнення матеріалів [15] показано на рисунку 2.5

а) 

б) 

в) 

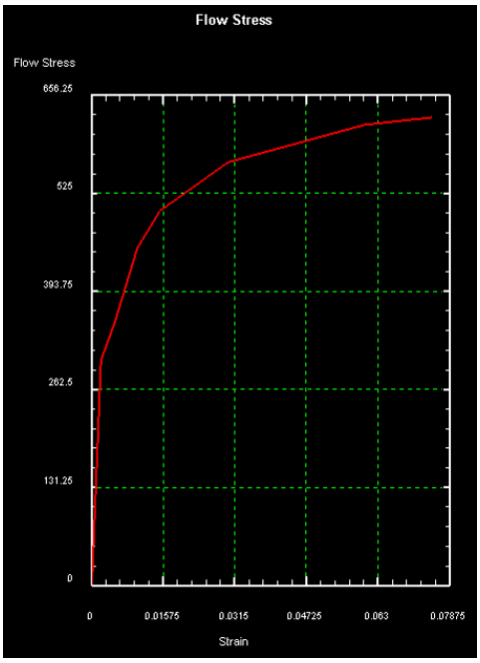
г) 

Рисунок 2.5 - Криві зміцнення: а) - латунь Л62; б) - сталь 20; в) - сталь 45; г) - чавун СЧ20

Об’єктом дослідження є енергосилові параметри та зміна геометричнічних розмірів втулки в її характерних точках Р1, Р2 та Р3 (діаметральні розміри отвору на верхньому та нижньму торцях, а також на половині висоти втулки). Розташування характерних точок показано на рисунку 2.6

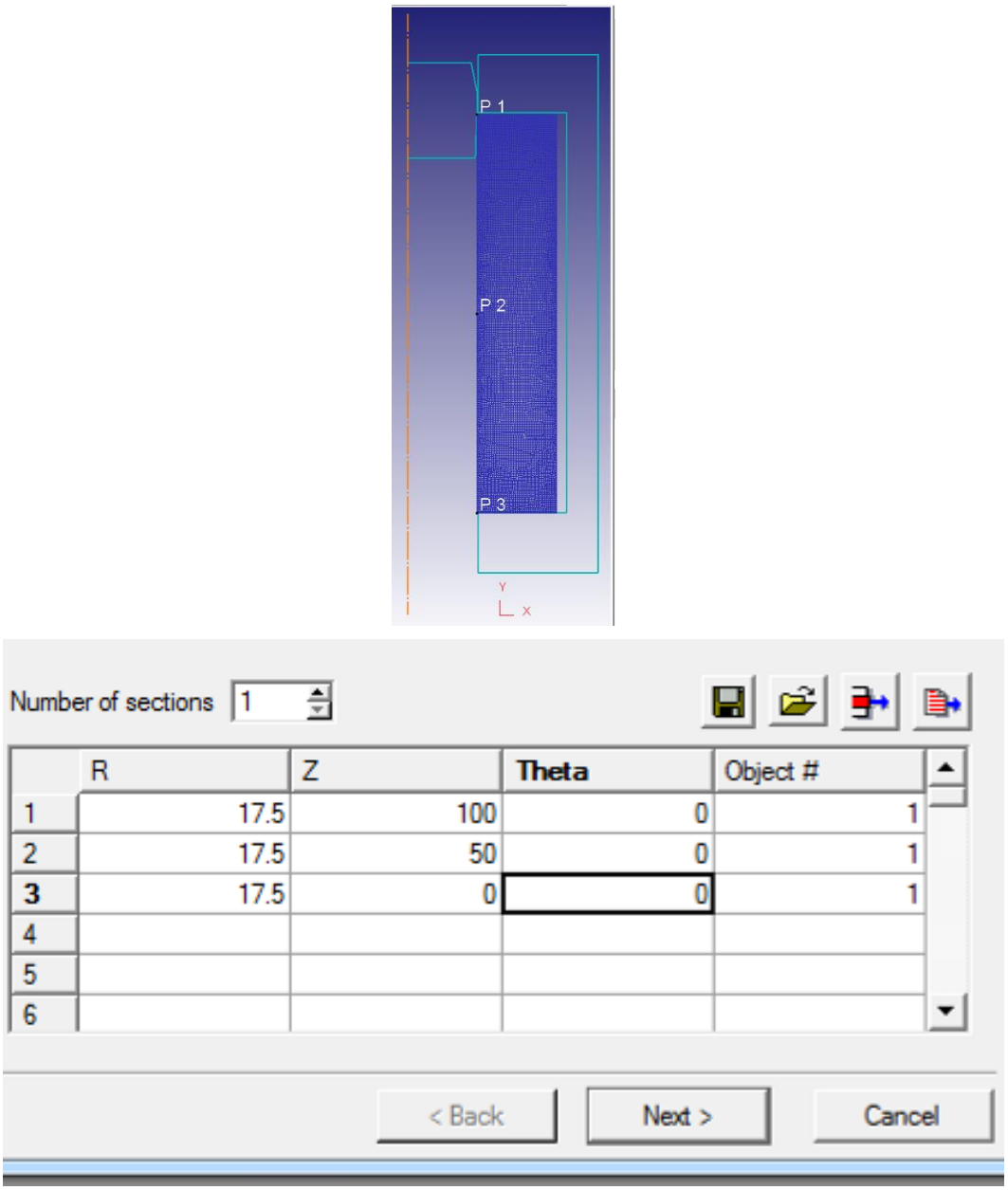


Рисунок 2.5 – Розташування характерних точок P1, P2 та P3 на досліджувальному зразку

2.5 Методика аналізу контактних взаємодій за допомогою COSMOSWorks

COSMOSWorks – це додаток до програмного комплексу SolidWorks, призначений для розв’язання задач механіки здеформованого твердого тіла методом скінченних елементів. Програма розроблена компанією SRAC (нині вона входить у склад SolidWorks). COSMOSWorks працює з

геометричними моделями, створеними у SolidWorks або імпортованими з інших CAD-систем.

Глибока інтеграція з SolidWorks дозволяє зменшити кількість проміжних операцій, зберігаючи при цьому прив'язку граничних умов та результатів до геометрії. Постійне вдосконалення COSMOSWorks передбачає розширення обчислювальних можливостей та функціоналу для відображення інженерних ситуацій, що виникають у практиці.

Комплекс включає три продукти: COSMOSWorks, COSMOSFloWorks та COSMOSMotion.

Всі вони спільно використовують робоче ядро SolidWorks. Це дозволяє передавати дані теплових і гідродинамічних розрахунків із COSMOSFloWorks та навантаження від динамічного аналізу COSMOSMotion.

Додаток COSMOSWorks позиціонується на ринку як інструмент прикладного інженерного аналізу, що дозволяє виконувати більшість стандартних розрахунків у машинобудуванні без надлишкових налаштувань.

Основою COSMOSWorks є метод скінченних елементів. Програма використовує об'ємні тетраедральні та оболонкові трикутні елементи, які можуть мати лінійне або параболічне поле переміщень. В одній моделі не дозволяється одночасне використання твердотільних і оболонкових елементів, що є певним обмеженням.

Контактні взаємодії реалізуються через корекцію глобальної матриці жорсткості. Інші граничні умови (такі, як дистанційне навантаження, або жорстке з'єднання) модифікують матрицю жорсткості системи, створюючи тим самим віртуальний абсолютно твердий об'єкт. Це може призводити до локальних пікових напружень.

Також передбачено p-адаптивне уточнення сітки, тобто збільшення порядку полінома в областях високих градієнтів напружень. Важливо

правильно та грамотно задавати граничні умови, щоб уникнути некоректних розрахунків.

На рисунку 2.6 зображено схема обробки втулки одиничним деформувальним елементом збірної протяжки.

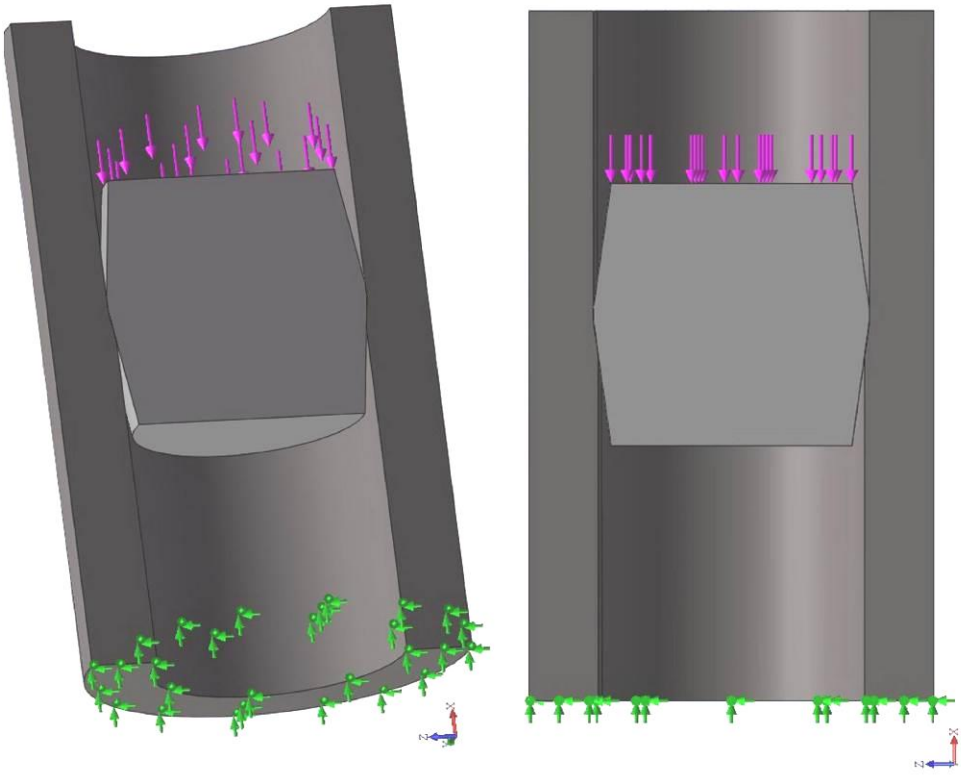


Рисунок 2.6 - Схема обробки втулки одиничним ДЕ

Метою дослідження є візуалізація навантажень, які виникають в зоні контактної взаємодії робочої частини ДЕ та оброблюваної поверхні отвору.

3. Моделювання процесу обробки деформуючим протягуванням та розробка рекомендацій для вдосконалення конструкції збірного протяжного інструмента для обробки циліндричних отворів

3.1 Результати моделювання процесу обробки та графіки залежності розмірів в характерних точках обробленого циліндричного отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщин стінки втулки

Згідно наведеної у розділі 2 методики було проведено ряд віртуальних досліджень, в яких моделювалась обробка отвору у втулках із чавуну, 2-х марок сталей та латуні одним ДЕ при чотирьох кутах нахилу його робочого конуса та двох товщинах стінки зразка. При цьому основна увага приділялась процесу деформації стінок втулки у характерних точках Р1, Р2 та Р3. Ці точки характеризують змінення геометричних розмірів деталі, утворення деформацій та напружень у зоні контакту ДЕ з оброблюваним отвором, а після закінчення обробки втулки показують отримані геометричні розміри циліндричного отвору у даних місцях.

На основі отриманих даних проаналізуємо загальну картину взаємодії ДЕ з оброблюваним циліндричним отвором втулки на основі графиків деформацій, а також інтенсивності деформації та напружень, отриманих в результаті моделювання в DEFORM Post Processor. Слід відмітити, що деякі терміни в ньому позначаються англійською мовою, а саме:

Damage – руйнування;

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

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

Stroke – хід;

Step – крок розрахунку.

Point tracking – відстеження точки

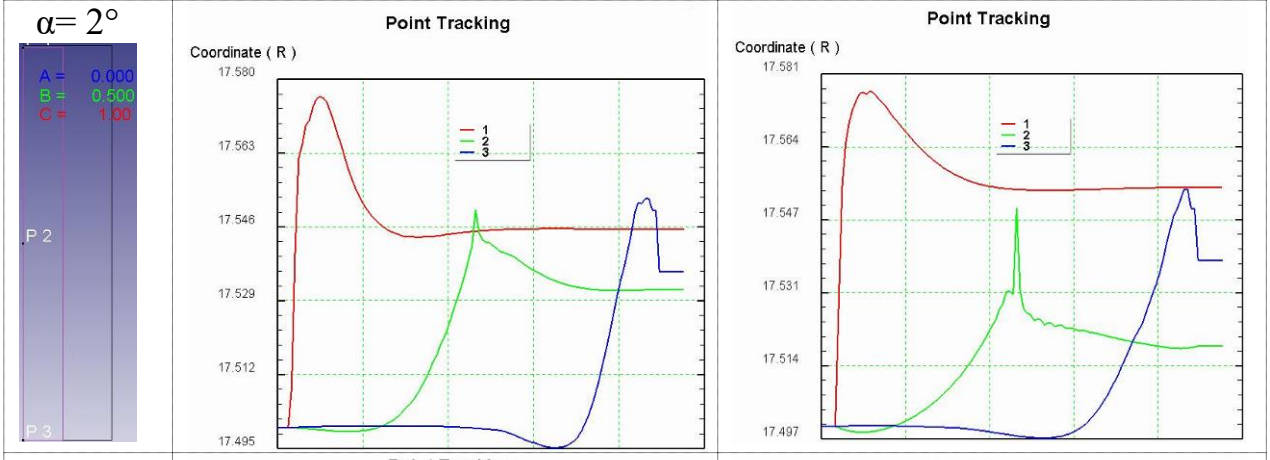
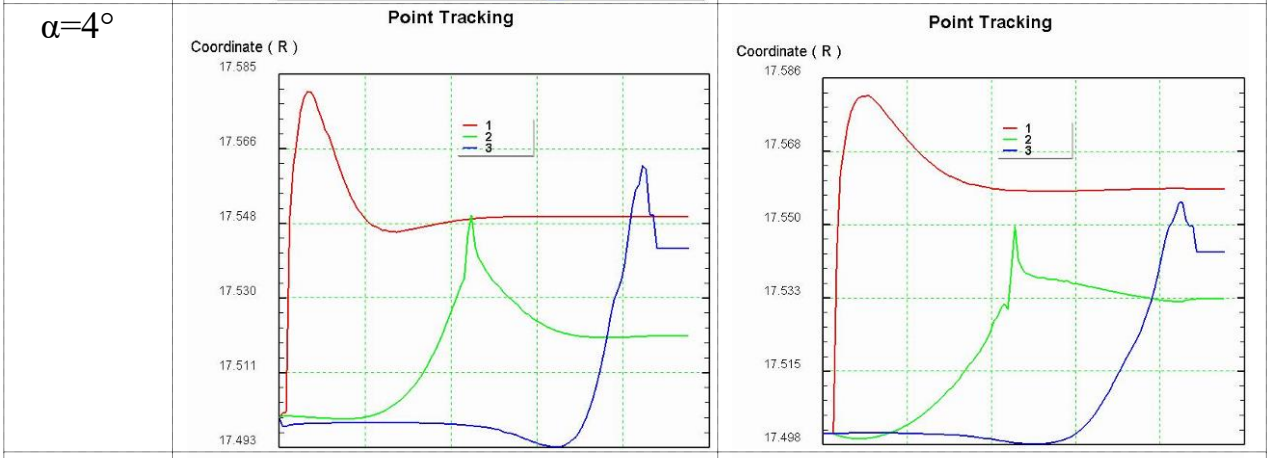
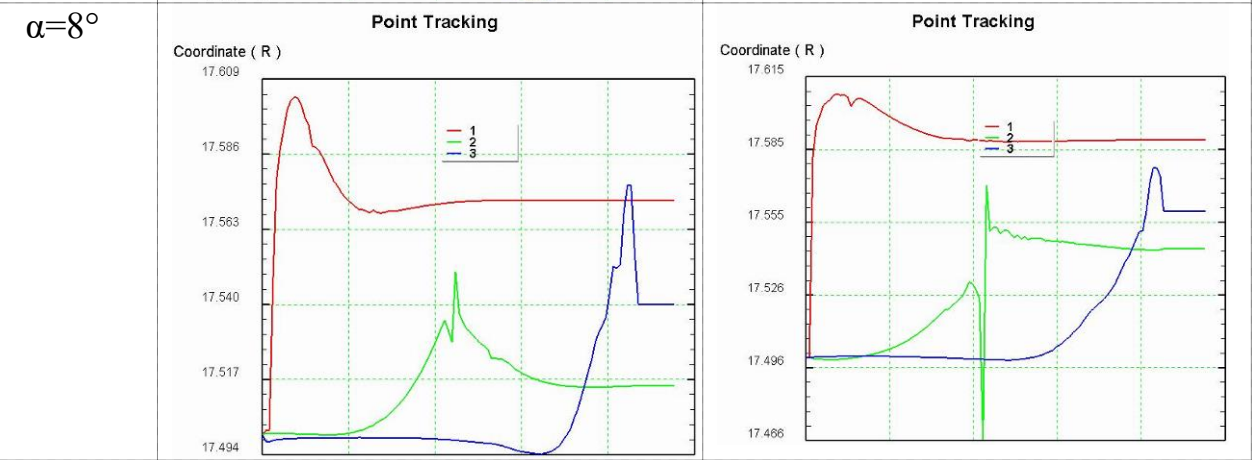
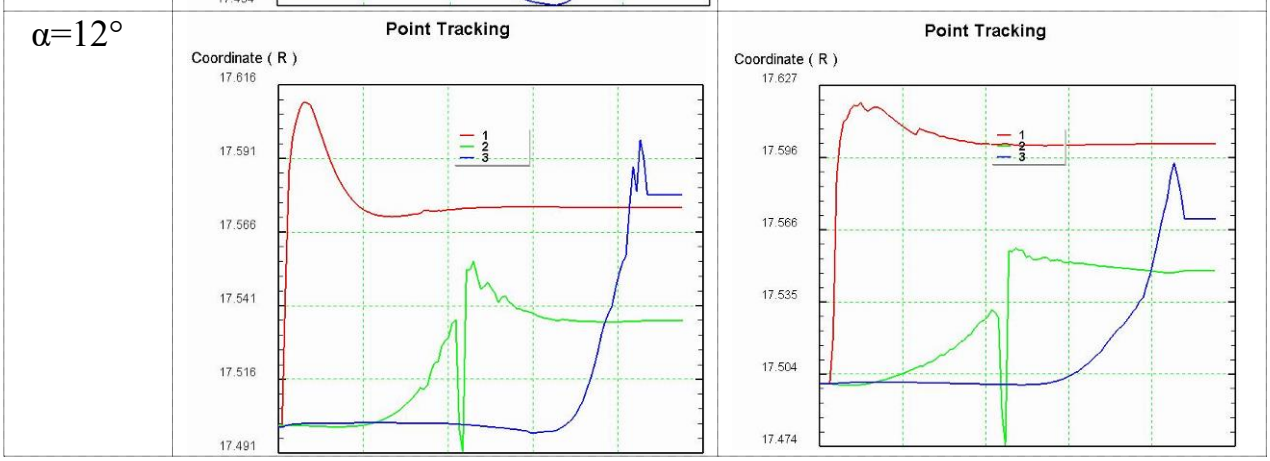
№ п/п	Сірий чавун СЧ20	
	t=10 мм	t=20 мм
α= 2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.1а – Зміна геометричних розмірів циліндричного отвору в характерних точках Р1, Р2 та Р3 в діапазоні кроків 1…115

Кінцеві результати радиальних розмірів обробленого отвору в характерних точках Р1, Р2 та Р3 зведено у таблицю 3.1

Таблиця 3.1 Радиальні розміри у характерних точках Р1, Р2 та Р3 після протягування

Сірий чавун СЧ20						
	t=10 мм			t=20 мм		
	Р1	Р2	Р3	Р1	Р2	Р3
alfa2	17,546	17,532	17,536	17,555	17,518	17,538
alfa4	17,55	17,52	17,542	17,559	17,532	17,544
alfa8	17,572	17,515	17,54	17,589	17,544	17,56
alfa12	17,574	17,536	17,579	17,602	17,548	17,57

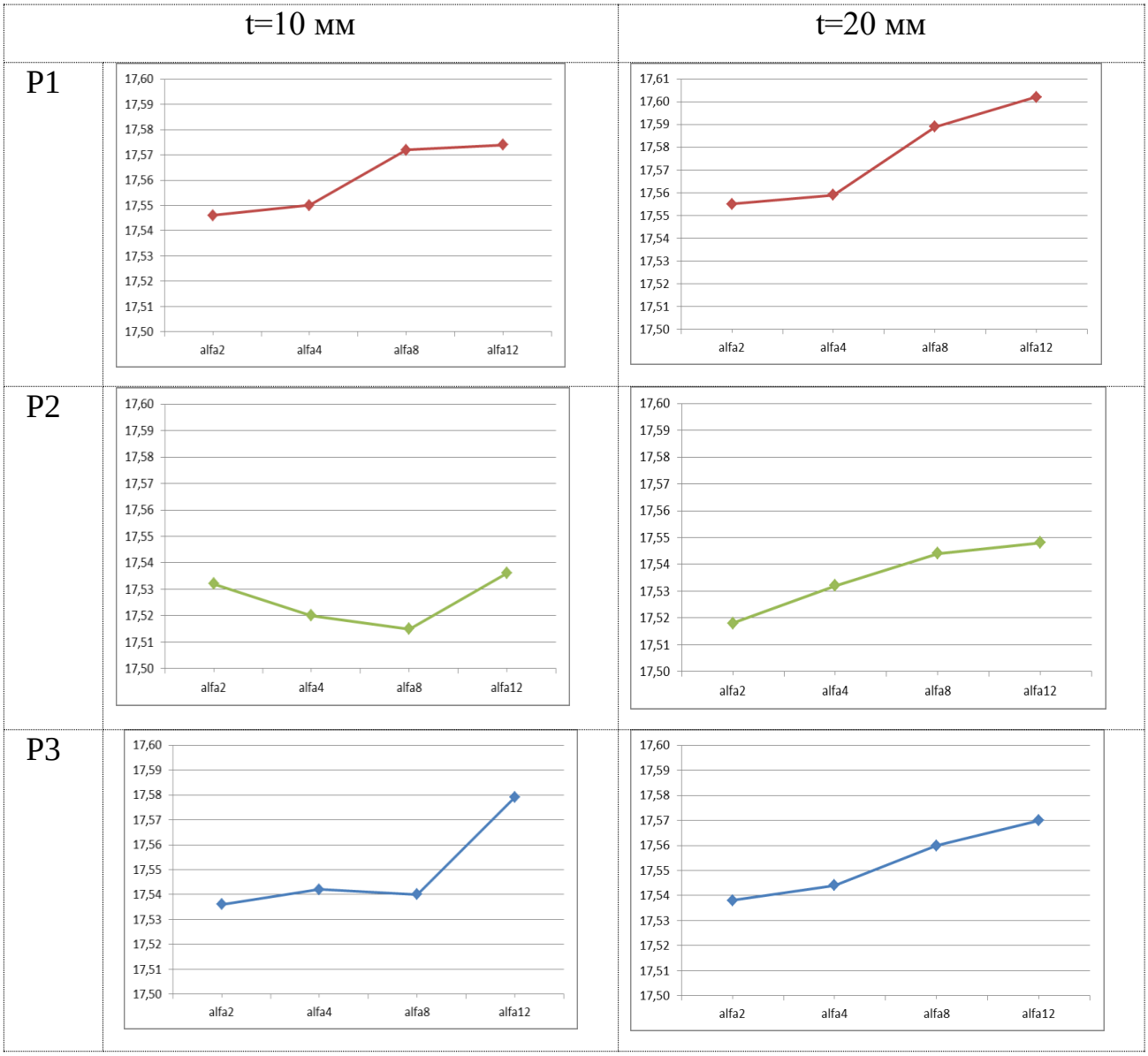


Рисунок 3.1б – Зміна радиального розміру обробленого отвору в залежности від товщини стінки втулки та кута робочого конуса ДЕ

Початок контакту ДЕ з оброблюваною циліндричним отвором втулки по лінії верхнього торцю показано червоними лініями на рис. 3.1 (перши кроки розрахунку). В момент контакту робочого конуса ДЕ з отвором втулки вона остаточно базується відносно прошивки та притискується до нижньої жорсткої опори. При такому способу обробки дуже важливо, щоб обидва торці реальної втулки були з мінімальним допуском перпендикулярності до її поздовжньої вісі. Саме торці втулки відповідають за точність її базування. Після повного входження ДЕ в отвір, він починає контактувати з оброблюваною поверхнею біля своєї циліндричної стрічки (рис. 3.2), тим самим створюючи в зоні контакту зону деформації. Площа контакту між робочим елементом прошивки та отвором залежить від кута робочого конуса ДЕ, натягу на сторону та механічних якостей оброблюваного матеріалу. Циліндрична стрічка ДЕ відповідає за формування заданого розміру отвору втулки та перед нею зазвичай спостерігаються найбільші навантаження на робочий конус.

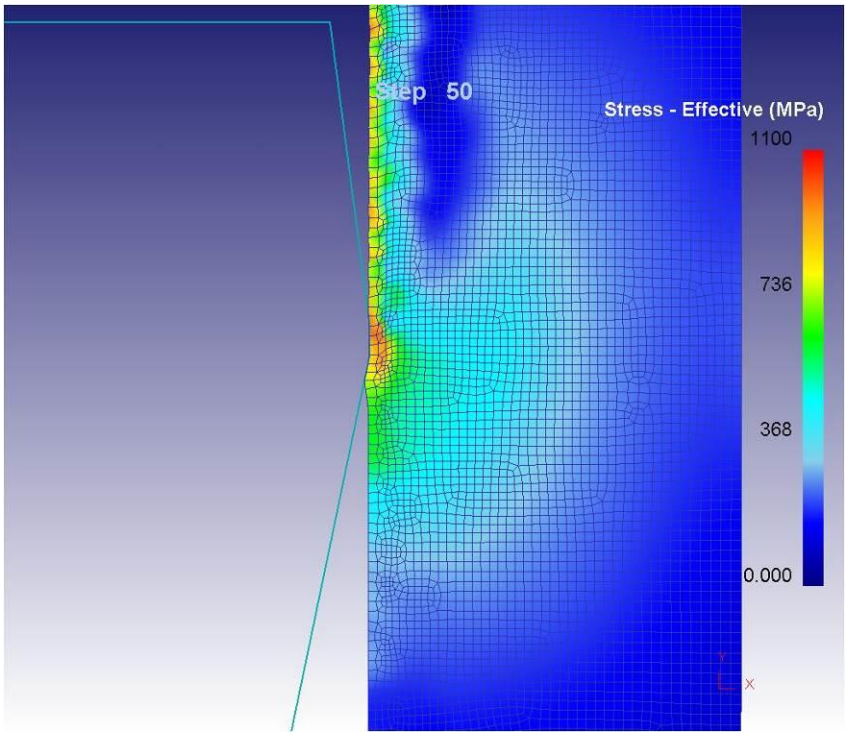


Рисунок 3.2 – Зона контакту ДЕ з оброблюваною поверхнею отвору

Найбільші піки на графіках відповідають моменту взаємодії оброблюваної поверхні в характерних точках зі стрічкою ДЕ, яка формує

заданий розмір отвору втулки та де зазвичай спостерігаються максимальні навантаження на робочий орган інструмента. Зменшення висоти графіка по вісі Y після проходження ДЕ свідчить про те, що відбулась так звана усадка радіального розміру обробленого отвору, що збігається з результатами реальних випробувань при протягуванні чавунних втулок твердосплавними ДЕ [7,9]. Аналіз графиків показує, що із збільшенням кута ДЕ розбивка отвору по торцях втулки зростає, а посередині на всіх режимах обробки спостерігається тільки усадка отвору.

На рис. 3.3 показано зону характерної точки Р1 (циліндричний отвір по верхньому торцю) в збільшеному вигляді. На ньому видно, що діаметральний розмір отвору на верхньому торці після проходження ДЕ дещо збільшився проти заданого, а сам верхній торець зазнав так званого «випучення». Саме цей ефект має назву «бочкоподібності» втулок, він є небажаним наслідком обробки в плані точності обробки та геометричних розмірів обробленої деталі. Для його усунення в реальних умовах обробки може знадобиться додаткова механічна обробка, що в свою чергу веде до підвищення матеріальних затрат та часу.

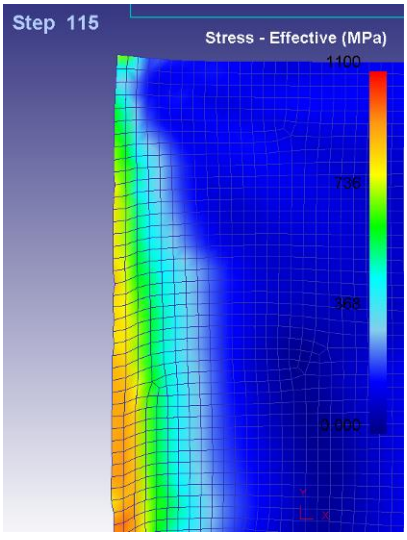


Рисунок 3.3 – Зона характерної точки Р1 в районі верхнього торцю після обробки отвору

Зелена лінія на графіку показує поведінку оброблюваної поверхні деталі на протягу всього процесу деформування. Характерні піки вниз по

вісі Y в межах кроків 45-65 свідчять про те, що при наближенні стрічки ДЕ перед нею починає формуватись характерний валик із ОМ, розміри якого збільшуються при кутах робочого конуса до 12°. При проходженні стрічки ДЕ радиальний розмір отвору стримко збільшується до заданого розміру, а потім дещо зменшується до певної величини, яка залежить від геометричних параметрів процесу протягування та механічних якостей ОМ.

Сіня лінія на графіку характерізує зміни радиального розміру в зоні характерної точки 3, яка розташована на нижньому торці деталі. Характерний пік наприкінці обробки можна пояснити проходженням ДЕ скрізь отвір.

Слід відмітити, що в момент виходу ДЕ із втулки (рис. 3.4), вона внаслідок пружних деформацій в чавуні намагається дещо «підстрибнути» догори.

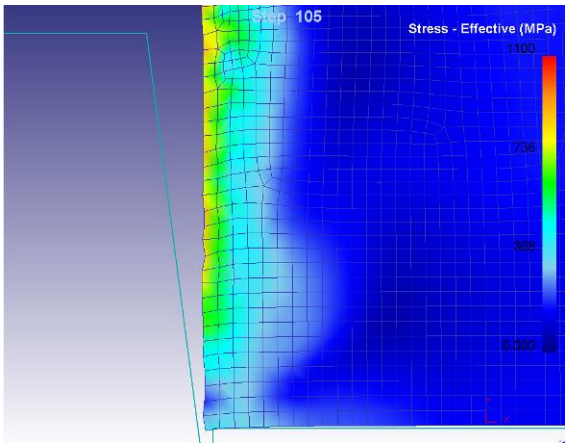


Рисунок 3.4 – Момент закінчення обробки

Це явище також підтверджується результатами практичних дослідів з деформуючого протягування чавунних втулок [7,9]. Тому під час проектування затискних пристосувань для виконання деформуючого протягування за схемою стискання є сенс в примусовому обмеженні вертикального переміщення деталі до малих значень. Поверхня нижнього торцю деталі після закінчення обробки також отримує незначне випучення (неплощинність), а сам отвір може отримати ефект розбивки. Це свідчить про те, що об’єм металу в цій зоні претерпає стискаючи напруження на поверхні отвору, значні розтягуючі напруження всередині та зовнішній

поверхні й в умовах схеми стискання має можливість змінити геометрію деталі. Появу неплощинності на торцях можна пояснити тим, що при протягуванні втулок з товщиною стінки t=10…20 мм, контактні тиски в зоні робочого конуса ДЕ з оброблюваною поверхнею отвору досягають великих значень (до 3 ГПа). При цьому відбувається осьова течія оброблюваного матеріалу в значному обсягу. При вході ДЕ в оброблюваний отвір частина матеріалу втулки витісняється в напряму, якій є протилежним до вектора швидкості переміщення прошивки, а по мірі наближення ДЕ до виходу з отвору частина оброблюваного матеріалу втулки витісняється в напряму, що співпадає з вектором швидкості переміщення.

3.2 Аналіз результатів масиву даних, які були отримані під час моделювання процесу деформуючого протягування циліндричних отворів у втулках із сталей 20,45 та латуні Л62

Результати обробки даних у вигляді значень початкових та кінцевих радиальних розмірів отвору втулки в характерних точках, що були отримані в результаті проведених моделювань, зображено на рисунках 3.5-3.7.

Аналіз отриманих даних, які зведені на графіках (рис. 3.5а та 3.5б), показує, що для втулки, виготовленої із латуні Л62 для диапазону кутів робочого конуса ДЕ від 2 до 12° спостерігається розбивка обробленого отвору у характерній точці Р1 (верхній торець деталі). Причому, для втулок з товщиною стінки 20 мм це явище стає менш помітним. У точках Р2 та Р3 (відповідно, це середина та нижній торець деталі) явище розбивки отвору спостерігається також, але її величина не перевищує 0,165 мм. Поясненням тому може бути те, що верхній торець втулки не заневолений, внаслідок чого отвір в цьому місці деформується в більшому ступені. У точці Р2 жорсткість деталі вже вища, а нижній торець втулки в точці Р3 під час обробки досить щільно притискається до жорсткої основи під дією осьових сил від прошивки. У точці Р2 розбивка отвору має малі значення. По мірі

зростання кута робочого конуса α явище розбивки циліндричного отвору приймає більші значення.

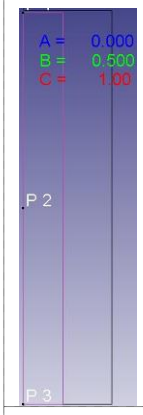
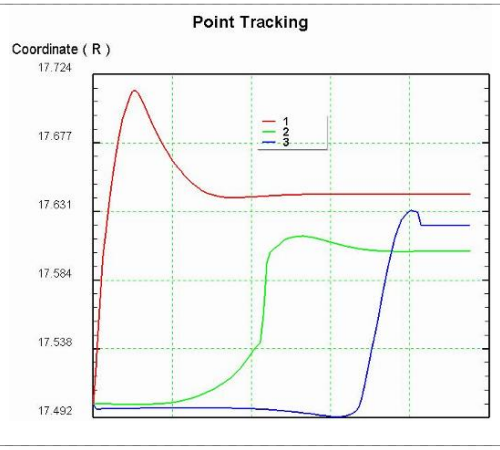
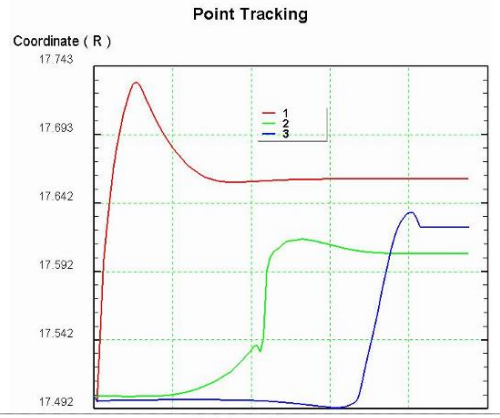
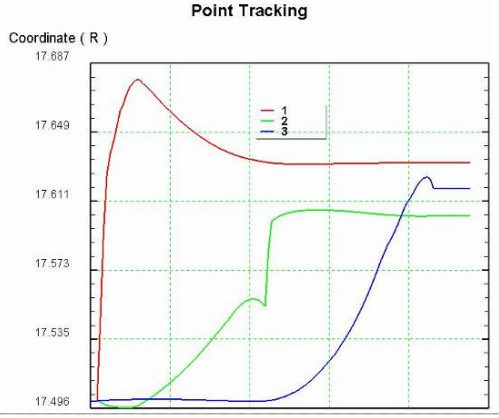
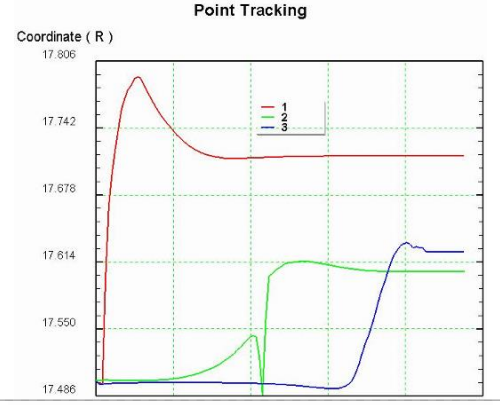
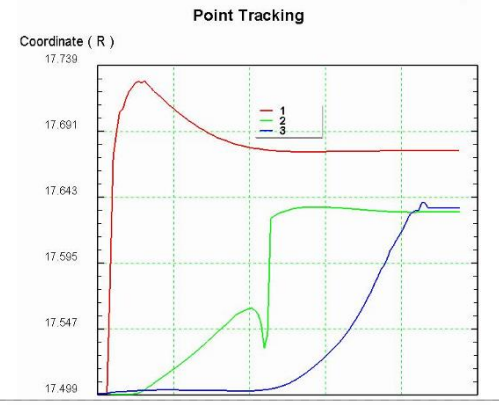
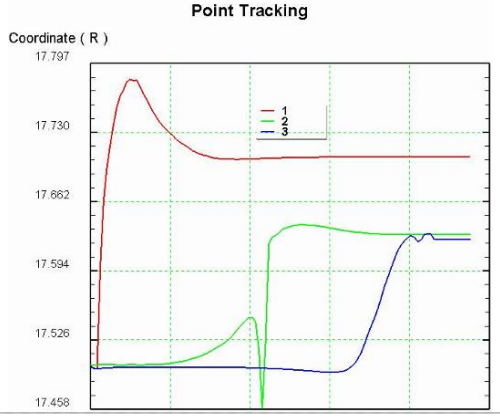
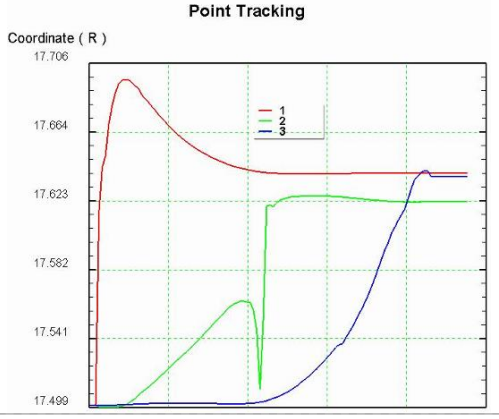
№ п/п	Латунь Л62	
	t=10 мм	t=20 мм
α= 2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.5а - Залежність радиального розміру оброблюваного отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки (латунь Л62)

Отримані результати радиальних розмірів циліндричного отвору після обробки в точках Р1, Р2 та Р3 зведено у таблицю 3.2

Таблиця 3.2 Радиальні розміри у точках Р1, Р2 та Р3 після протягування

Латунь Л62						
	t=10 мм			t=20 мм		
	Р1	Р2	Р3	Р1	Р2	Р3
alfa2	17,642	17,601	17,621	17,643	17,603	17,614
alfa4	17,66	17,603	17,624	17,632	17,603	17,618
alfa8	17,715	17,605	17,625	17,676	17,632	17,635
alfa12	17,705	17,629	17,625	17,64	17,623	17,638

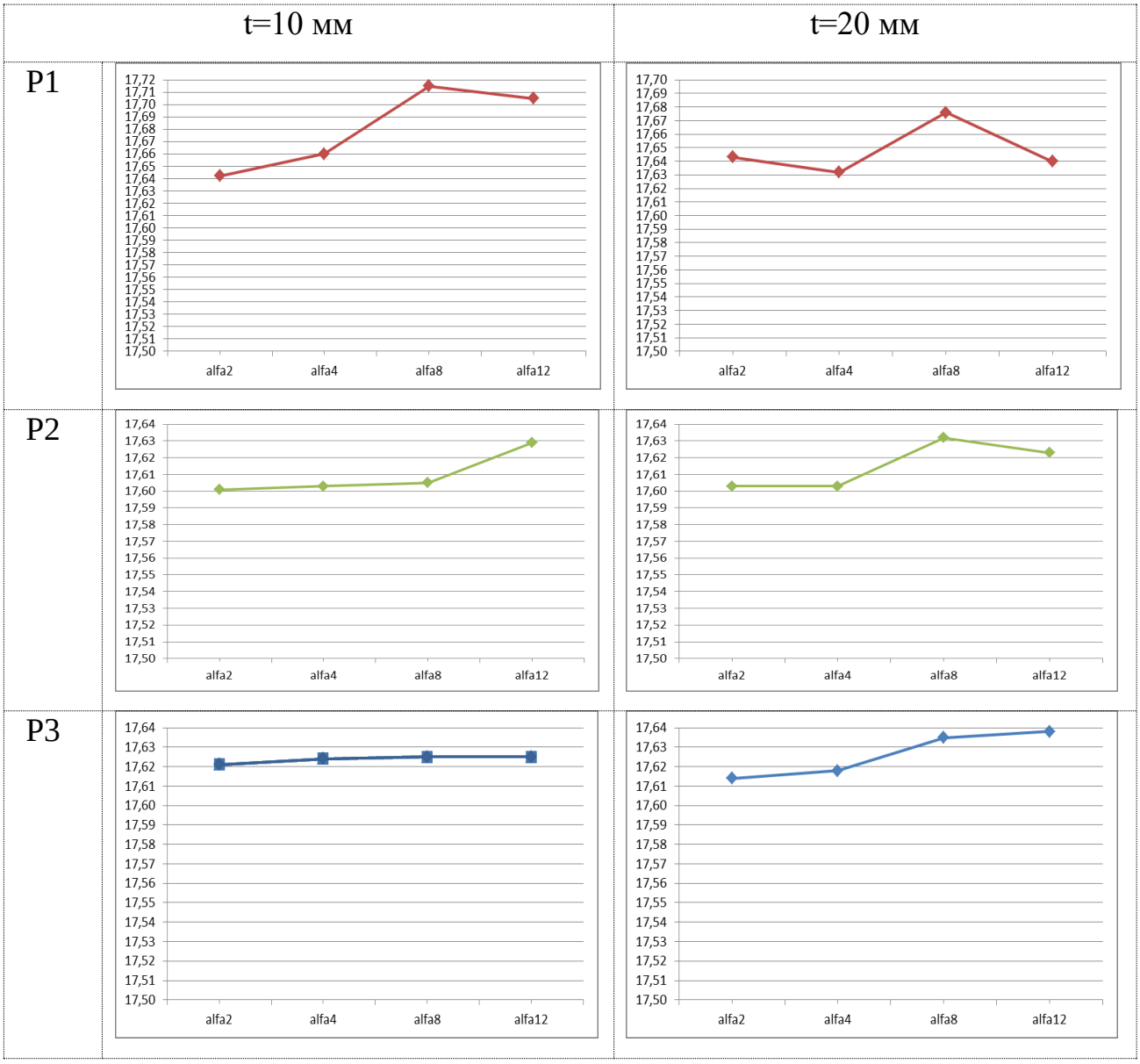


Рисунок 3.2б – Зміна радиального розміру обробленого отвору в залежности від товщини стінки втулки та кута робочого конуса ДЕ

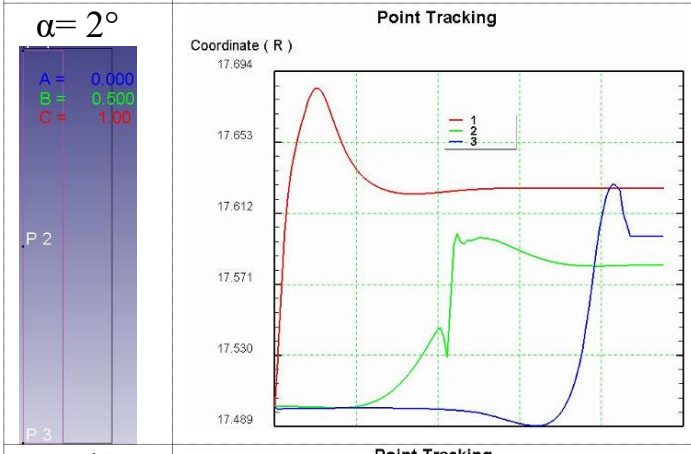
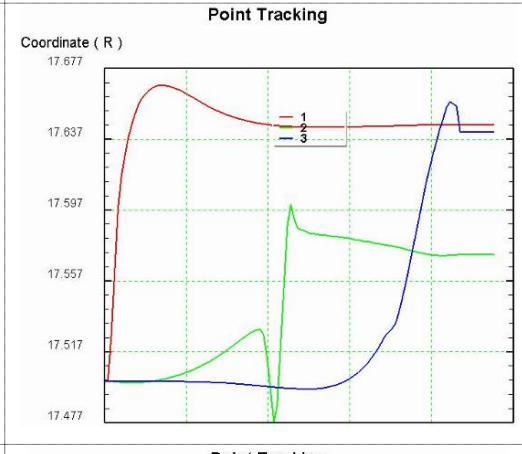
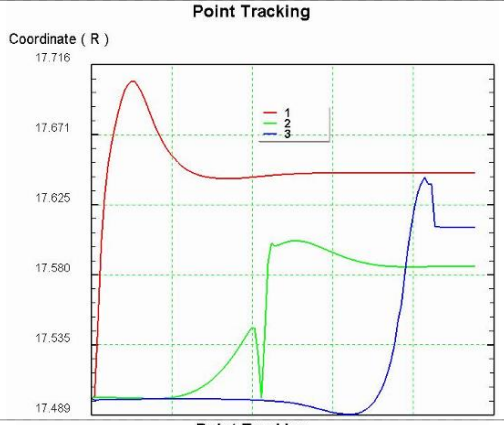
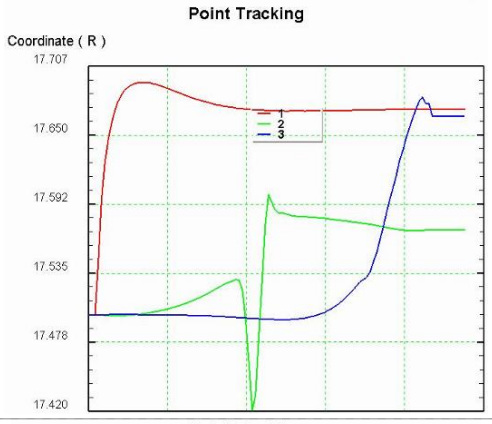
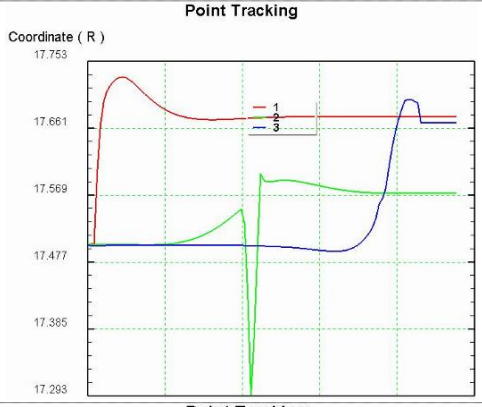
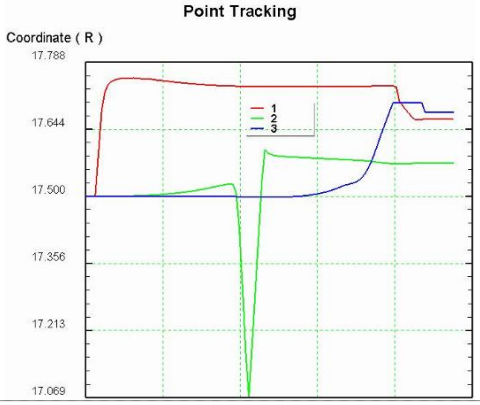
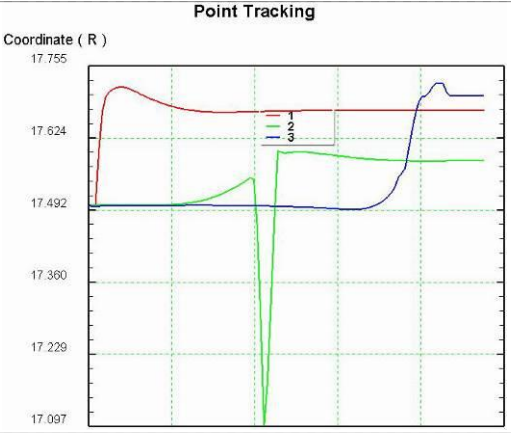
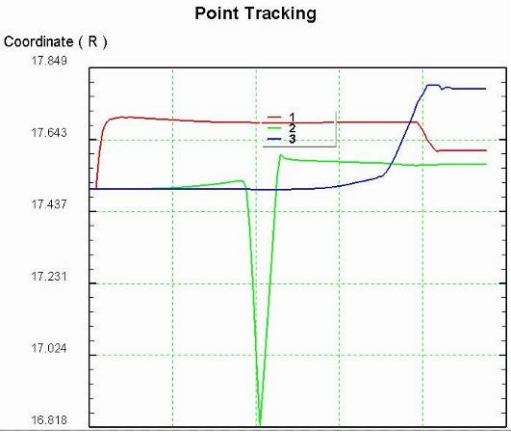
№ п/п	Сталь 20	
	t=10 мм	t=20 мм
α= 2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.6а - Залежність радиального розміру оброблюваного отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки (сталь 20)

Отримані результати радиальних розмірів обробленого циліндричного отвору в характерних точках Р1, Р2 та Р3 зведено у таблицю 3.3

Таблиця 3.3 Радиальні розміри у точках Р1, Р2 та Р3 після протягування

Сталь 20						
	t=10 мм			t=20 мм		
	Р1	Р2	Р3	Р1	Р2	Р3
alfa2	17,627	17,582	17,599	17,645	17,572	17,641
alfa4	17,646	17,585	17,61	17,671	17,571	17,665
alfa8	17,676	17,571	17,668	17,66	17,571	17,68
alfa12	17,764	17,582	17,7	17,612	17,571	17,778

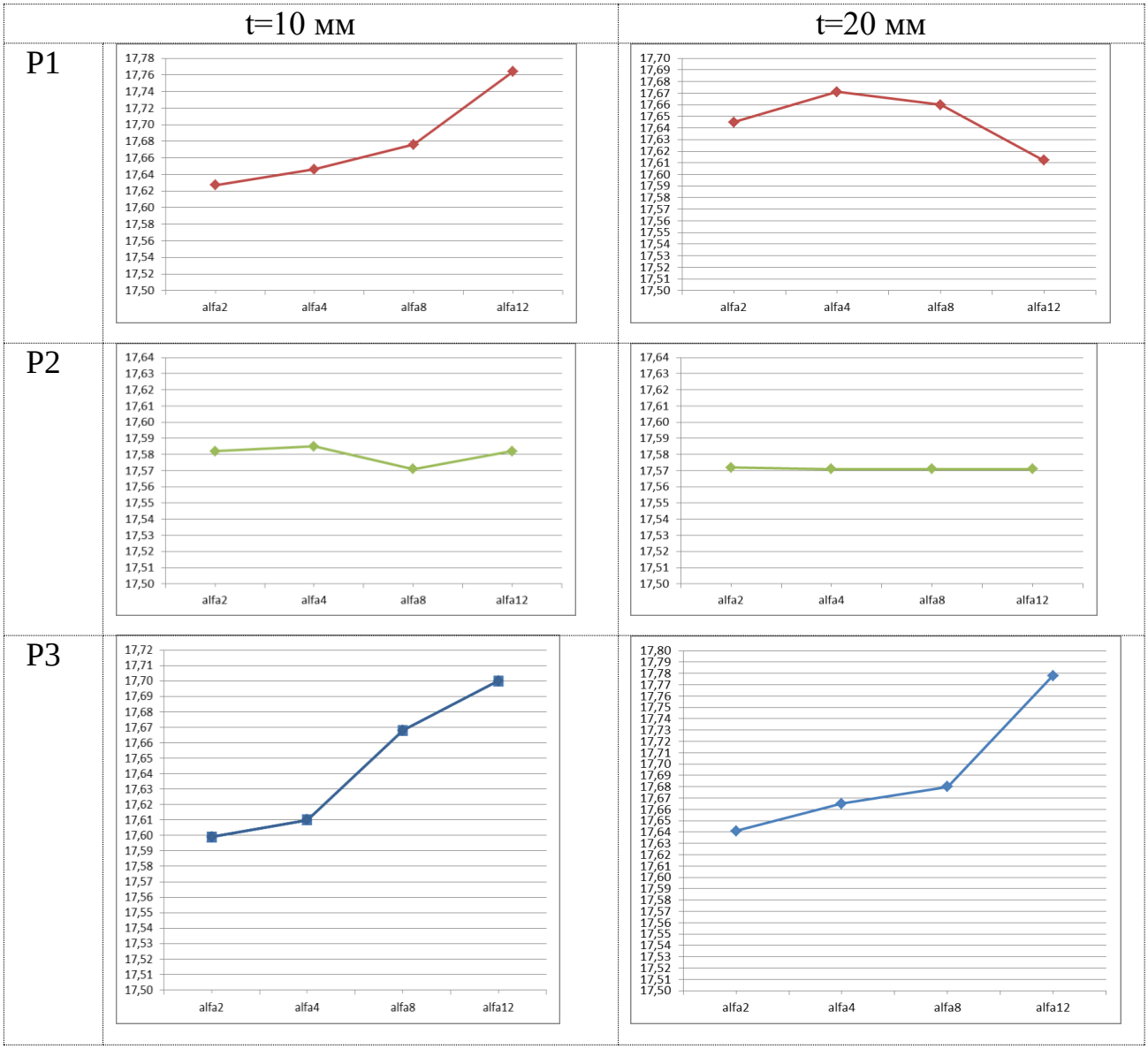


Рисунок 3.6б – Зміна радиального розміру обробленого отвору в залежности від товщини стінки втулки та кута робочого конуса ДЕ

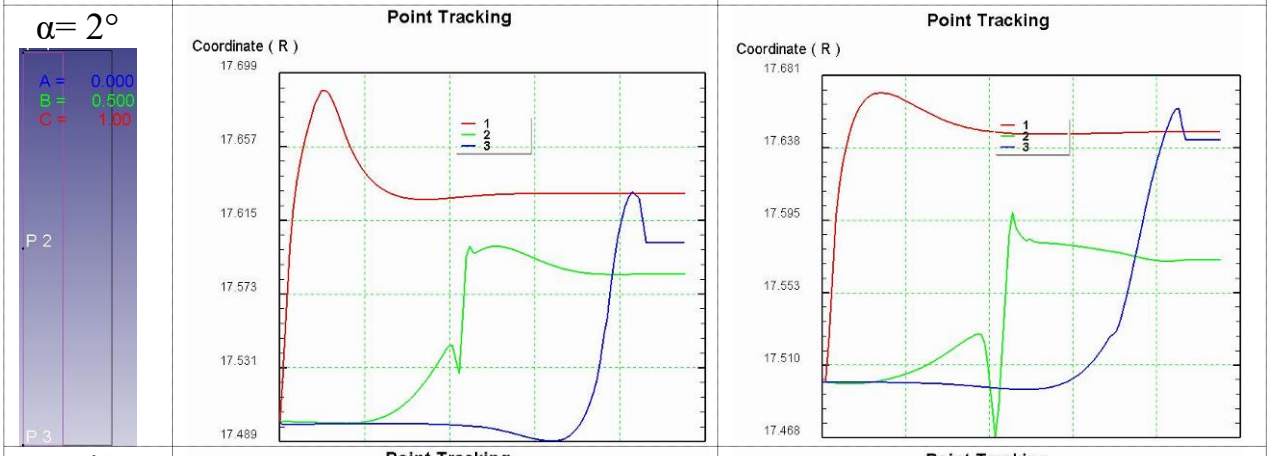
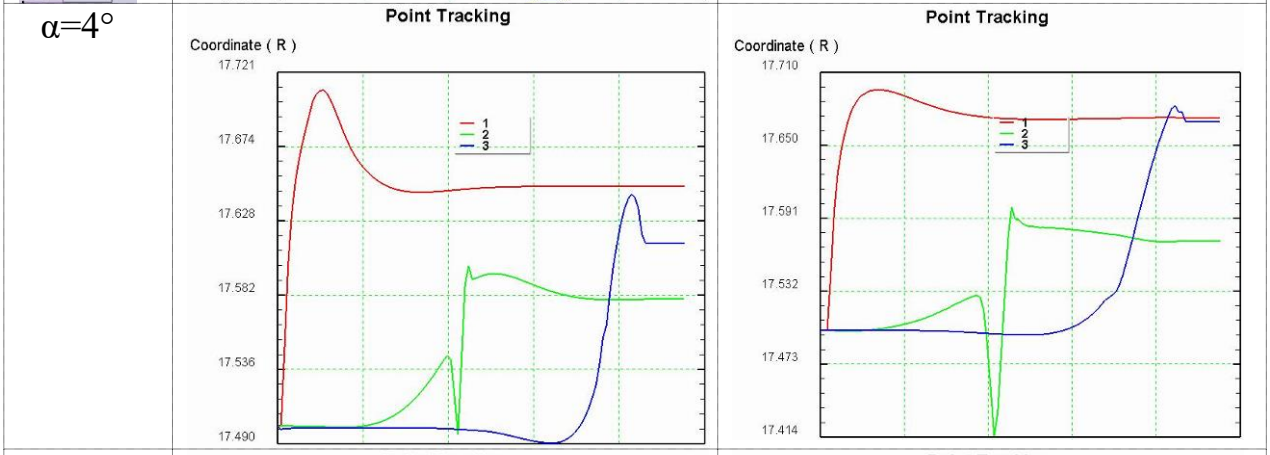
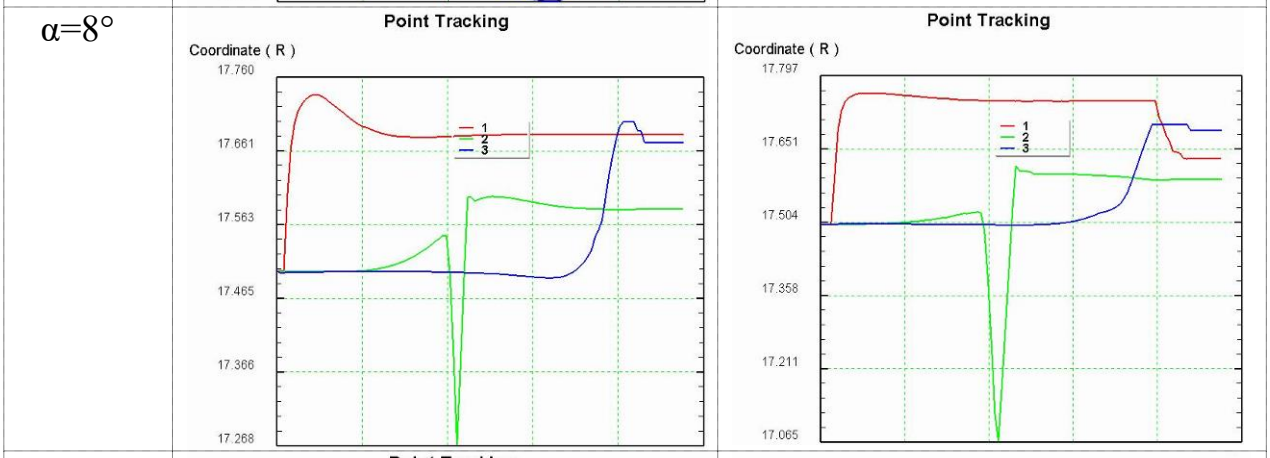
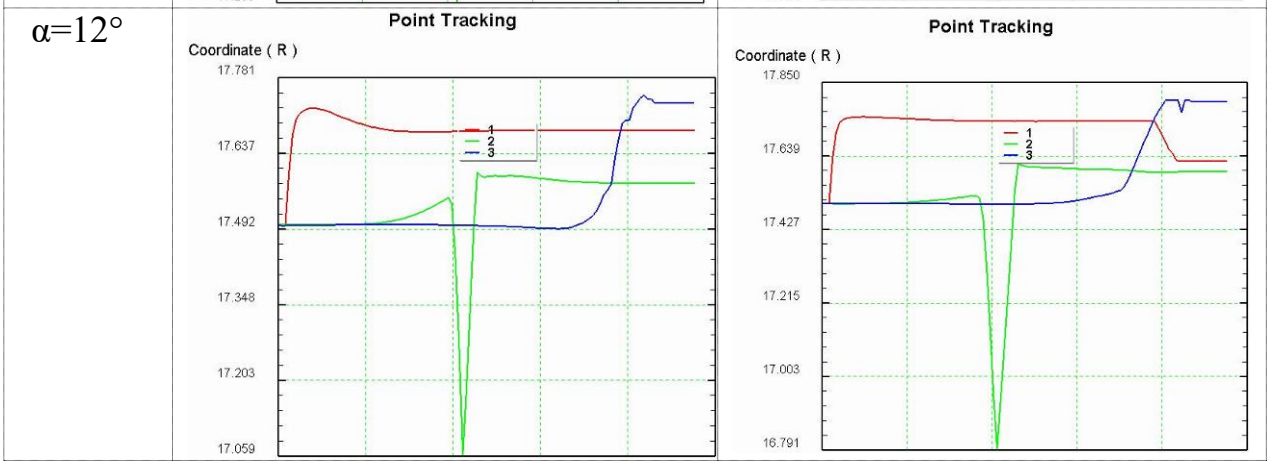
№ п/п	Сталь 45	
	t=10 мм	t=20 мм
α= 2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.7а - Залежність радиального розміру оброблюваного отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки деталі (сталь 45)

Отримані результати радиальних розмірів обробленого отвору в точках Р1, Р2 та Р3 зведено у таблицю 3.4

Таблиця 3.4 Радиальні розміри у точках Р1, Р2 та Р3 після протягування

Сталь 45						
	t=10 мм			t=20 мм		
	Р1	Р2	Р3	Р1	Р2	Р3
alfa2	17,63	17,584	17,602	17,647	17,572	17,643
alfa4	17,649	17,579	17,614	17,673	17,572	17,67
alfa8	17,683	17,583	17,672	17,631	17,59	17,688
alfa12	17,68	17,579	17,782	17,623	17,593	17,794

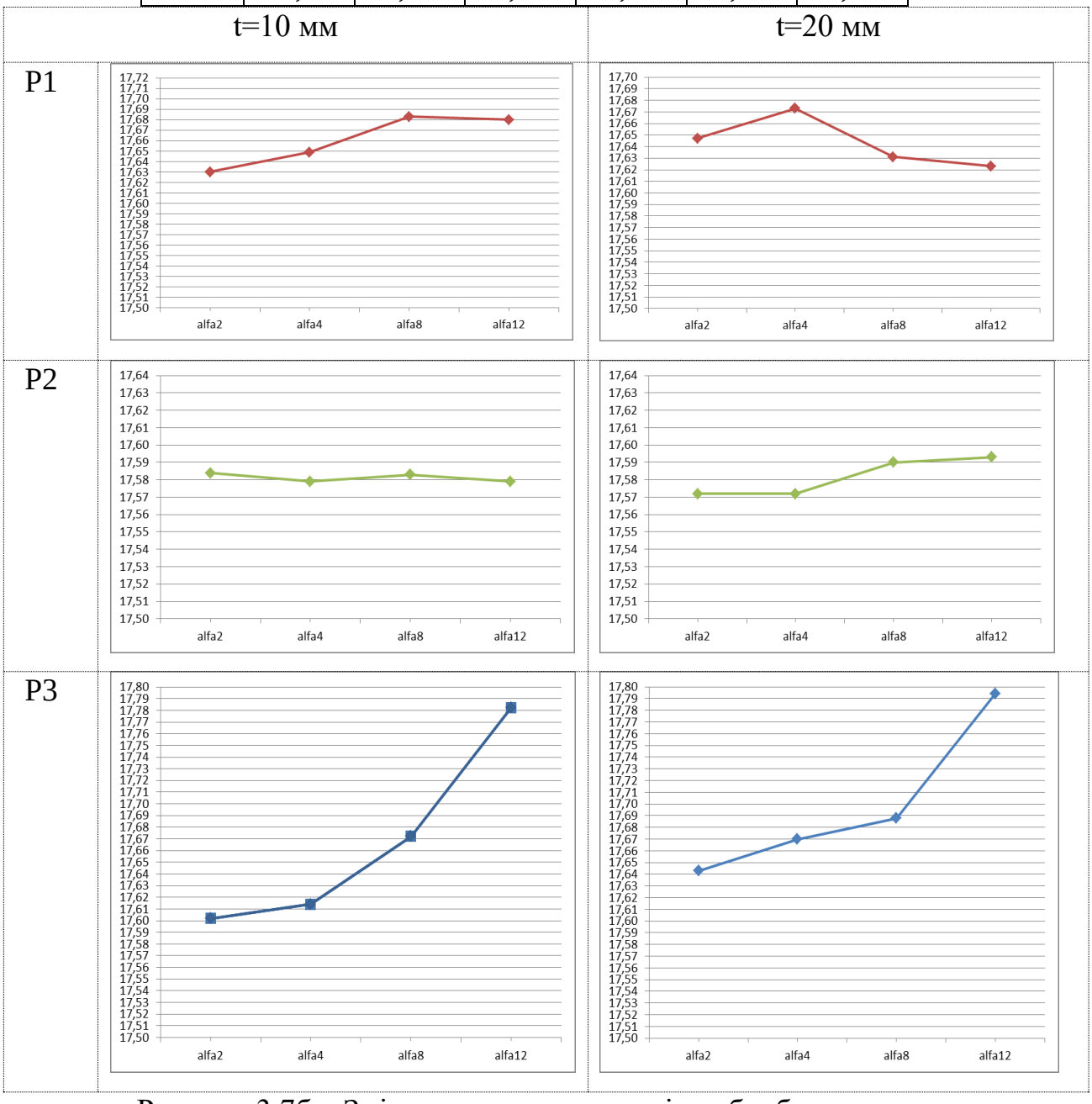


Рисунок 3.7б – Зміна радиального розміру обробленого отвору в залежности від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки деталі

При зміні кута робочого конуса ДЕ від 2 до 12° та товщини стінки втулки від 10 до 20 мм спостерігається явище зростання перед ДЕ характерного «валику» з оброблюваного матеріалу, що показує про наявність пластичної деформації в місці контакту в тому числі й у чавунів.

Для сталей 20 та 45 характер деформацій в місці контакту відрізняється. Явище розбивки отвору у характерних точках Р1, Р2 та Р3 приймає досить виражений характер. При збільшенні кута α для товщині стінки t_0=20 мм явище розбивки отвору у зоні його окрайки з верхнім торцем втулки знижується. Це пояснюється впливом пружно-пластичних деформацій та механічними властивостями вуглецевих сталей марок 20 та 45. У точці Р2 значення розбивкиа отвору мінімальне й не перевищує 0,025…0,028 мм на сторону. По мірі зростання кута робочого конуса α явище розбивки практично не змінюється. В характерній точці Р3 при t_0=10 мм фіксується розбивка отвору, яка поступово збільшується по мірі зміни кута робочого конуса ДЕ від 2 до 12°. Для товщіни t_0=20 мм характер деформації отвору такий же.

В результаті аналізу графіків залежностей розбивки циліндричного отвору в точках Р1 та Р3, які наведені на рисунках 3.5а та 3.5б, можна відмітити, що для втулок із латуні Л62 для товщини стінки деталі t_0=10 та 20 мм відмічається зростання величини розбивки отвору в досліджуваних точках при збільшенні кута робочого конуса ДЕ. Наприклад, в точці Р1 зростання відмічається для товщини стінки деталі t_0=10 мм, а максимум зростання відповідає ДЕ з величиною кута α=8° та становить до 0,165 мм на сторону. Характер зміни радиального розміру в точці Р3 дещо відрізняється. З отриманих в процесі моделювання обробки в програмному середовищі Deform даних (табл. 3.2) можливо побачити, що радиальний розмір у характерній точці Р3 практично не зростаєя при збільшенні кута ДЕ та складає біля 0,05…0,08 мм. Таке відхилення точок Р1 та Р3 можна пояснити таким чином, що в зоні свого верхнього торцю оброблювана втулка не має заневолення. При цьому нижній торець деталі (зона точки Р3) під дією осьової сили протяжного інструмента міцно притискається до

жорсткої основи. При товщині стінки втулки t_0=20 мм характерна точка Р1 має аналогічний вигляд. Максимальна величина розбивки циліндричного отвору відбувається при куті робочого конуса ДЕ α=8° і дорівнює значенню 0,08 мм на сторону. В характерній точці Р3 спостерігається невелике зростання величини розбивки отвору при збільшенні кута ДЕ, де максимальне значення складає 0,08 мм на сторону для кута робочого конуса ДЕ α=12°.

Результати аналізу графіків залежності розбивки отвору в точках Р1 та Р3 від зміни кута робочого конуса ДЕ для сталей 20 та 45 показують, що розглянуте явище розбивки оброблюваного отвору втулки має досить виражений характер як на дослідних зразках, що випробовувались в реальних умовах [7,9], так й під час віртуального моделювання методом кінцевих елементів.

Зростання величини розбивки отвору втулки яскраво виражено в точках Р1 та Р3. Найбільше зростання значень радиального розміру отвору втулки відбувається в точці Р3, де його величина починає зростати при куті ДЕ від α=2° до кута α=12° і має максимальний радиальний розмір до 0,25 мм на сторону. В характерній точці Р1 явище розбивки отвору спостерігається до кута ДЕ α=2° та становить до 0,07 мм, а потім значення зростає до значень 0,23 мм при куті α=12°. Графік, на якому показані дані для товщини стінки деталі t_0=20 мм має схожий характер, при цьому величина розбивку отвору має дещо менші значення, ніж для товщини t_0=10 мм. В точці Р1 спостерігається аналогічне зростання величини розбивки до кута α=4°, яке становить 0,12 мм, а потім графік йде на спад. Також спостерігається суттєве зростання розбивки отвору в точці Р3. При цьому слід відмітити, що найбільш виражене явище зростання відбувається при кутах ДЕ в диапазоні від α=8° до α=12°. Максимальне значення розбивки становить до 0,244 мм на сторону, що є найбільшим зафіксованим показником розбивки отвору для сталі 45.

Після аналізу графіків, на яких зображено отримані значення зміни радиального розміру циліндричного отвору для матеріалу сірий чавун СЧ20

t=10 мм видно, що для характерної точки Р1 верхнього торцю спочатку спостерігається невелика (до 0,005 мм) усадка отвору. При збільшенні кута робочого конуса до значень α=4° до α=12° розбивка починає зростає й сягає значення 0,024 мм. Слід відмітити, що при куті робочого конуса ДЕ α=4° має розбивка отвору в точці Р1 відсутня. Максимальне значення розбивки оброблюваного отвору припадає на кут ДЕ α=12° при t=20 мм та складає до 0,052 мм на сторону. Це можна пояснити тим, що чавун у верхній частині втулки не має заневолення та під дією сил від ДЕ претерпає пружно-пластичні деформації. Після проходження ДЕ поверхневий шар металу частково пластично деформується й отриманий розмір не співпадає з радиальним розміром ДЕ (17,55 мм). Зміни у характерній точці Р2 мають протилежний характер: при зростанні кута робочого конуса ДЕ, спостерігається тільки розбивка отвору для всіх значень кутів (α=2°…12°), які складають до 0,025 мм на сторону. В зоні цієї точки металл втулки більш пружний, тому відновлення його радиального розміру більш інтенсивне й при значені кута ДЕ α=8° усадка отвору сягає до 0,035 мм на сторону. Для кутів ДЕ α=12° розбивка має менші значення, які практично не відрізняються і становлять відповідно до 0,01…0,014 на сторону. В точці Р3 спочатку спостерігається розбивка отвору, а починаючи з робочого кута ДЕ α=8° тільки розбивка, яка становить до 0,029 мм на сторону. Відносно невелики відхилення розміру отвору від заданого пояснюються тим, що в цієї зоні втулка максимально притискається своїм нижнім торцем до основи. Внаслідок цього відбувається пружно-пластична деформація втулки, але плинність металу менша, ніж у верхній та средеій частинах втулки.

3.3 Інтенсивність деформації та напружень в характерних точках досліджувальних втулок із різних матеріалів

В якості прикладу на рисунку 3.8 представлено результати розрахунків інтенсивності деформації в характерних точках P1, P2 та P3 для втулок із сірого чавуну СЧ20.

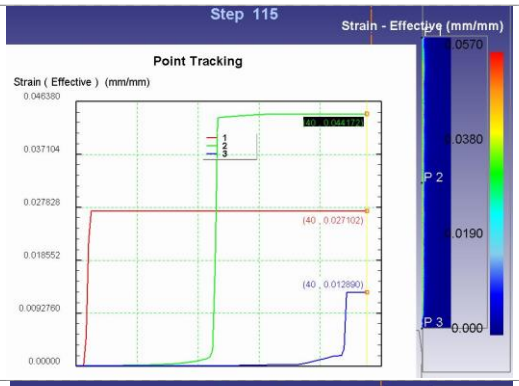
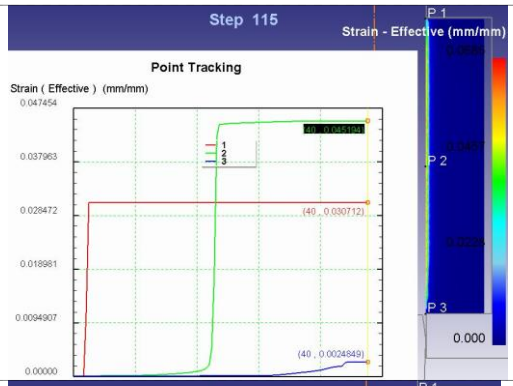
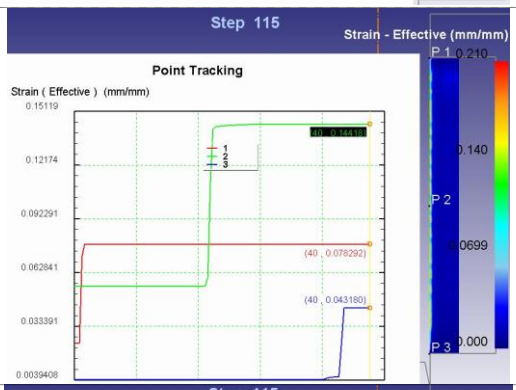
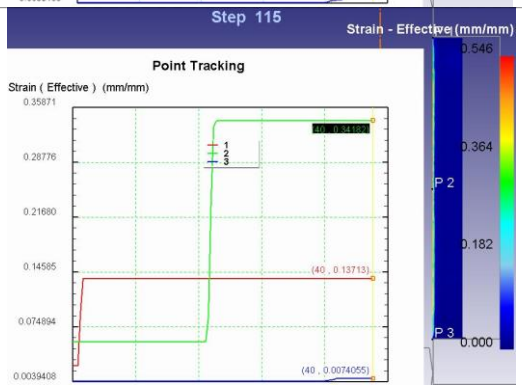
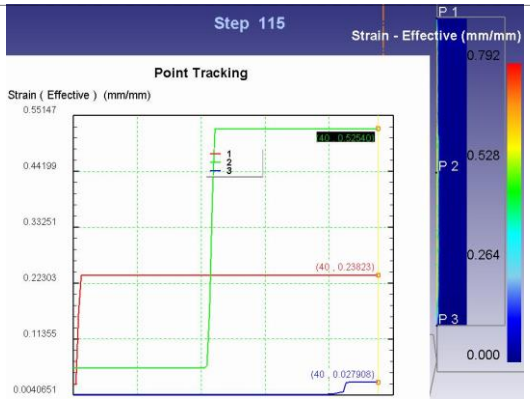
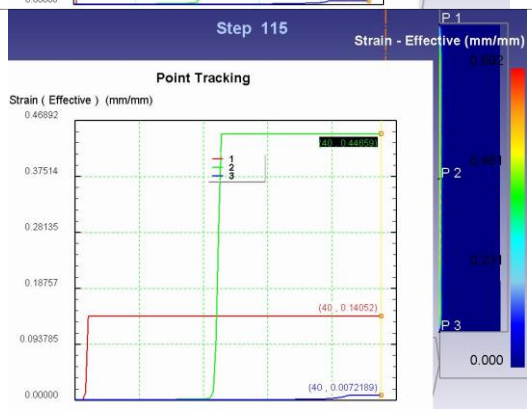
№ п/п	Сірий чавун СЧ20	
	t=10 мм	t=20 мм
α=2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.8 – Інтенсивність деформації окрайок циліндричного отвору в характерних точках P1, P2 та P3 (діапазон кроків 1…115)

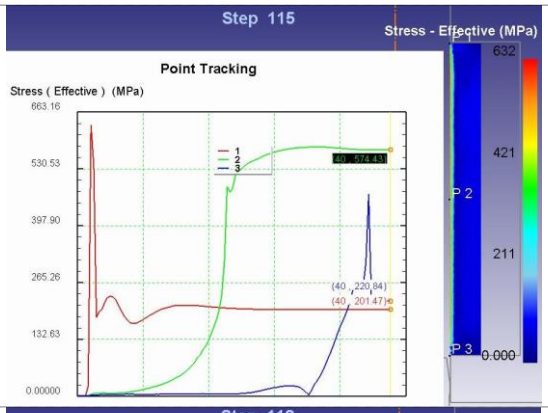
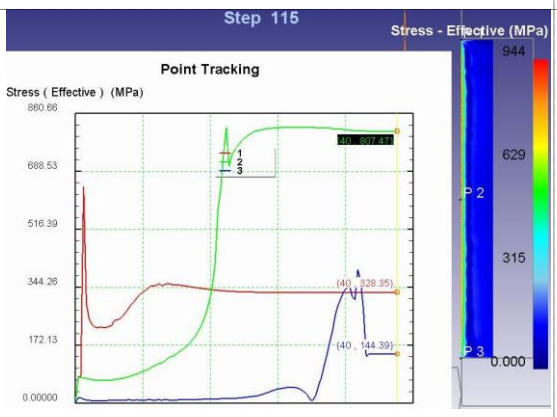
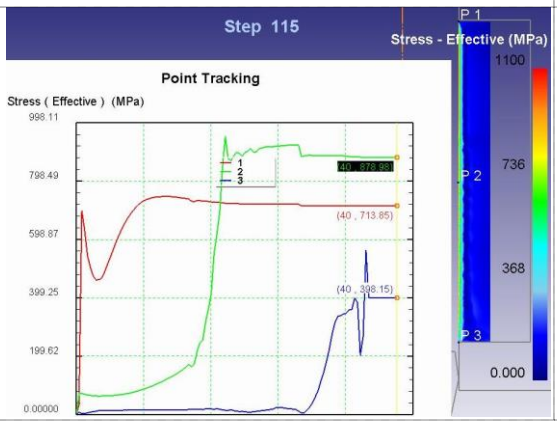
№ п/п	Сірий чавун СЧ20	
	t=10 мм	t=20 мм
α=2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.9 – Інтенсивність напружень матеріалу досліджуваної втулки в характерних точках P1, P2 та P3 (діапазон кроків 1…115)

Із графиків можна побачити, що різка зміна інтенсивності спостерігається в момент проходження через характерну точку стрічки ДЕ, а потім зміни незначні та пов’язані з ефектом розбивки або усадки обробленого циліндричного отвору втулки. Інтенсивність деформації в основному відбувається тільки у поверхневому шару отвору втулки.

Дещо інша картина спостерігається на графиках інтенсивності напружень в стінках втулки із чавуну СЧ20, які представлено на рис. 3.9.

На них видно, що для точок Р1 та Р3 нарощування інтенсивності напружень відбувається з високою швидкістю, а пік напружень приходиться на момент проходження стрічки ДЕ скрізь дану точку. Потім йде стрімке зниження інтенсивності напружень, яке досягає певної величини та зберігається до кінця деформування втулки. Найбільша інтенсивність напружень зосереджена на поверхні оброблюваного отвору (червоний колір на шкалі напружень), що свідчить про те, що в цьому шарі металу відбуваються не тільки пружні, а й пластичні деформації з інтенсивним зниженням шорсткості поверхні. Ці напруження зменшуються вглибину стінки втулки й практично зникають в її середині та на зовнішній поверхні. Менший пік напружень для точки Р3 при всіх кутах робочого конуса ДЕ також свідчить про меншу жорсткість втулки на нижньому торці, ніж посередині, але за рахунок міцного притискання торцю деталі до жорсткої основи ці напруження вищі, ніж на верхньому торці.

В точці Р2 для чавугу СЧ20 характер зміни інтенсивності дещо інший. Зростання інтенсивності напружень також відбувається по мірі наближення до середини втулки ДЕ прошивки, але потім вони знижуються незначно та зберігаються до самого кінця обробки. Вищу величину інтенсивності напружень на всіх режимах обробки можна пояснити тим, що в цієї зоні втулка має найбільшу жорсткість, тому чавун інтенсивно протидіє впливу ДЕ. Характерно, що при такиї напруженнях в цієї зоні відбувається саме усадка обробленого отвору.

На рис. 3.10 показано графіки зміни інтенсивності напружень для сталі 20 в характерних точках Р1…Р3

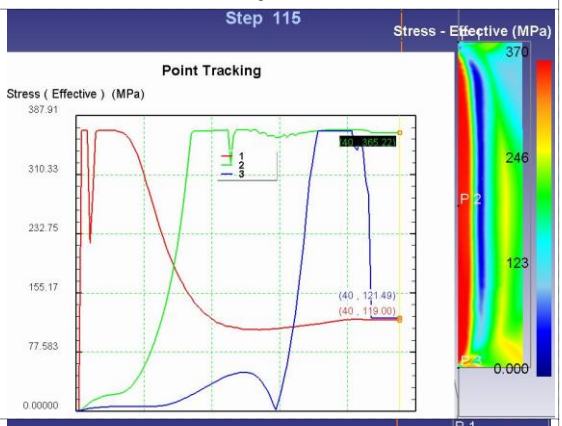
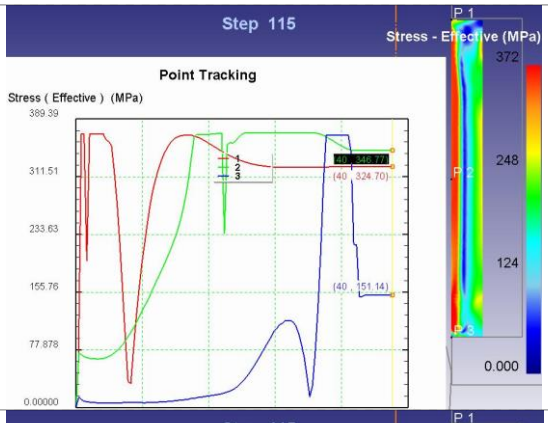
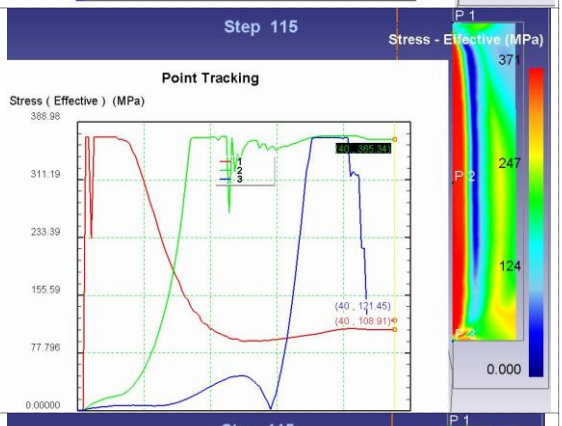
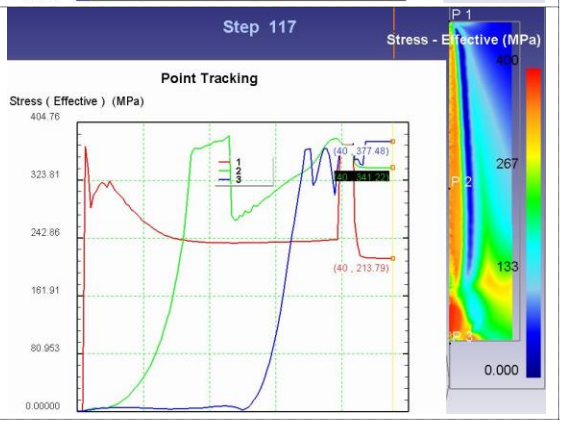
№ п/п	Сталь 20	
	t=10 мм	t=20 мм
α=2°		
α=4°		
α=8°		
α=12°		

Рисунок 3.10 – Інтенсивність напружень матеріалу досліджуваної втулки в характерних точках P1, P2 та P3 (диапазон кроків 1…115)

З графіків можна зробити висновок, що за рахунок високих механічних властивостей цього матеріалу пружно-пластичні деформаціїї відбуваються по всій товщині втулки з високою інстенсивністю та розповсюджуються на всю товщину стінки деталі. Максимальні значення фіксуються на поверхні оброблюваного отвору. В той же час інтенсивність деформації в середнії частини стінки втулки значно менша за рахунок того, що основні деформації розповсюджуються переважно в зоні оброблюваної поверхні отвору та на зовнішній стінці втулки.

Інтенсивність напружень для сталі 45 має схожий характер, але величини інтенсивності напружень дещо більши. Для латуні Л62, як більш пластичного матеріалу, зміна інтенсивності напружень в основному зосереджена на оброблюваної поверхні отвору втулки, а її величина зростає разом із зміною кута робочого конуса ДЕ від 2 до 12 градусів.

3.4 Характеристика вдосконаленої схеми збірної деформуючої прошивки для обробки циліндричних отворів та принцип дії інструменту

Застосування деформуючого протягування в якості однієї із напівчистових або чистових операцій в технологічному процесі обробки циліндричних отворів в деталях типу втулка можливе тільки при забезпеченні високої точності форми цих отворів на попередніх операціях.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можливо зробити висновок, що найбільш раціональною схемою протягування (тобто порядок виконання роботи по деформуванню циліндричного отвору деталі типу втулка між деформуючими елементами) може бути схема, яка суміщає переваги напівчистового або чистового деформуючого протягування.

Одним із можливих варіантів такої схеми є розташування на одному інструменті жорстко зв’язаних поміж собою та послідовно розташованих декількох ДЕ. За таким варіантом розташування ДЕ при робочому русі прошивки на початку обробки центрують його відносно оброблюваного циліндричного отвору деталі та виконують послідовну обробку його

внутрішньої поверхні. Останній ДЕ виконує чистову (вигладжуючу) операцію по роздаванню отвору та формуванню його остаточної поверхні.

Враховуючи наведене вище, серед існуючих схем прошивання циліндричних отворів в деталях типу втулка із латуні Л62, сталей 20,45 та сірого чавуну СЧ20 може бути запропонована схема стискання з частковим заневолюванням деталі. Саме подібна схема лягла в основу вдосконаленого інструменту для обробки деталей типу втулка із перелічених вище конструкційних матеріалів.

Загальний вигляд деформуючої прошивки наведено на рис. 3.11.

Прошивка складається з таких деталей: оправки 1, деформуючого блока з трьох елементів 2…4, та конусної гайки 5.

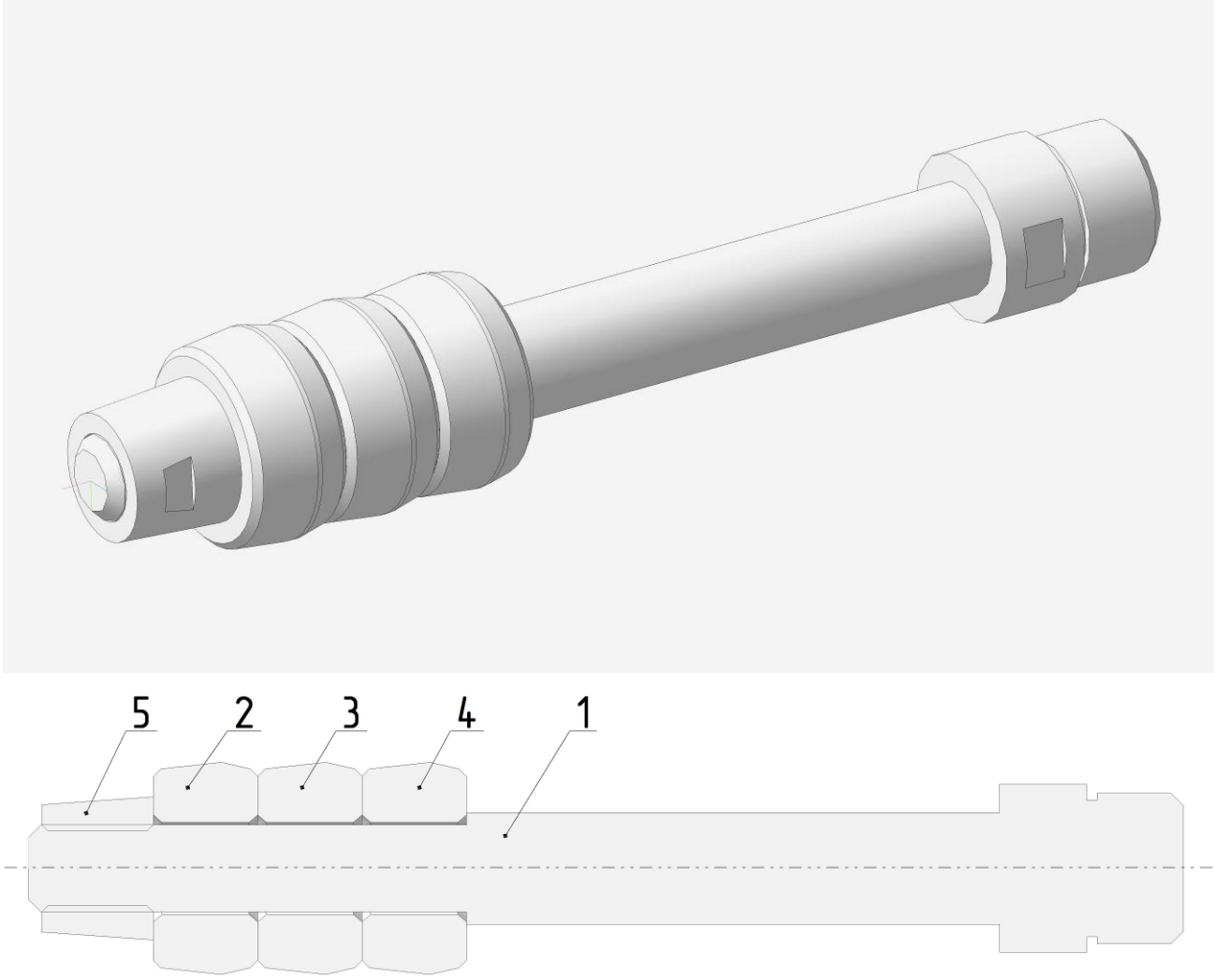


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд та схема деформуючої прошивки для обробки круглих отворів

Оправка 1 представляє з себе ступінчастий вал із якісної вуглецевої сталі 40Х, на якому з обох його сторін нарізана метрична різь. Лівий кінець оправки з різьбой М14х1,5 служить для закручування конусної гайки 5, яка в затисненому стані забезпечує точне спряження робочих деформуючих елементів на стріжні оправки. Протилежний (правий) кінець оправки з різьбой М24х1,5 служить для закріплення її у затискному пристрої протяжного верстата або двохстійкового гідравлічного преса.

Деформуюча частина прошивки складається з трьох деформуючих елементів 2,3 та 4. Перший деформуючий елемент несе максимальне навантаження і розміщений таким чином, щоб утворювана ним ХПКД не впливала на умови роботи наступного ДЕ. ДЕ послідовно входять в оброблюваний циліндричний отвір та формують його заданий розмір та необхідну чистоту обробленої поверхні. За необхідності на оправку може бути встановлена спеціальна дистанційна втулка (рис. 3.12), яка за рахунок своєї змінної довжини гарантує повне проходження всіх ДЕ скрізь оброблюваний отвір.

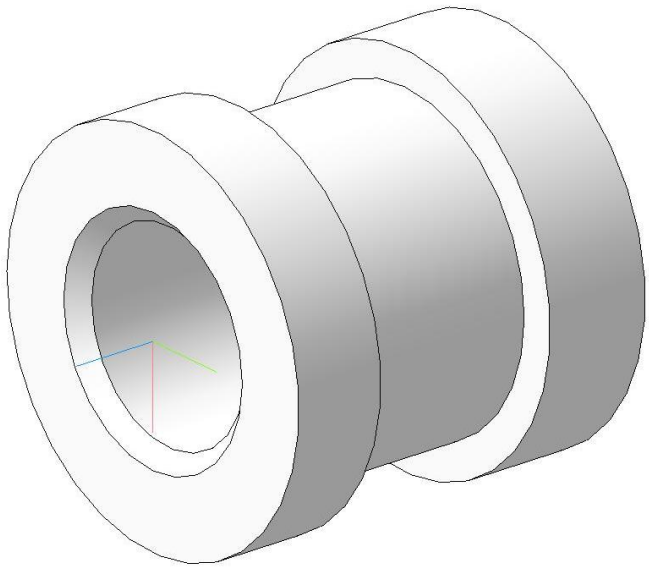


Рисунок 3.12 – Дистанційна втулка

Конусна гайка 5 стягує деформуючи елементи та одночасно служить первинною напрямною при вході прошивки в оброблюваний отвір деталі. Модульна конструкція прошивки дає можливість швидкого та гнучкого переналаштування згідно вимог виробництва, а також дозволяє оперативно

замінювати зношені або пошкоджені робочі елементи під час їх експлуатації. Окрім того, зношені ДЕ можливо перешліфувати у менший робочий розмір та використовувати їх для обробки отворів меншого діаметру. Також оправку, конусну гайку та дистанційні втулки можуть бути задіяні у складі декількох варіантів збірного протяжного інструмента або прошивки, що в свою чергу зніжує витрати на проектування та експлуатацію такого роду інструменту.

3.6 Рекомендації щодо вдосконалення конструкції збірної деформуючої прошивки

Отримані результати моделювання МКЕ, а також їх порівняння з реальними дослідами по протягуванні циліндричних отворів у втулках із сірих чавунів [7,9] дозволяють зробити такі висновки та рекомендації. По мірі збільшення кута робочого конуса ДЕ та номінального натягу, початок зміни форми отвору зміщується у бік меншої кількості циклів деформування. При протягуванні першим ДЕ зазначена погрішність виправляється, але потім, при подальшій обробці, спостерігається поява корсетності. Із збільшенням циклів деформування також збільшується перекручування форми отвору. При цьому більше інтенсивне збільшення випучення відбувається з боку вхідного торця деталі. Слід відмітити також те, що поява корсетності супроводжується так званим «витріщанням» оброблюваного матеріалу деталі на вхідному та вихідному торцях, що викликає неплощинність останніх. Появу ефекту неплощинності та корсетності можна пояснити тим, що при протягуванні втулок з товщиною стінки, близької до нескінченної (більше ніж 10 мм), контактні тиски в зоні контакту робочого конуса ДЕ з оброблюваною поверхнею сягають великих значень (q>3ГПа). При цьому відбувається осьовий плин оброблюваного матеріалу в значному обсязі. В момент входу ДЕ в оброблюваний циліндричний отвір частина ОМ витісняється в напрямку, протилежному вектору швидкості переміщення інструмента, а в міру наближення ДЕ до

вихідного торця частина ОМ витісняється в напрямку, що збігається з вектором швидкості переміщення протяжки.

Щодо точності форми отвору в поперечному перерізі, то по мірі наближення товщини стінки до нескінченної, у процесі деформуючого протягування вихідна погрішність форми отвору зменшується.

З наведеного вище можна зробити висновок, що якщо до оброблюваних виробів типу втулка надаються високі вимоги по точності форми, то деформуюче протягування деталей з нескінченної (або близької до нескінченного) товщиною стінки можна застосовувати як фінішну операцію тільки при невеликих номінальних натягах на ДЕ (а=0,03…0,05 мм) і куті робочого конуса ДЕ (α=2…4°). Якщо разом з високої точністю втулки потрібно одержати мінімальну шорсткість обробленої поверхні, то необхідно здійснювати протягування одним або двома ДЕ при а=0,03…0,05 мм і α=2…4°, а потім повторно, одним або двома ДЕ з а=0,03…0,05 мм і α=8°.

У роботах Якова Неміровського [11] зазначається, що при обробці деталей групою ДЕ умови обробки в порівнянні із протягуванням одиночними елементами дещо поліпшуються. При цьому відсутня можливість перекосу групи ДЕ, так як окрім базування по торцю, деталь додатково базується на попередніх ДЕ групи. Тому, в порівнянні із протягуванням одиночними ДЕ, деякі параметри погрішності значно зменшуються.

Використовуваний при моделюванні сірий чавун марки СЧ20 є досить крихкім матеріалом, про що свідчать численні результати випробування фізичних на розрив [7]. Однак, при деформуючому протягуванні можна створити такі умови напруженого стану ОМ, при яких буде мати місце пластична деформація навіть крихкого чавуну. Так, гранична пластична деформація деталей із чавуна СЧ20, оброблених деформуючим протягуванням, в окремих випадках може сягати до 4…6%.

Процес деформуючого протягування може бути використаний у якості напівчистової або чистової операції обробки отворів у деталях типу

втулка із чавуну, сталей 20,45 або латуні Л62 замість або в додаток до операцій різання.

При обробці циліндричних отворів, погрішність яких перебуває в межах 6-го квалітету точності та менше, деформуюче протягування можна застосовувати як фінішну операцію замість операцій різання, розточування, розвертання, ріжучого протягування, шліфування та хонінгування.

Кут твірної робочого конуса ДЕ доцільно призначати рівним 4…5°. У цьому випадку сила протягування буде мінімальною. Однак, з метою забезпечення низької шорсткості обробленої поверхні можна останні ДЕ виконати з кутом твірної робочого конуса в межах 8…10°. При цьому зовнішній діаметр ДЕ повинен бути однаковим або рівномірно зменшеним за розмірами на величину номінального натягу на ДЕ у межах усадки оброблюваного отвору.

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

При використанні деформуючого протягування як чистової операції, номінальний натяг на ДЕ не повинен перевищувати 0,1 мм, тому що в іншому випадку можлива поява перекручування форми отвору.

У процесі деформуючого протягування деталей типу втулка із чавуну та вуглецевих сталей у вогнищі деформації оброблюваного матеріалу мають місце зони позаконтактної деформації. У цьому випадку розташування ДЕ у зонах позаконтактної деформації не рекомендується, тому що при цьому не завжди можна забезпечити гарантований натяг на ДЕ.

Особливо варто обмежувати пластичні деформації при обробці чавунних деталей з товщинами стінок рівними або близькими до

нескінченної, тому що в іншому випадку можливо надмірне зміцнення оброблюваного матеріалу, що приводить до лущення обробленої поверхні, а також перекручування форми отвору в поздовжньому перетині (з'являється корсетність).

Чим більше товщина стінки оброблюваної деталі та менше номінальний натяг на ДЕ. Відповідно, в цьому випадку можна створити більшу пластичну деформацію оброблюваної деталі, не доводячи її до руйнування. Для чорнового деформуючого протягування величину номінального натягу на ДЕ необхідно призначати в межах 0,10…0,15 мм. Кут твірної робочого та зворотного конусів ДЕ можна вибрати в діапазоні 4…12°. Чим більшій кут α, тим інтенсивніше відбувається зміцнення та надмірне зміцнення (лущення) поверхневого шару для втулок із чавунів.

Для всіх випадків деформуючого протягування деталей із сірих чавунів, в якості технологічного змащення можна застосовувати гас, сульфофрезол, мінеральні масла, а також промислові емульсії для протяжних верстатів.

На основі проведених віртуальних досліджень можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на точність обробки, є матеріал деталі та геометричні параметри робочих елементів деформуючої протяжки. З метою уникнення ефектів розбивки циліндричного отвору та випучення торців втулки рекомендується застосування обробки за схемою стискання з додатковим заневолюванням деталі. Це можна зробити у верхній частині втулки шляхом її затискання з боків напівкільцями або призмами. Також рекомендується застосувати кут робочого конуса ДЕ в межах від α=4° до α=8°, що забезпечує мінімальну розбивку отвору та достатнє зміцнення оброблюваної поверхні. В якості змащення рекомендується застосовувати рідки мінеральні мастила.

В якості матеріалу для виготовлення робочих ДЕ використовуємо тверді сплави групи ВК8 або ВК15, а інші складові елементи протяжки виготовляємо із якісних конструкційних сталей марки 40, 45, 40Х.

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

Комп’ютерні засоби проектування є одним з напрямків досягнення високого рівня розвитку сучасного машинобудування в нашій країні. Останніми роками створюються та розвиваються різноманітні 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, конструкційних матеріалів та персоналу, які необхідні для здійснення технологічних процесів виготовлення та подальшого випробування дослідних зразків деталей або інструменту традиційними способами.

Використання прикладних програм, запропонованих у даній кваліфікаційній роботі, дає можливість в значній мірі відмовитися від трудомістких і високовартісних 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 кругу складає більш ніж 20220 грн.). Також досягається велика економія потрібного персоналу та вартісних витратних основних і допоміжних матеріалів (наприклад, твердого сплаву для виготовлення деформуючих елементів протяжки та абразивної алмазомісткої пасти для високоточного шліфування. Окрім того, використання спеціалізованих програмних комплексів дозволяє запобігти витратам, або значно їх знизити, пов‘язаним з необхідністю виготовлення додаткових дослідних фізичних зразків протяжок у випадку, якщо результати випробування виявили помилки, допущені при проектуванні та виготовленні інструменту.

Для визначення економічної ефективності використання запропонованих прикладних програм, у якості бази для порівняння приймемо описаний вище існуючий варіант проектування, виготовлення та випробовування деформуючої протяжки.

4.1 Визначення витрат на підготовку виробництва прошивки

4.1.1 Витрати на проектування прошивки визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot З_{сг}^{к} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \qquad (4.1)$$

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

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

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

$К_{д}$ - додаткова заробітна плата конструктора, %;

$B_{с}$ - відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів,%;

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

$$B_{пк} = 6 \cdot 20 \cdot 102{,}27 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 6 \cdot 20 \cdot 102{,}27 \cdot \frac{45}{100} = 21991{,}6 \text{ грн.}$$

4.1.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_{т} = H_{ор} \cdot T_{тех} \cdot З_{сг}^{т} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \qquad (4.2)$$

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

$З_{сг.т}$ - середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 6 \cdot 21 \cdot 98{,}55 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 6 \cdot 21 \cdot 98{,}55 \cdot \frac{50}{100} = 2287{,}66 \text{ грн.}$$

4.2 Визначення витрат на виготовлення прошивки в базовому варіанті

На основі встановленої трудомісткості виготовлення дослідного зразка деформуючої протяжки розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{г}_\text{і}} \cdot T_{\text{і}}\,, \tag{4.3}$$

де n – кількість і-тих видів робіт;

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

Наприклад для механічних робіт.

$$З_{ор} = 99{,}072\ 7{,}8 = 772{,}76 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^{m} З_{орі} \cdot \frac{П_{вр}}{100} \tag{4.4}$$

де: $П_{во(і)}$ – 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:

$$B_o = 772{,}76 \cdot (285/100) = 2202{,}37 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{цех} = \sum_{i=1}^{m} З_{орі} \cdot \frac{П_{цв}}{100}\,, \tag{4.5}$$

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

$$K_{цех} = 772{,}76 \cdot (132/100) = 1020{,}05 \text{ грн.}$$

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

Таблиця 4.1

Трудомісткість та окремі види витрат на виготовлення дослідного зразка деформуючої прошивки

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання $В_о$		Загально виробничі (цехові) витрати, $В_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,1	3	89,088	8,91	220	19,60	150	13,36
Механічні	7,8	4	99,072	772,76	285	2202,37	132	1020,05
Термічні	1,5	3	110,514	165,77	310	513,89	182	301,70
Слюсарсько-складальні	1,0	4	99,072	99,07	210	208,05	142	140,68
Всього	10,4	-	-	1046,51	-	2943,91	-	1475,79

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

$$C_{пов} = M_o + M_д + T_в - B_{зв} + П_{тех} + E_{тех} + З_{ор} + З_{др} + B_c + З_{цп} + B_o + B_{цех} + B_{ін} \quad (4.6)$$

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

Розрахунок витрат на основні матеріали зведено до табл. 4.2.

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

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

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

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

B_c – єдиний соціальний внесок, грн.;

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

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

$В_{ін}$ – 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
	Основні матеріали				
1.	Сталь 40Х	кг	9,2	70,50	648,60
2.	Твердий сплав ВК8	кг	0,84	2790,00	2343,60
	Всього основних матеріалів	-	-	-	2992,20

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Виробнича собівартість дослідного зразка збірної деформуючої прошивки

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	$М_о$	табл. 4.2	2992,20
2.	Матеріали допоміжні	$М_д$	4 % від Мо	119,69
3.	Транспортно-заготівельні витрати	$Т_в$	6 % від (Мо+Мд)	124,48
4.	Зворотні відходи (віднімаються)	$-В_{зв}$	5% від Мо	179,53
5.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $Е_{тех}$	53,8 % від Зор	563,02
6.	Всього матеріальні витрати			3619,86
7.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.1	1046,51
8.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від Зор	104,65
9.	Відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок)	$В_с$	22% від (Зор+Здр)	253,26
10.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати	$З_{цп}$	8,5% від Зор	88,95
11.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_о$	табл. 4.1	2943,91
12.	Цехові витрати	$В_{цех}$	табл. 4.1	1475,79
13.	Загальновиробничі витрати	$В_{зав}$	141% від Зор	1475,58
4.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	1,4% від $З_{ор}$	14,65
5.	Виробнича собівартість інструменту	$С_{вир}$	Σст. 6-14	11024,0

4.3. Визначення витрат на випробування прошивки базовим методом

Випробовування дослідного зразка прошивки проводиться на гідравлічному пресі типу ПГ-100, технічні характеристики якого наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Характеристика обладнання

Найменування обладнання	Модель	Габаритні розміри: довжина × ширина, м	Потужність електро-двигуна, кВт	Група ремонтної складності механічної/ електричної частини, УРО	Пло-ща в плані, м2	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	352500

Розрахунок витрат на випробування збірної деформуючої прошивки виконуємо за формулою [26]:

$$B_в = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}}\,, \tag{4.7}$$

де $B_з$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди випробувача, грн.;

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

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

$B_р$ – витрати на ремонт пресу, грн.;

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

$B_а$ – витрати на амортизацію пресу, грн.;

$B_н$ – витрати на налагодження пресу, грн.;

$B_{накл}$ – накладні витрати, грн.

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

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

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

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

$К_д$, $К_с$ – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань у соціальні фонди.

$$В_з^{баз} = 89,097 \cdot (4/60) \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 7,1661 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$В_е = \frac{N_в \cdot К_о \cdot К_N \cdot К_д}{\eta_м \cdot \eta_с} \cdot \frac{Т_в}{60} \cdot Ц_{ел}, \quad (4.9)$$

де: $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів преса, кВт;

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

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

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

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

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

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

$$В_е^{баз} = \frac{4 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{4}{60} \cdot 8,235 = 0,5516 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$В_{мд} = \frac{М_{дм} \cdot R_м \cdot Т_в}{60 \cdot 100} \cdot К_п, \quad (4.10)$$

де $М_{дм}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини обладнання, грн;

$R_м$ – категорія складності ремонту механічної частини пресу, УРО;

$К_п$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва.

$$В_{мд}^{баз} = \frac{1,14 \cdot 7,0 \cdot 4}{60} \cdot 1,0 = 0,5320 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт пресу:

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

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 пресу (при однозмінному режимі роботи для серійного виробництва)

$$B_p^{баз} = \frac{7 \cdot 1200 + 4{,}5 \cdot 780}{1975} \cdot \frac{4}{60} = 0{,}3596 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.12)$$

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

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [26];

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

$$B_{уп}^{баз} = \frac{7{,}1 \cdot 3{,}5 \cdot 468}{1975} \cdot \frac{4}{60} = 0{,}3926 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію пресу:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.13)$$

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

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

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}\right), \quad (4.14)$$

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

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

$$Ф_{бал}^{баз} = 352500 \cdot (1 + 0{,}08 + 0{,}06 + 0{,}05) = 419475 \text{ грн.}$$

$$B_a^{,баз} = \frac{419475 \cdot 20 \cdot 4}{1975 \cdot 60 \cdot 100} = 2{,}8319 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження пресу:

$$B_н = C_{гн} \cdot (1 + K_д) \cdot (1 + K_c) \cdot \frac{T_{нал} \cdot A}{60 \cdot N_д}, \qquad (4.15)$$

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

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{нал}$ – час налагодження, хв.;

$N_д$ – річна програма випробування інструменту, шт./рік.

$$B_н = 107{,}883 \cdot (1+0{,}1) \cdot (1+0{,}22) \cdot \frac{15 \cdot 12}{60 \cdot 50} = 8{,}6868 \text{ грн.}$$

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	$B_з$	7,1661
2.	Силова електроенергія	$B_е$	0,5516
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,5320
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	0,3596
5.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,3926
6.	Амортизація обладнання	$B_а$	2,8319
7.	Налагодження обладнання	$B_н$	8,6868
Загальна сума витрат на випробування		$B_в$	20,521

4.4. Витрати на застосування моделюючої програми

Вихідні дані для розрахунку зведено до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Вихідні дані для розрахунку

№ п/п	Показники	Позначення	Одиниця виміру	Величина
1	2	3	4	5
1	Вартість технічних засобів (ПК)	$В_{пк}$	грн	30600
2	Норма амортизації на реновацію ЕОМ	$Н_{ам.пк}$	%	50
3	Норма амортизації на реновацію приміщення	$Н_{ам.пр}$	%	5
4	Нормативний коефіцієнт ефективності	$Е_{н}$		0,16
5	Річний фонд часу роботи оператора ПК	$F_{ч.оп}$	год.	1864
6	Коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату	$К_{д}$		0,1
7	Коефіцієнт, який враховує єдиний соціальний внесок	$К_{соц}$	%	0,22
8	Площа, яку займає робоче місце оператора	$S_{пк}$	$м^2$	4
9	Вартість 1 кВт-год. електроенергії	$Ц_{ел}$	грн	8,235
10	Потужність технічних засобів (ПК і принтера)	$N_{к}$	кВт	0,6
11	Річні витрати на ремонт і технічне обслуговування ПК	$В_{р.пк}$	грн	2205
12	Вартість 1 $м^2$ виробничої площі	$Ц_{п}$	грн	5650
13	Витрати на придбання ліцензії на використання програми	$В_{п.з}$	грн	820000
14	Кількість робочого часу на організацію підготовчих робіт, навчання персоналу та впровадження системи	$Н_{о}$	год.	90
15	Коефіцієнт, який враховує накладні витрати	$К_{нак}$		65
16	Вартість носіїв інформації	$В_{н.інф}$	грн	775
17	Кількість деталей на рік, конструкцію і техпроцес обробки яких необхідно змоделювати	$N_{д}$	шт.	50
18	Витрати на утримання 1 $м^2$ приміщення	$В_{пр}$	грн	468
19	Вартість господарчого інвентарю	$В_{інв}$	грн	3250
20	Оклад оператора ПК	$О_{п}$	грн/міс.	26400

21	Час на організаційні роботи з ПК	$Н_{о.пк}$	год.	8
22	Середньогодинна зарплата оператора ПК	$З_{год.оп}$	грн/год.	150,00
23	Витрати на матеріали оператора ПК	$В_{м}$	грн	643,0
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	$В_{пр}$	грн.	19500

4.4.1. Витрат на впровадження моделюючої програми визначаємо за формулою:

$$К_{пр} = К_{пп} + К_{т.з}, \quad (4.16)$$

де: $К_{пп}$ – витрати на придбання, налагодження, генерацію прикладної програми:

$$К_{пп} = В_{п.з} + В_{н.інф} + В_{опр}, \quad (4.17)$$

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

$В_{н.інф}$ – витрати на придбання носіїв інформації;

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

$$В_{опр} = Н_{о.вом} \cdot З_{год.оп} = 90 \cdot 150{,}00 = 13500{,}00 \text{ грн.}$$

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

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

$$К_{пп} = 820000 + 775 + 13500 = 834275{,}00 \text{ грн.}$$

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

$$К_{т.з} = В_{пк} + В_{м} + В_{пр} + В_{інв}, \quad (4.18)$$

де: $В_{пк}$ – вартість ПК, грн.;

$В_м$ – вартість матеріалів, грн.;

$В_{пр}$ – вартість принтера, грн.;

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

$$К_{т.з} = (30600 + 643 + 19500 + 3250) \cdot 0,55 = 29696,15 \text{ грн.}$$

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

$$К_{зав} = \frac{N_д \cdot t_{еом}}{F_{еом}}, \quad (4.19)$$

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

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

Таким чином, капітальні витрат на впровадження моделюючої програми:

$$К_{пр} = 834275,00 + 29696,15 = 863971,15 \text{ грн.}$$

4.4.2. Витрати на експлуатацію прикладної програми розраховуємо за формулою: [26]

$$В_{пр} = \sum В_i, \quad (4.20)$$

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

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

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

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

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

$В_н$ – накладні витрати, грн.

Річні витрати на заробітну плату оператора:

$$В_{зп} = О_п \cdot (1 + К_д) \cdot (1 + К_{соц}) \cdot Ч_{оп} \cdot 12, \quad (4.21)$$

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

$$Ч_{оп} = \frac{N_д \cdot t_{пк}}{F_{ч.оп}} = \frac{50 \cdot 20}{1864} = 1{,}0 \text{ особа} \quad (4.22)$$

$$B_{зп} = 26400 \cdot (1 + 0{,}1) \cdot (1 + 0{,}22) \cdot 1 \cdot 12 = 425145{,}6 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію технічних засобів (ПК та принтера):

$$B_{ам.тз} = \frac{B_{пк} \cdot H_{ам.пк} + B_{пр} \cdot H_{ам.пр}}{100} = \frac{(30600+19500) \cdot 50}{100} = 25050{,}0 \text{ грн.} \quad (4.23)$$

Витрати на електроенергію:

$$B_{ел} = N_к \cdot Ц_{ел} \cdot F_{пх} \cdot K_{зов} = 0{,}6 \cdot 8{,}235 \cdot 1800 \cdot 1{,}11 = 8896{,}17 \text{ грн.} \quad (4.24)$$

Витрати на технічне обслуговування та ремонт:

$$B_{рем} = B_{р.пк} \cdot K_{зов} = 2205 \cdot 1{,}11 = 2425{,}5 \text{ грн.} \quad (4.25)$$

Витрати на амортизацію приміщення:

$$B_{ам.пр} = S_{пх} \cdot Ц_п \cdot H_{ам.пр} \cdot K_{зов} = 4 \cdot 5650 \cdot 0{,}05 \cdot 1{,}11 = 1254{,}33 \text{ грн.} \quad (4.26)$$

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	$B_{зп}$	425145,6
2.	Амортизація технічних засобів	$B_{ам.тз}$	25050
3.	Електроенергія	$B_{ел}$	8896,17
4.	Ремонт і технічне обслуговування технічних засобів	$B_{рем}$	2425,5
5.	Амортизація приміщення	$B_{ам.пр}$	1254,33
Загальна сума витрат		$B_{пр}$	462771,6

4.5. Річний економічний ефект від застосування програми

Річний економічний ефект від застосування програми розраховується за формулою: [26]

$$E_р = E - E_н \cdot K_д, \tag{4.27}$$

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

$$E = (C_{вир} + B_в) \cdot N_{ін} - B_{пр}, \tag{4.28}$$

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

$B_в$ – витрати на випробування протяжки базовим способом, грн.;

$N_{ін}$ – річна програма виготовлення протяжного 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.

$$E = (11024 + 20{,}523) \cdot 250 - 462772 = 2300000 \text{ грн.}$$

$E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат;

$K_д$ – додаткові капітальні витрати при впровадженні програмного забезпечення, грн., розраховуються за формулою:

$$K_д = K_{пр} - ((B_{пк} + B_т) \cdot N_д + B_{обл} + B_{осн}), \tag{4.29}$$

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

$B_{пк}$, $B_т$ – відповідно витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва деформуючої прошивки 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	Оптова ціна, грн.	Кількість, шт.	Балансова вартість, грн.
1.	Токарно-гвинторізний верстат 16К20	335400	1	399126
2.	Універсальний фрезерний верстат 676	593400	1	706146
3.	Круглошліфувальний верстат 3М132	870800	1	1036252
4.	Гідравлічний прес ПГ-100	352500	1	419475
5.	Алмазний круг	20220	1	21838
	Всього		-	2582837

$$К_д = 863971 – ((21992 + 22873) \cdot 50 + 2582837) = - 3962116 \text{ грн.}$$

Таким чином, річний економічний ефект від використання програми:

$$E_p = 2300000 – 0{,}16 \cdot (–3962116) = 2934000 грн.$$

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

Таблиця 4.9

Результати розрахунку економічної ефективності використання програми

Показник	Одини-ця	Варіант	
		базовий	проектний
Кількість деформуючих прошивок на рік, конструкцію і техпроцес обробки яких необхідно змоделювати	шт./рік	-	50
Річна програма виготовлення дослідних зразків деформуючих прошивок	шт./рік	50	-
Річні експлуатаційні витрати, у тому числі - на виготовлення дослідного зразка прошивки - на випробування прошивки - на експлуатацію моделюючої програми	грн. грн. грн. грн.	552226 551200 1026 -	462772 - - 462772
Капітальні витрати	грн.	4826087	863971
Річний економічний ефект	грн.	-	2934000
Чисельність працівників, у тому числі: - робітників - випробувачів - операторів ПК	 осіб осіб 	6 5 1 -	1 - - 1

Висновки

1) Із застосуванням програмних комплексів SolidWorks та DEFORM вдосконалена модель виконання деформуючого протягування отворів у втулках із сірого чавуну, вуглецевої сталі та латуні, яка дає можливість за допомогою МКЕ визначати зміну геометрії деталі в її характерних точках, енергосилові параметри та напружений стан досліджуваного матеріалу у вогнищі деформації. Доопрацьована модель враховує пружно-пластичний характер холодної деформації застосованого металу та монотонний характер процесу. Проведені дослідження впливу кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки обробленої деталі типу втулка із різних конструкційних матеріалів на зміну параметрів радіального розміру оброблюваного циліндричного отвору, а також розповсюдження інтенсивності напружень в тілі втулки;

2) Встановлено нелінійний характер зміни радіального розміру циліндричного отвору в залежності від товщини стінки деталі та матеріалу, що оброблюється. Результати проведених віртуальних процесів обробки деформуючим протягуванням одиничним робочим елементом підтверджують значну відповідність створеної моделі реальному процесу обробки. Це дозволяє після зручного та швидкого аналізу отриманих результатів розробляти технологічне обладнання та інструмент для даного виду металообробки, а також обрати найбільш оптимальні параметри технологічного процесу з метою ефективного використання існуючих вертикальних протяжних верстатів та гідропресів для деформуючого прошивання за запропонованою схемою стискання.

3) Підтверджено, що зафіксована зміна радіальних розмірів обробленого циліндричного отвору втулки в значній мірі залежить від заданих геометричних параметрів ДЕ, матеріалу деталі та товщини її стінки;

4) При збільшенні величини кута робочого конуса ДЕ, а також при збільшенні товщини стінки втулки виявлено формування досить

вираженого валика із ОМ поперед ДЕ. Це свідчить про наявність пружно-пластичних деформації у зоні контакту інструмента та виробу, особливо для таких матеріалів, як чавун та вуглецеві сталі марок 20 та 45;

5) Проведені аналітичні дослідження процесу протягування циліндричних отворів у деталях типу втулка з використанням програмного комплексу DEFORM дозволили шляхом віртуального моделювання процесу обробки всебічно оцінити його ефективність шляхом підбору різних заданих геометричних параметрів робочих елементів прошивки й тим самим підійти до найбільш раціонального використання збірного інструмента;

6) Масив даних, який був отриманий в результаті моделювання процесу деформуючого прошивання, дозволяє значно скоротити час та вартість проектування інструменту і допоміжного обладнання, що призначене для обробки циліндричних отворів. Це дозволяє оцінити можливість та ефективність використання в цьому процесі уже наявних вертикальних протяжних верстатів та гідравлічних пресів, а також управляти процесом протягування або прошивання з максимальним економічним ефектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Yaghoubi, S., Shirazi, A. Effects of mandrel velocity on residual stresses created in cold expansion process of adjacent holes for AA6016-T6 and AA1100 aluminum alloys. Sci Rep 14, 27087 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-78139-2

2. V. Nigrelli, S. Pasta, Finite-element simulation of residual stress induced by split-sleeve cold-expansion process of holes, Journal of Materials Processing Technology,Volume 205, Issues 1–3, 2008, Pages 290-296, ISSN 0924-0136, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.207. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607011466)

3. A PCC Company Fatigue Technology 9/2009 FATIGUE LIFE ENHANCEMENT OF HOLES IN METAL STRUCTURES https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://fatiguetech.com/document-librar/split-sleeve-cold-expansion-brochure.pdf&ved=2ahUKEwjSxJuhj56NAxUZFBAIHbTNBmoQFnoECCIQAQ&usg=AOvVaw0OlBu8srUduIMveLXER1-8

4. Curto-Cárdenas D, Calaf-Chica J, Bravo Díez PM, Preciado Calzada M, Garcia-Tarrago MJ. Cold Expansion Process with Multiple Balls-Numerical Simulation and Comparison with Single Ball and Tapered Mandrels. Materials (Basel). 2020 Dec 4;13(23):5536. doi: 10.3390/ma13235536.

5. Єрьомін П.М. Моделювання холодного пружно-пластичного деформування отворів у втулках із сірого чавуна методом кінцевих елементів / П.М. Єрьомін, А.М. Кириченко, О.В. Солона // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія технічні науки / вип. 1(84), 2014 – С. 15-22.

6. Єрьомін П.М. Дослідження взаємодії деформувального елемента протяжки із оброблюваною поверхнею деталей із графітовмісних чавунів / П.М. Єрьомін, О.В. Чернявський, С.Ф. Студенець // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин», вип. 44, 2014 – С.115-121.

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

8. Солона О.В. Моделювання протягування деталей із сірого чавуна / О.В. Солона, П.М. Єрьомін, О.В. Чернявський // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія технічні науки, вип. 2(84), 2014 – С. 21-27.

9. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів [Текст] : монографія / Е. К. Посвятенко [та ін.] ; за ред. проф. Е. К. Посвятенка ; Кіровоград. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : Лисенко В. Ф. [вид.], 2017. - 286 с. : рис. - Бібліогр.: с. 271-284. - 300 прим. - ISBN 978-617-7197-65-1

10. Немировский Я.Б. Вплив умов базування на точність деталей, оброблених деформуючим протягуванням [Текст] / Я.Б. Немировский // Вісник Тернопільського національного технічного університету: Наук. журнал. – Тернопіль, ТНТУ, 2014. – №3 (75).– С.144-157

11. Немировский Я.Б. Технологическое обеспечение точности при обработке отверстий деформирующим протягиванием [Текст] / Я.Б. Немировский // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ Украины «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 195–207

12. Підвищення ефективності обробки отворів у деталях із чавунів комбінованим протягуванням [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Єрьомін Павло Миколайович ; Кіровогр. нац. техн. ун-т. - Кіровоград, 2015. - 21 с. : рис.

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

14. Немировский Я.Б. Особенности расчета усадки отверстий при деформирующем протягивании деталей из чугуна [Текст] / Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский, П.Н. Еремин // Високі технології в

машинобудуванні: междун. науч.- техн. сб. – Харків: НТУ України «ХПІ», 2014. – Вип. 1(24). – С.109-121

15. DEFORM User's Guide: Веб-сайт. URL: https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/mfs/mfs.htm?forging_users_guide.htm/ (дата звернення 18.05.2025)

16. Хімічні та механічні властивості сталі 20: Веб-сайт. URL: https://steelgroup.com.ua/chornyj-metal/20/?srsltid=AfmBOor2L0URPTPwHHEC3y8hshT9moWlxyn3jMHthHoQ0qzytymwE6ZT (дата звернення 18.05.2025)

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

18. Розенберг О. А. Особенности использования комбинированного протяжного инструмента для обработки внутренних полостей крупных чугунных цилиндров [Текст] / О. А. Розенберг, С. Ф. Студенец, В. В. Мельниченко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ ім В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11, С. 428-433

19. Розенберг О. А. Исследование процесса комбинированного протягивания гильз двигателей внутреннего сгорания из антифрикционных легированных чугунов [Текст] / О. А. Розенберг, С. Ф. Студенец, В. В. Мельниченко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Х.: Видав. Харків НТУ «ХПІ», 2010. Вип. 4, С. 161-169

20. Області застосування графітового мастила: Веб-сайт. URL: https://zvgraphit.com.ua/analitic/35313-oblasti-zastosuvannya-grafitovogo-mastila.html/ (дата звернення 18.05.2025)

21. Властивості вуглецевих матеріалів: Веб-сайт. URL: https://graphite.in.ua/ua/a105809-svojstva-uglerodnyh-materialov.html/ (дата звернення 18.05.2025)

22. Чому графіт використовується як мастило? : Веб-сайт. URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%D1%87%D0%BE%D0%BC%D1%83-%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%82-%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%94%D1%82%D1%8C%D1%81%D1%8F-%D1%8F%D0%BA-%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%82/ (дата звернення 18.05.2025)

23. Носуленко В. І. Кування і гаряче об’ємне штампування [Текст]: Навчальний посібник. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017, – 224 с.

24. Характеристика сталі 20: Веб-сайт. URL: https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-20/https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-20/ (дата звернення 18.05.2025)

25. Характеристика материала ЛО62-1: Веб-сайт. URL: https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1049/ (дата звернення 18.05.2025)

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