

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет машинобудування та транспорту

Кафедра галузевого машинобудування

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем»

Виконав: студент 2 курсу за ОПП «Магістр»,
групи 1ГМ-22м

спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Владислав ГАВРИЛЮК
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., доцент кафедри ГМ

 Роман СИВАК
(прізвище та ініціали)

Опонент: к. т. н., ст. викладач кафедри АТМ

 Дмитро БОРИСЮК
(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту
завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. Поліщук Л. К. 

« 12 » грудня 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет машинобудування та транспорту
 Кафедра галузевого машинобудування
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань – 13 Механічна інженерія
 Спеціальність – 133 – Галузеве машинобудування
 Освітньо-професійна програма – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛЩУК

«12» грудня 2023 р.



З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Владиславу ГАВРИЛЮКУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., доц. Роман СИВАК, затверджені наказом №247 від «18» вересня 2023 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 11.12. 2023р.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) апроксимація кривої зміцнення алюмінієвого сплаву АД1 – $\sigma_s=141,9 \cdot e^{0,26}$, МПа; 2) апроксимація кривої зміцнення свинцевого сплаву С1 – $\sigma_s=25 \cdot e^{0,19}$, МПа; 3) густина матеріалу: АД1 – $\rho_{АД1}=2800 \text{ кг/м}^3$, С1 – $\rho_{С1}=11340 \text{ кг/м}^3$; 4) коефіцієнт тертя - $\mu_s=0,16$; 5) швидкість переміщення інструменту - 1 мм/с; інструмент абсолютно твердий.






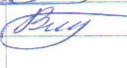


4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) вступ; 2) сучасний стан теоретичних досліджень процесів комбінованого видавлювання; 3) вибір напрямків і методів дослідження; 4) еспериментальні дослідження процесу комбінованого видавання деталей з фланцем; 5) теоретичний аналіз процесу комбінованого видавання деталей з фланцем; 6) охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; 7) економічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):














1) види осередків деформації при холодному видавлюванні (пл. ф.А1); 2) види осередків деформації при холодному видавлюванні (продовження) (пл. ф. А1); 3) схеми трьохстороннього видавлювання (пл. ф.А1); 4) методика проведення експериментів (пл. ф.А1); 5) методика проведення експериментів (продовження) (пл. ф.А1); 6) методика проведення експериментів (продовження) (пл. ф.А1); 7) порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті (пл. ф.А1); 8) порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті експериментів (продовження) (пл. ф.А1); 9) висновки (пл. ф.А1).

6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний	д. т. н., доц. Роман СИВАК		
Економічний	к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК.		
Охорона праці	д. п. н., проф. Софія ДЕМБІЦЬКА		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	д. т. н., проф. Олег БЕРЕЗІЮК		

7. Дата видачі завдання 15.09.2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів МКР	Примітка
1	Вступ	29.09.2023 р.	
2	Сучасний стан теоретичних досліджень процесів комбінованого видавлювання	15.10.2023 р.	
3	Осередки деформації при холодному видавлюванні	2.11.2023 р.	
4	Вибір напрямків і методів дослідження	9.11.2023 р.	
5	Методика проведення експериментальних досліджень	15.11.2023 р.	
6	Дослідження напружено-деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та відростком	19.11.2023 р.	
7	Моделювання формозміни у процесах комбінованого тристороннього видавлювання	22.11.2023 р.	
8	Теоретичний аналіз процесу комбінованого видавання деталей з фланцем	24.11.2023 р.	
9	Порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті	26.11.2023 р.	
10	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	1.12.2023 р.	
11	Економічна частина	3.12.2023 р.	
12	Підготовка ілюстративної частини МКР	7.12.2023 р.	
13	Попередній захист на кафедрі	12.12.2023 р.	

Студент  Владислав ГАВРИЛЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  Роман СИВАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.777.4:621.77.01

Гаврилюк В. В. Дослідження процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2023. 129 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 40 назв; рис.: 38; табл. 24.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд сучасного стану теоретичних досліджень процесів комбінованого видавлювання, особливостей формування осередків деформації при холодному видавлюванні, досвіду застосування методу кінцевих елементів при дослідженні комбінованого видавлювання та конструкцій штампів і оснащення для процесів комбінованого видавлювання. Здійснено вибір напрямків і методів теоретичних досліджень, розглянута методика проведення експериментальних досліджень. Виконано дослідження напружено-деформованого стану та силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та відростком, а також моделювання формозміни у таких процесах. Здійснено моделювання силового режиму комбінованого процесу тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними та криволінійними блоками. Виконано порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті.

Графічна частина складається з 9 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, ресурс пластичності, планування експерименту, метод кінцевих елементів, енергетичний метод, силовий режим.

ABSTRACT

Gavriliuk V. V. Research of the process of combined extrusion of parts with a flange. Master's qualification thesis on specialty 133 - industrial mechanical engineering, educational program - industrial mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2023. 129 p.

Ukraine language Bibliography: 40 titles; Fig.: 38; table 24.

The master's qualification work reviewed the current state of theoretical studies of combined extrusion processes, the features of the formation of deformation centers during cold extrusion, the experience of using the finite element method in the study of combined extrusion and the construction of dies and equipment for combined extrusion processes. The selection of directions and methods of theoretical research was made, the methodology of conducting experimental research was considered. The study of the stress-strain state and force mode during the combined three-way extrusion of parts with a flange and a process, as well as the modeling of shape change in such processes, was performed. Modeling of the power mode of the combined process of three-way extrusion using the energy method with straight and curved blocks was carried out. A comparison of the processes of combined three-way extrusion with chamfers and without chamfers on the tool was performed.

The graphic part consists of 9 posters based on the research results.

Key words: combined extrusion, plasticity resource, experimental planning, finite element method, energy method, force regime.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ	11
1.1 Осередки деформації при холодному видавлюванні	11
1.2 Застосування методу кінцевих елементів при дослідженні комбінованого видавлювання	16
1.3 Штампи і оснащення для процесів комбінованого видавлювання.....	21
2 ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1 Вибір напрямку дослідження	26
2.2 Методика проведення теоретичних досліджень	29
2.3 Методика проведення експериментальних досліджень	43
3 ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ	
КОМБІНОВАНОГО ВИДАВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ	52
3.1 Дослідження напружено-деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та відростком	52
3.2 Дослідження силового режиму комбінованого тристороннього видавлювання	60
3.3 Моделювання формозміни у процесах комбінованого тристороннього видавлювання	65
4 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО	
ВИДАВАННЯ ДЕТАЛІВ З ФЛАНЦЕМ	67
4.1 Моделювання силового режиму комбінованого процесу	

	тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними блоками	67
4.2	Моделювання силового режиму комбінованого процесу тристороннього видавлювання енергетичним методом з криволінійними блоками	72
4.3	Порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті	75
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	78
5.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	78
5.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії...	81
5.2.1.	Мікроклімат.....	81
5.2.2.	Склад повітря робочої зони.....	82
5.2.3.	Виробниче освітлення.....	83
5.2.4.	Виробничий шум.....	84
5.2.5.	Виробничі випромінювання.....	84
5.3	Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження режимів захисту персоналу в умовах дії загрозливих чинників НС...	85
5.3.1.	Дія радіації на живі організми.....	85
5.3.2.	Визначення режимів захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	86
6	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	89
6.1	Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	89
6.2	Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	95
6.3	Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	101
6.4	Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду	

їх окупності.....	103
ВИСНОВКИ.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	114
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	119
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ.....	129

ВСТУП

Актуальність теми. Практичній реалізації актуальних вимог випуску високоякісної продукції з мінімальними затратами сприяє застосування ресурсозберігаючих процесів точного об'ємного штампування. Для процесів поетапного точного об'ємного штампування характерні високі питомі навантаження на інструмент та обмеження номенклатури виробів. Для зниження сили деформування при простому видавлюванні збільшують кількість переходів, знижують сили тертя та площу контакту інструменту із заготовкою. Крім того, для зниження сили деформування, застосовують способи локального та комбінованого деформування. Для деталей складної форми перспективним є спосіб комбінованого тристороннього видавлювання. Цей спосіб дозволяє значно знизити силу деформування і як наслідок збільшити стійкість інструменту. Також зменшується кількість переходів, завдяки чому зменшується кількість штампової оснастки та відповідно знижується собівартість продукції. Однак, незважаючи на переваги застосування цього способу в практиці штампувального виробництва, його практична розробка і освоєння вимагає значних витрат на технологічну підготовку, оскільки пошук раціональних режимів проведення технологічних операцій вимагає трудомістких експериментальних робіт з відпрацювання технологій. Це пов'язано з відсутністю технологічних рекомендацій та методик проектування, та вибору технологічних режимів деформування з кількома ступенями свободи течії матеріалу. Недолік таких рекомендацій відчутний і при розробці процесів видавлювання деталей типу втулок з фланцем та осьовим відростком. Тому існує необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень для заповнення існуючої прогалини та створення науково-обґрунтованих методик проектування процесів видавлювання деталей даного типу способом комбінованого тристороннього видавлювання.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є підвищення ефективності технологічних процесів холодного об'ємного штампування на основі розробки та застосування способів комбінованого видавлювання, які сприяють зниженню енергосилових параметрів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати аналіз тенденцій та шляхів удосконалення процесів видавлювання деталей різної конфігурації; виконати теоретичний аналіз силового режиму процесів комбінованого тристороннього видавлювання деталей з фланцем та відростком з урахуванням впливу геометричних параметрів процесу та отримати аналітичні залежності енергосилових параметрів; на основі експериментальних досліджень технологічних режимів тристороннього видавлювання перевірити адекватність математичних моделей та припущень, прийнятих при теоретичному аналізі процесу.

Об'єкт дослідження. Процеси точного об'ємного штампування видавлюванням.

Предмет дослідження. Закономірності та режими формозміни деталей з фланцем та відростком при комбінованому тристоронньому видавлюванні.

Новизна одержаних результатів. На основі методу кінцевих елементів встановлені закономірності формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та відростком, які дозволяють прогнозувати зміну розмірів деталі, що штампується в залежності від ступеня деформування та геометричних параметрів перехідних ділянок інструменту.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

1.1 Осередки деформації при холодному видавлюванні

У дослідженнях комбінованого двостороннього видавлювання проводиться аналіз прямого та зворотного видавлювання шестикутних та трехоїдально-подібних скручених болтів [1]. Передбачається, що процес вичавлювання ділиться на два етапи (рис. 1.1). На першому етапі, осесиметричне пряме видавлювання і неосесиметричне зворотне видавлювання відбуваються одночасно до тих пір, поки зворотне видавлювання вивернутого поглиблення не буде завершено. На другому етапі відбувається тільки трубчастий процес прямого видавлювання. Пропонуються нові кінематично допустимі поля швидкостей, щоб визначити, що формує зусилля, видавлену довжину і картину деформації щодо перебігу пуансону.

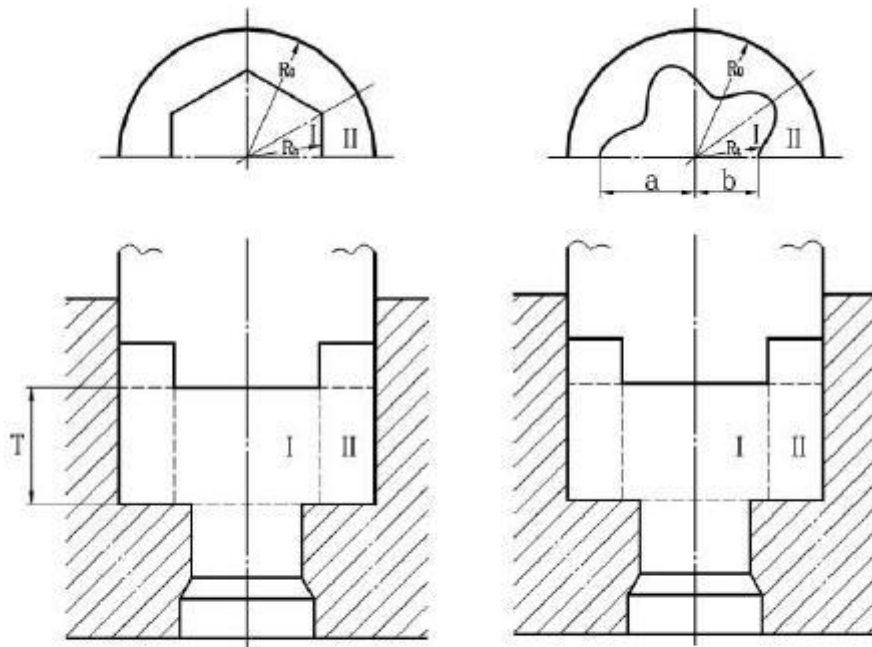


Рисунок 1.1 - Схема поетапного комбінованого деформування

Проведена серія експериментів процесів комбінованого видавлювання чашки-стрижня (рис. 1.2) вивчення впливу технологічних факторів, таких як

температура деформації та мастило, на пластичні властивості сплаву магнію [2]. У цій роботі був представлений глибокий аналіз механізму деформації на кожному етапі процесу видавлювання. У цій статті було запропоновано мастило та оптимізована температура деформації.

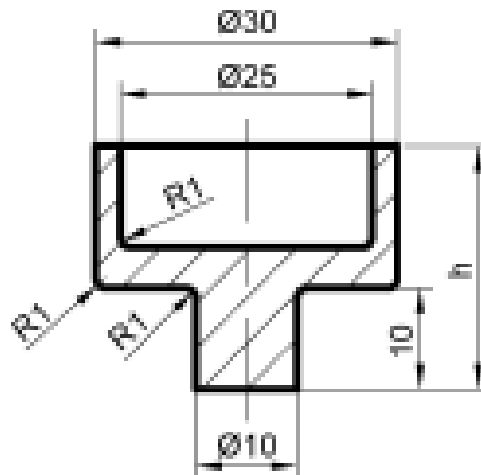


Рисунок 1.2 - Досліджувана схема комбінованого видавлювання

В основі теоретичних методів обробки металів тиском лежить уявлення, що для реального металу справедливі основні рівняння твердої механіки тіла, що розглядають останнє як безперервне та ізотропне середовище. Це припущення є досить правомірним, оскільки попередньо всебічно деформований та гомогенізований відповідною термообробкою метал має властивості макробезперервності.

В якості математичної моделі деформованого металу приймається ідеально жорстке пластичне середовище. Вважають, що процес деформації відбувається в ізотермічних умовах, температуру інструменту вважають рівною температурі тіла, що деформується. Умова виконується при деформаційних процесах у холодному стані.

У процесі холодного видавлювання спостерігається складне напружено-деформований стан з елементами розтягування у зоні вільного витікання металу [3]. Процес холодного видавлювання супроводжується значним зміцненням оброблюваного металу. Зміна твердості та мікроструктури заготівлі після видавлювання залежить від величини деформації окремих її зон та

характеризує її нерівномірність. Найбільш деформовані поверхневі шари, прилеглі до осередку деформації [4].

Аналіз комбінованого видавлювання з одночасною течією металу в поперечному та поздовжньому напрямках дозволяє виготовити велику кількість деталей різних між собою за формою та мають складну конфігурацію зовнішньої поверхні в оптимальному силовому режимі [5]. Теоретичному аналізу комбінованого видавлювання має передувати визначення особливостей формування осередку пластичної деформації та виявлення групи, до якої в залежності від виду осередку деформації слід віднести аналізований процес [6].

Як показують досвідчені денні [7], схеми одночасного видавлювання за кількома напрямками в залежності від особливостей формування осередку деформації можна поділити на три групи (табл. 1.1):

- схеми з приєднаним осередком деформації;
- схеми з об'єднаним осередком деформації;
- схеми з роз'єднаним осередком деформації.

Аналіз кожної групи схем комбінованого видавлювання має свої особливості. Найбільшою простотою відрізняється аналіз процесів першої групи, коли два суміжні осередка деформації простих способів видавлювання контактують одночасно та паралельно з активним інструментом (або жорсткою зоною, що передає навантаження) і примикають, один до одного, деякою граничною поверхнею розділу течії. У цьому випадку завдання зводиться до встановлення положення поверхні розділу течії на послідовних етапах формування. Відомі приклади аналізу таких сумісних завдань зворотно-прямого видавлювання деталей типу склянки з відростком з боку дна.

Друга група схем комбінованого видавлювання відрізняється тим, що різноспрямовані потоки металу зароджуються в одному загальному об'єднаному (спільному) осередку деформації. Цей випадок спостерігається при деформуванні низьких заготовок або на заключних стадіях процесу.

Таблиця 1.1 - Види осередків деформації при холодному видавлюванні

	Умовна схема	Схема видавлювання
Приднаний осередок деформації		
Об'єднаний осередок деформації		
Роз'єднаний осередок деформації		
Комбінований осередок деформації		

Для схем із об'єднаним осередком деформації аналіз технологічних режимів можливий, якщо застосовувати як параметри, що варіюються кінематичні та швидкісні параметри.

Найбільшу трудомісткість становить аналіз процесів третьої групи, тобто. схем видавлювання з роз'єднаними осередками деформації. При наявності проміжної жорсткої зони між роз'єднаними осередками деформації вибір швидкості (наприклад, швидкості переміщення тієї ж жорсткої зони) як параметр, що варіюється, не призводить до позитивного результату, тому що при дослідженні функцій повної потужності на екстремум кінематичний параметр не входить в одержуваний вираз.

Для таких схем деформування, мабуть, прийнятне припущення про те, що при комбінованому перебігу поряд з балансом потужностей має виконуватися умова рівноваги потужностей, діючих з двох сторін від площини, що розділяє два самостійні осередку деформації.

Моделювання процесів видавлювання, що утворюють четверту групу передбачає застосування всіх розглянутих підходів у залежно від цього, які особливості комбінованих осередків деформації [8].

У ряді робіт вказується на неефективність застосування в якості змінних кінематичних і швидкісних параметрів. У роботах [9] наголошують на доцільності вирішення проблеми мінімізації шляхом введення чотирикутних твердих елементів, але не дають рекомендації щодо схем течії, для яких прийнятні такі елементи.

Відомі рішення [10] для комбінованого видавлювання стрижня та втулки з перемичкою отримані з використанням чотирикутного елемента. Чотирикутний елемент застосовували для поперечно-зворотного видавлювання (рис. 1.3. а, б). Тут зміна вихідних швидкостей забезпечується варіюванням положення точки D на нижній поверхні напівматриці та точки A на осі симетрії - однак, коли точка A займає крайнє нижнє положення поле швидкостей (рис. 1.3, в) стає кінематично неможливим, а зміна положення D втрачає сенс [11].

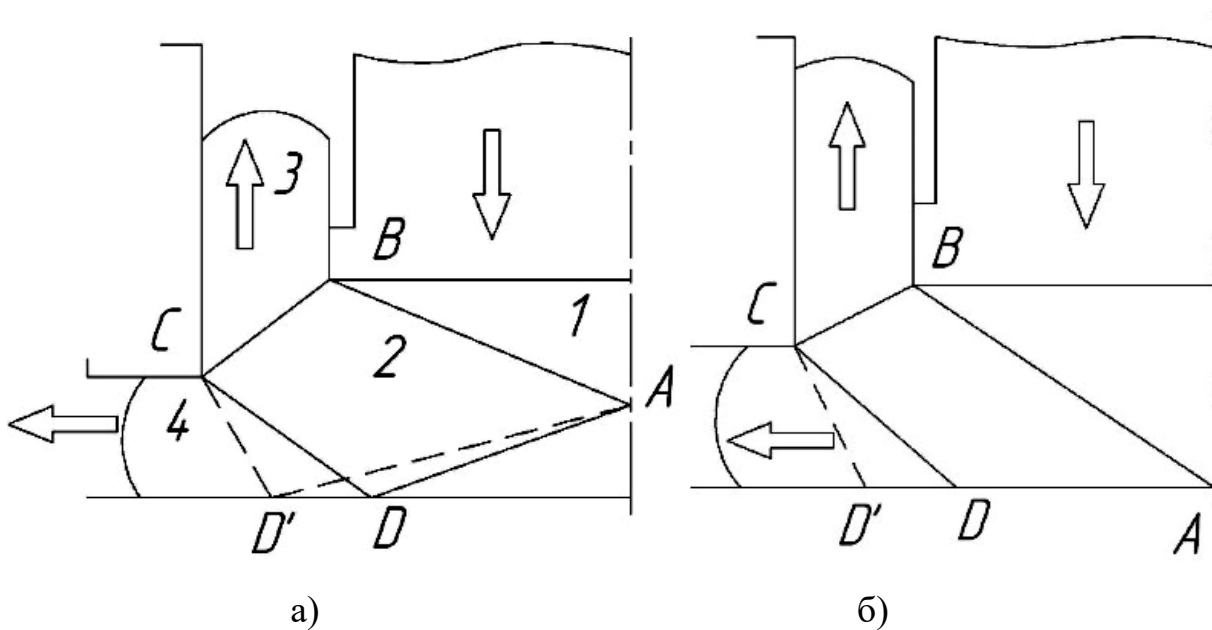


Рисунок 1.3 – Кінематично можливі поля швидкостей для деталі типу «стакан» з фланцем

У роботі [12] проведено аналіз процесу радіально-зворотного видавлювання порожнистої деталі з фланцем методом верхньої оцінки та кінцевих елементів. При аналізі методом верхньої оцінки було реалізовано схему об'єднаного осередку деформації. Для аналізу методом кінцевих елементів була використана автоматизована система QFORM – 2D.

1.2 Застосування методу кінцевих елементів при дослідженні комбінованого видавлювання

Метод кінцевих елементів набув великого поширення з розвитком комп'ютерної техніки, оскільки це значно спростило його використання. Так у [13] метод кінцевих елементів використовувався для прогнозування утворення тріщини при комбінованому видавлюванні. Також було запропоновано більш надійний спосіб видавлювання з рухомою матрицею, що дозволило зменшити ймовірність утворення тріщини за рахунок розділеного осередку деформації, яка до кінцевої стадії процесу стає об'єднаним.

У роботі [14] також розроблено математичну модель радіально-прямого видавлювання порожнистого виробу з фланцем за допомогою енергетичного методу. Надано рекомендації щодо визначення оптимізованого значення параметра, що визначає положення поверхні розділу течії металу та за визначенням кінцевої формозміни.

У роботі [15] за допомогою енергетичного методу був змодельований процес радіально прямого видавлювання. В результаті було суттєво скорочено час моделювання та була отримана можливість інтерактивного керування компонуванням процесу з готових кінематичних модулів, що робить одержувані результати прогнозованішими.

На сьогоднішній день, актуальними для вивчення та дослідження, є схеми тристороннього видавлювання [16]. Серед досліджень технологічних можливостей нових способів комбінованого видавлювання можна назвати роботу [17]. Було зазначено, що прості схеми прямого, зворотного та поперечного видавлювання комбінують у різних варіантах. Поєднання простих схем може бути поєднаним або послідовним (як за часом, так і за шляхом деформування).

Для більшості способів комбінованого видавлювання базовою схемою служить схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металу в штампі, що містить незалежно рухомі складові (з двох частин) робочі інструменти: матрицю, пуансон та протипуансон (рис. 1.4).

Останнім часом у низці робіт широко використовується аналіз процесів комбінованого видавлювання на основі методу кінцевих елементів, які спрямовані на встановлення напружено-деформованого стану [18].

На рис. 1.5 представлений схема видавлювання для аналізу тристороннього видавлювання. Ця робота представляє аналіз прямо-зворотного-радіального видавлювання. Метод кінцевих елементів, який був використаний для вивчення впливу геометричних параметрів, таких як радіус закруглення матриці та висоти зазору, а також умов впливу тертя [19].

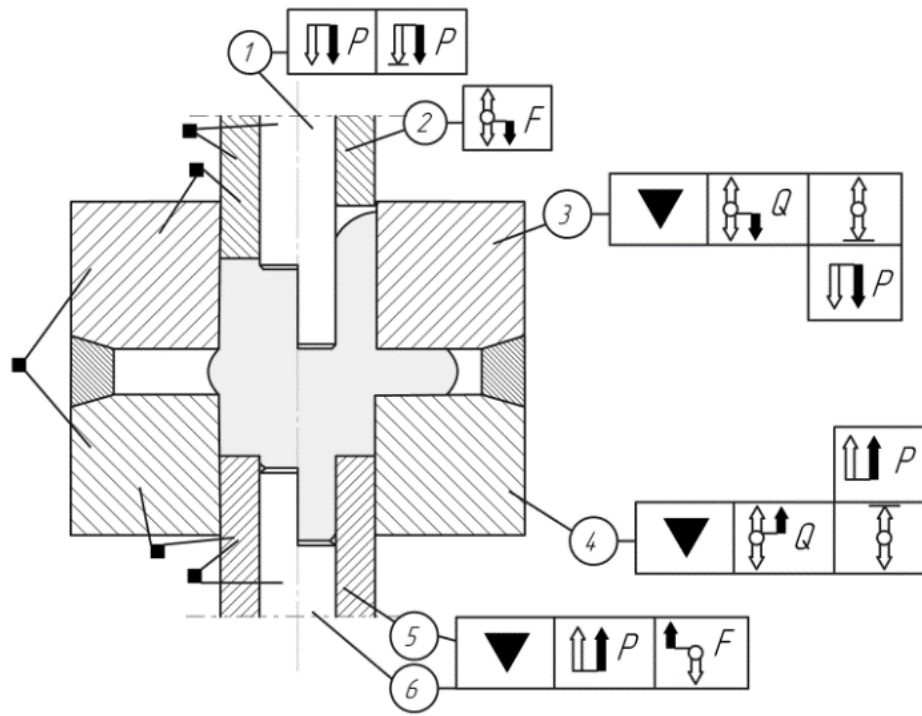


Рисунок 1.4 – Схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металу

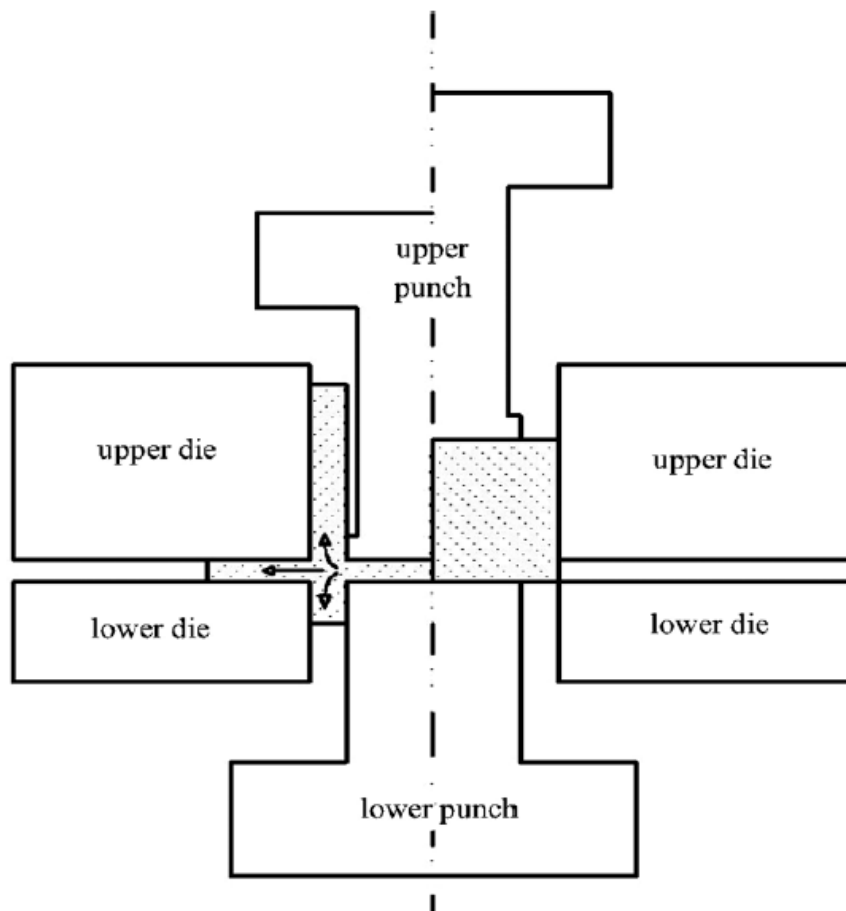


Рисунок 1.5 – Схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металу

Програмне забезпечення ABAQUS використовується для моделювання кінцевих елементів. Результати кінцевих елементів порівнюються з експериментальними даними з точки зору формування навантаження та течії матеріалу в різних зонах, розподіл твердості в поздовжньому перерізі продукту. Також використовується для перевірки розподіл деформації, отриманий з аналізу методом кінцевих елементів (рис. 1.6). Порівняння теоретичних та експериментальних даних, дали добрі результати. Експеримент проводився за допомогою алюмінієвих зразків [20].

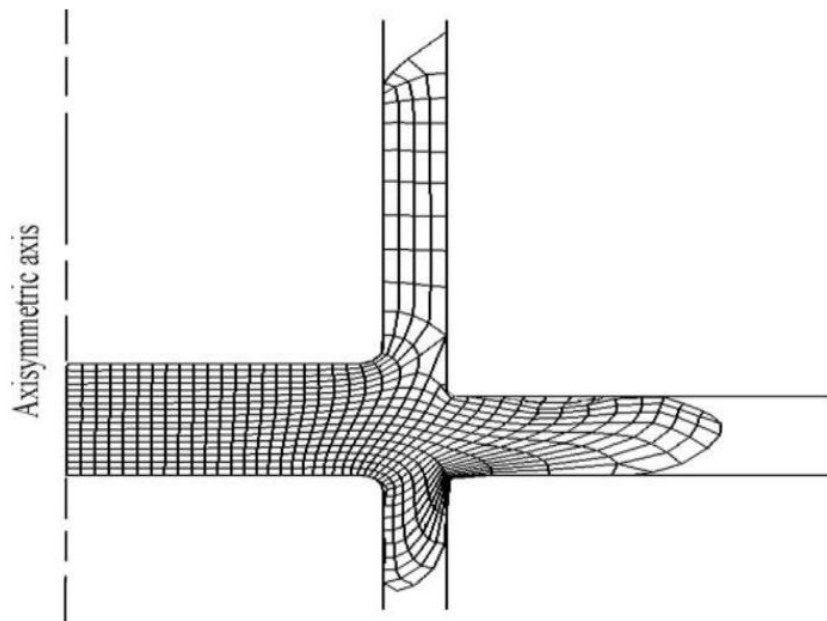


Рисунок 1.6 – Схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металу

Жорсткопластичний метод кінцевих елементів використовується для кількісного аналізу процесу радіального видавлювання у поєднанні із зворотним видавлюванням. У роботі [21] відомо також, що різні змінні, такі як величина зазору, радіус закруглення матриці та фрикційні умови приймаються як параметри процесу для аналізу (рис. 1.7).

Аналізувалося тристороннє видавлювання з одностороннім навантаженням інструменту. Розглядався вплив геометричних параметрів інструменту протягом металу. Аналіз проводився з допомогою методу кінцевих елементів. Заміри твердості у поздовжньому перерізі використовувалися

визначення розподілу деформації. У роботі вказується, що висота порожнини між напівматрицями та радіус заокруглення кута матриці надають значний вплив на формування зусилля. Збільшення цих параметрів призводить до більшої течії металу в радіальному напрямі. Також, аналізувалося тристороннє видавлювання із двостороннім навантаженням інструменту. Крім того, аналізувався вплив геометричних параметрів протягом металу в трьох напрямках.

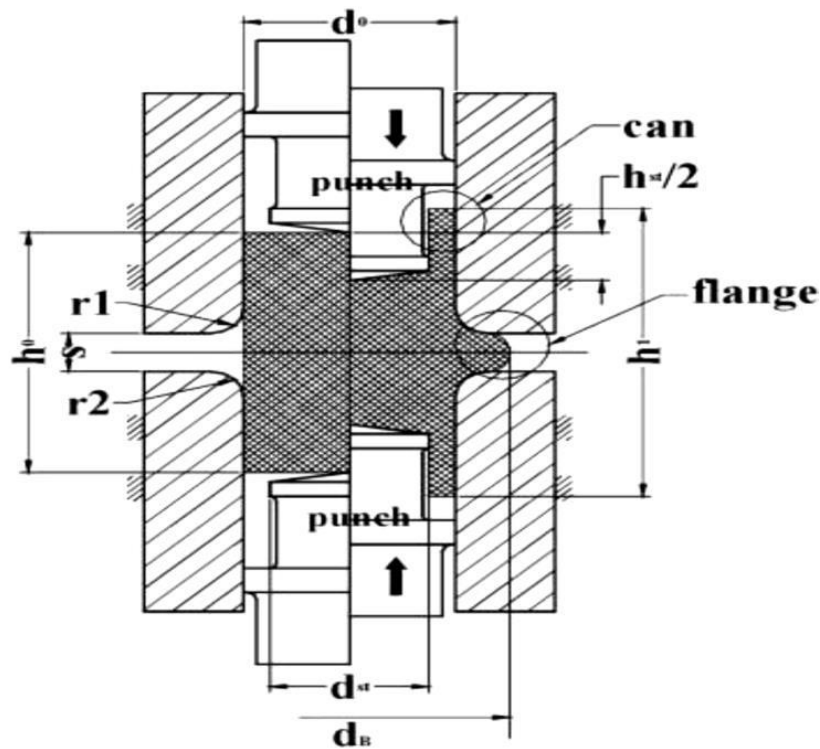


Рисунок 1.7 – Схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металу

Увага була приділена формуванню зусилля видавлювання та співвідношенням між об'ємами металу видавленим у різних напрямках. Коефіцієнт тертя дуже впливає на зусилля видавлювання та ступінь деформації.

У роботі [22] проведено моделювання методом кінцевих елементів процесу формоутворення заготівлі типу втулка з фланцем комбінованим тристороннім видавлюванням. Отримано залежності управління процесом комбінованого видавлювання за рахунок зміни геометрії робочого інструменту. Розроблено методику прогнозування дефекту металу та надано рекомендації

щодо запобігання появі даного дефекту при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей типу втулки з фланцем.

1.3 Штampi і оснащення для процесів комбінованого видавлювання

На рис. 1.8 представлений штамп для холодного видавлювання із вбудованим гідравлічним компенсатором. У даному штампі введено закріплену в порожнині нижньої плити, яку заповнено робочою рідиною, за допомогою матрицеутримувача, плаваючу матрицю. З можливістю руху щодо нижньої плити штампу з встановленими між ними гідроізоляційними прокладками, які розташовані відповідно між матрицею і матрицеутримувачем, і між матрицеутримувачем і нижньою плитою, втулку, яку запресовано в верхню частину матриці для напряму пуансона, що плаває виштовхувач з можливістю руху разом із матрицею, сферичну опору виштовхувача, плунжери, закріплені на напрямних колонках з можливістю руху у втулках, пружні золотники, з можливістю руху у втулках регулюючих гвинтів. Це забезпечує можливість отримання особливо точних деталей типу «стакан» з мінімальною величиною різноосності, а також гарантує підвищення стійкості робочого інструмента [23].

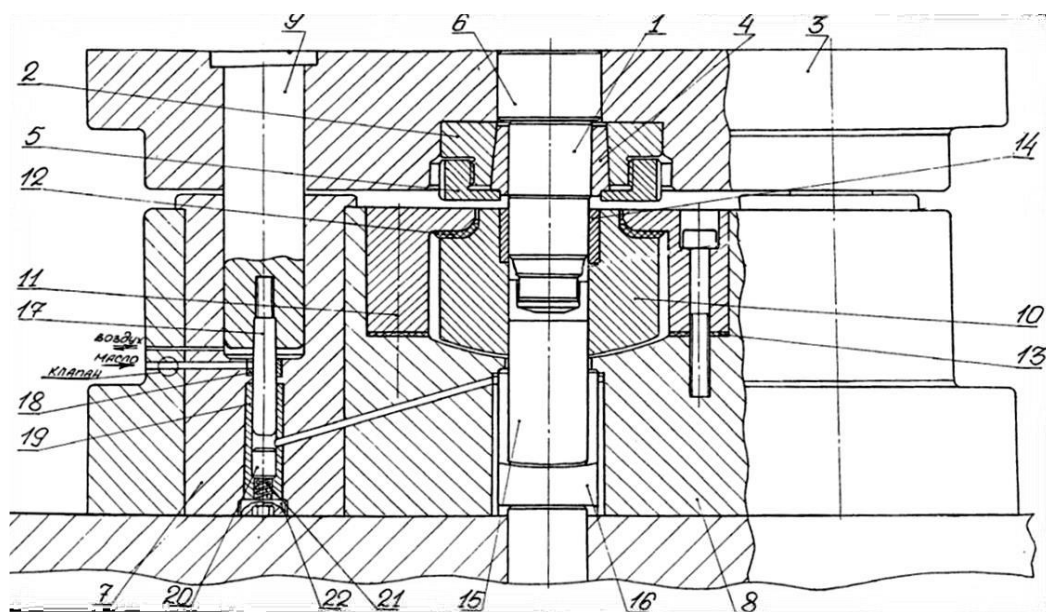


Рисунок 1.8 - Штамп для холодного видавлювання із вбудованим гідравлічним компенсатором

На рис. 1.9 представлений штамп для видавлювання порожнистих деталей із складним профілем. Запропонована конструкція штамп для видавлювання порожнистих деталей зі складним профілем.

Містить обертові навколо нерухомої осі, розташованої на нерухомих опорах, важелі, які взаємодіють одним кінцем з профільованою бічною поверхнею пуансона, а другим кінцем, який проходить крізь виточку в пуансоні, що деформує, з торцем оправки дозволяє за рахунок суміщення операцій радіально-прямого видавлювання та зміна зазору, в який тече метал, між оправкою та матрицею, пересуванням оправки, за один робочий хід преса отримувати порожнисті деталі зі складною внутрішньою поверхнею [24]. Використання затискних пристроїв для отримання типових деталей так само розглянуто в роботах [25].

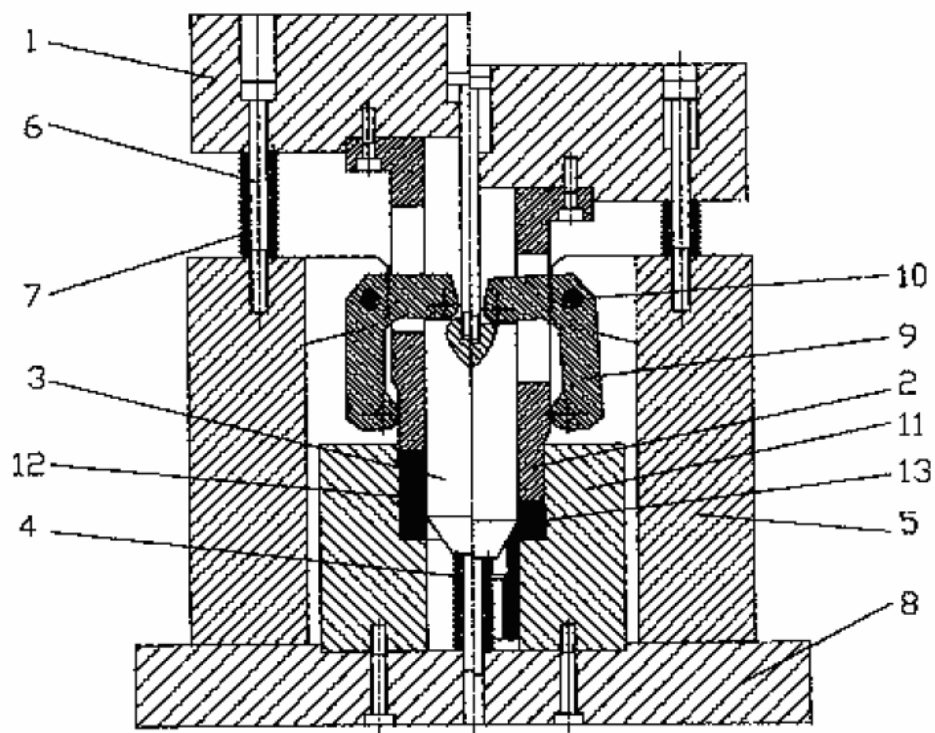


Рисунок 1.9 - Штамп для видавлювання порожнистих деталей зі складним профілем

На рис. 1.10 представлений штамп для комбінованого видавлювання деталей із фланцем та відростком. Запропонована конструкція штамп для

комбінованого видавлювання деталей з фланцем та відростком. Пуансон, що містить, контейнер, в якому знаходиться матриця, яка пружна, контрпуансон, виштовхувач, який спирається на підйомні штоки, які пружні, і перешкоджає вигину та поломці контрпуансону, дозволяє отримувати зазор між пуансоном і матрицею, а також між матрицею і контрпуансоном, який тече метал, отримувати деталі з фланцем та відростком. Штамп не дозволяє отримувати з низькою трудомісткістю та собівартістю деталі [26]. На рис. 1.11 представлено експериментальне досліджував течії металу при комбінованому процесі радіального та зворотного видавлювання в конічній матриці. Для оцінки можливостей формозміни та якості виробів, одержуваних при видавлюванні, найбільш важливим є вивчення напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу, знання розподілу швидкостей течії металу в заготівлі дозволяє прогнозувати форму та розміри деталі, а знання розподілу накопиченої деформації – формувати необхідні показники якості деталі.

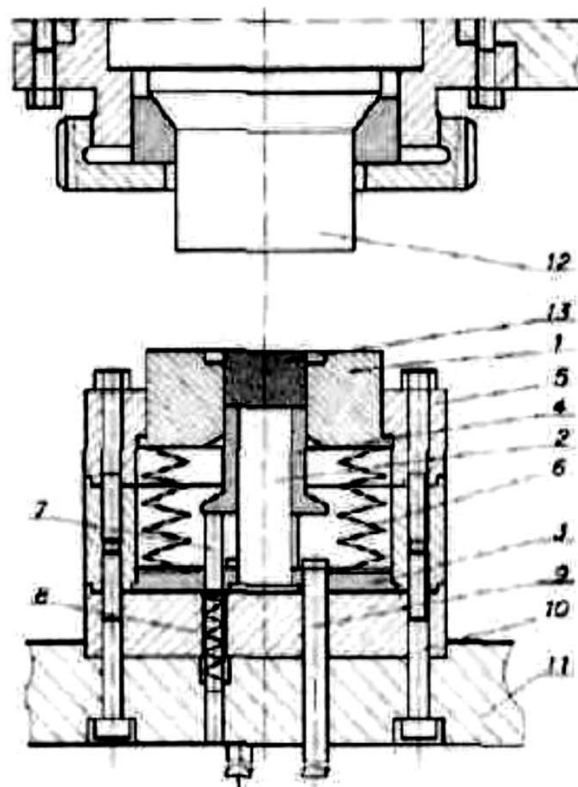


Рисунок 1.10 - Штамп для комбінованого видавлювання деталей з фланцем та відростком

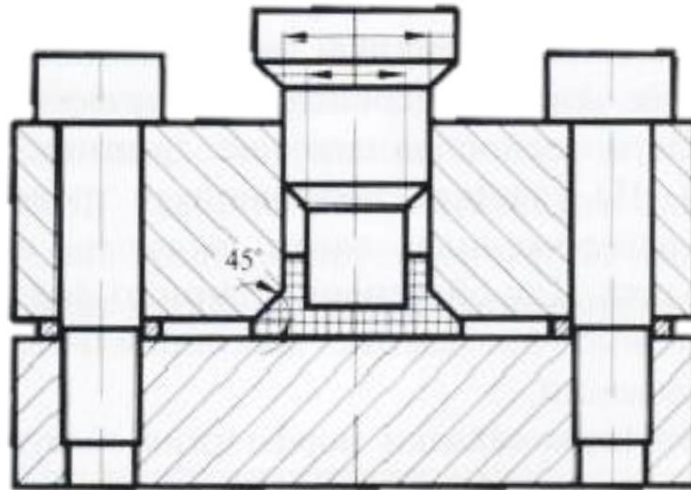


Рисунок 1.11 - Схема експериментального штампу з конічною матрицею

Крім того, відомий розподіл деформацій дозволяє виявляти найбільш небезпечні зони з великими ступенями локальної деформації та ним оцінювати допустимі геометричні характеристики формоутворення конструктивних елементів деталей. Для вирішення подібних завдань добре зарекомендував себе метод координатних (ділильних) сіток. Провели експериментальні дослідження кінематики течії металу з метою отримання даних для математичного опису комбінованого процесу радіального та зворотного видавлювання конічної матриці [27].

Прогресивні технологічні процеси холодного та напівгарячого деформування дозволяють отримувати металеві заготовки деталей з високими експлуатаційними властивостями та мінімальними допусками. Однак розробка технологічних переходів та проектування оптимальної конструкції інструментального оснащення можливі лише на основі накопичених даних про закономірності пластичної течії металевих матеріалів. На рис. 1.12 представлений аналіз мікроструктури заготовок в осередку деформації при видавлюванні пуансона з плоским торцем.

Проведений аналіз показав, що у всіх напрямках (осьовому та радіальному), перпендикулярних до поверхонь видавлюваного пуансона, відбувається стиснення зерен мікроструктури. Однак часто деформація зерен відбувається не у всьому об'ємі заготовки. Вона охоплює лише локальний об'єм

навколо пуансона, що вдавлюється. Цей об'єм у науково-технічній літературі називається осередком деформації. Слід зазначити, що у поздовжньому (осьовому) перерізі зовнішнє обрис осередку деформації перед торцем вдавлюваного пуансона близько до півсфери, а вздовж бічної поверхні пуансона практично повторює контур обрис пуансона. Однак розміри та внутрішній стан осередку можуть суттєво різнитися залежно від форми пуансона [28].

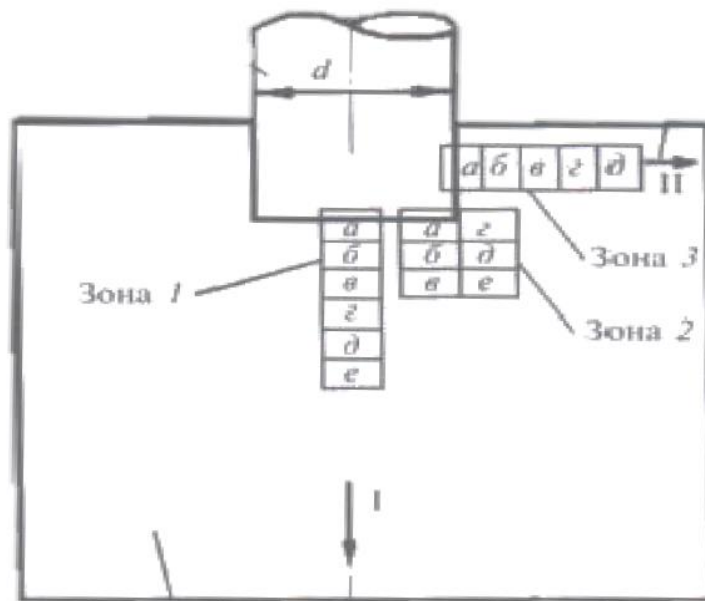


Рисунок 1.12 - Схема розташування зон при вдавлюванні пуансону з плоским торцем

2 ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основним завданням у машинобудуванні та металургії в умовах високої конкуренції є випуск високоякісної та точної продукції з мінімальними економічними та технічними показниками виробництва. Реалізувати на практиці це можливо за рахунок застосування процесів обробки металів тиском та, зокрема, ресурсозберігаючі процеси точного об'ємного штампування, у тому числі холодне видавлювання.

Фасонні вироби складної конфігурації, широко поширені в промисловості, найчастіше виготовляють поетапно із застосуванням холодного поздовжнього (зворотним та прямим) та поперечного (радіального) видавлювання.

Для зниження зусиль деформування при простому односторонньому видавлюванні збільшують кількість переходів та ступенів свободи витікання металу, знижують сили тертя та площу контакту інструменту із заготовлею. Крім того, застосовують комбіновані способи видавлювання як двох, так і тристороннього деформування [29].

2.1 Вибір напрямку дослідження

Процеси точного об'ємного штампування дозволяють отримувати деталі та заготовки максимально наближені за геометрією до готового виробу. У процесах холодного штампування коефіцієнт використання матеріалу досягає 0,98% [5, 6]. Також процеси холодного об'ємного штампування характеризуються високою енергоефективністю та продуктивністю. Найбільш високі економічні показники можливі за серійного виробництва. У випадках використання універсальної оснастки, що переналагоджується, процеси холодного об'ємного штампування стають конкурентоспроможними в порівнянні з процесами різання, які переважають на машинобудівних підприємствах. Тому для більш широкого використання холодного

штампування має сенс освоєння типорозмірів та конфігурацій складно профільних виробів з кількома напрямками течії матеріалу.

У холодному штампуванні досі не існує алгоритмів, керуючись яким можна призначити оптимальні технологічні параметри, забезпечити необхідну формозміну, а також прийнятну для виробництва міцність та стійкість робочого інструменту. У більшості випадків розробка технології з використанням того чи іншого виду видавлювання представляє унікальний у своєму роді процес, результати якого багато в чому залежить від кваліфікації технолога. В результаті для виробництва однієї деталі може бути кілька варіантів її виготовлення при цьому кожен варіант вимагає експериментальної перевірки, а отже виготовлення або модернізація інструменту, штампу, обладнання що спричинить як тимчасові, і матеріальні витрати. Економічна недоцільність такого підходу найбільш очевидна в у разі невеликої партії деталей, коли витрати на відпрацювання технології зроблять виробництво нерентабельним. Для інтенсифікації процесу розробки технологічних операцій об'ємного штампування необхідна інформація про напружено-деформований стан матеріалу заготовки, впливу геометричних параметрів на формозміну заготовки. Для отримання відповідної інформації можуть бути використані методи експериментального дослідження та теоретичного моделювання, і навіть їх комбінація [5, 9].

Завданням обробки металів тиском властиві великі пластичні деформації. Метали мають складні фізико-механічними властивостями, що змінюються у процесі деформації. Необхідно мати розрахунковий апарат, який дозволив би спостерігати за процесом пластичної формозміни кожної окремої частинки, із яких складається тіло, що обробляється [10, 11].

Під час розробки технологічних процесів обробки металів тиском доводиться стикатися з необхідністю визначення розрахунковим шляхом зусиль, роботи та потужності деформації. Це потрібно для вибору типу та потужності штампувального обладнання [8, 12 - 16].

На сьогоднішній день деталі з трьома напрямками течії матеріалу можна отримати поетапним формозміненням заготовки. Маловивченими є схеми комбінованого видавлювання з тристороннім напрямком течії матеріалу (рис. 2.1). Дані схеми володіють такими перевагами як розширені можливості в формозміні та сприятливий напружено-деформований стан заготівлі у процесі видавлювання.

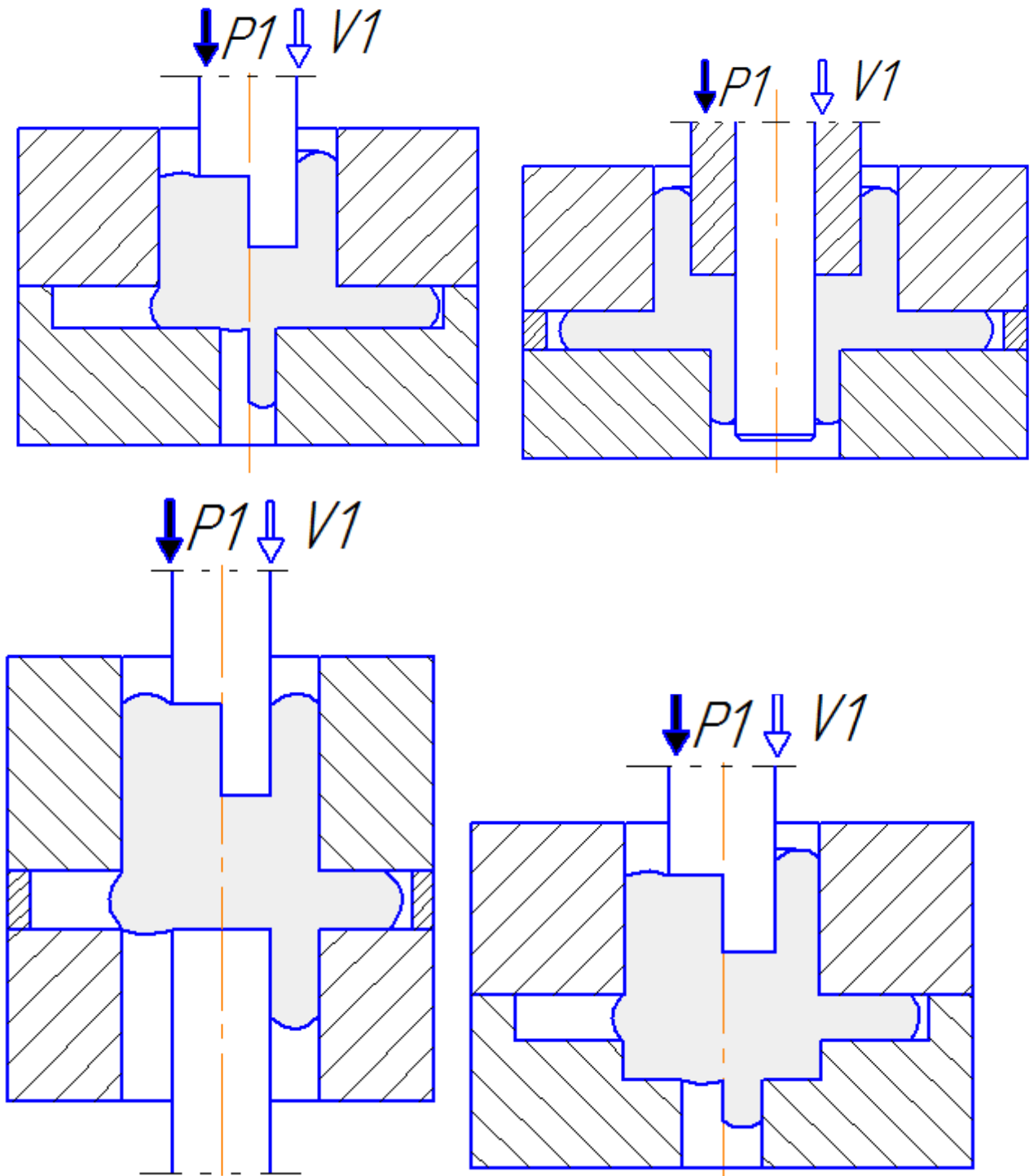


Рисунок 2.1 - Схеми тристороннього видавлювання

Комбіноване тристороннє видавлювання має ряд переваг у порівнянні з поетапною формозміною, такі як: спрощене оснащення, вільний перебіг матеріалу, поєднаний осередок деформації, енергоефективність за рахунок зменшення кількості переходів тощо.

На вибір методу дослідження впливає характер поставлених завдань [17-19]. Мета теоретичних досліджень – аналіз процесів комбінованого видавлювання, створення математичної моделі, що дозволяє оцінити силовий режим деформування, розкриття з урахуванням основних технологічних чинників, які впливають перебіг процесу.

Використання математичних моделей дає можливість ще на стадії проектування технологічного процесу передбачити поведінку матеріалу в реальному процесі при різних поєднаннях керуючих та геометричних параметрів та отримати необхідні для проектування відомості.

Аналіз відомих теоретичних методів розрахунку технологічних процесів [8, 7, 10-24] дозволив виділити енергетичний метод, метод кінцевих елементів та планування експерименту для аналізу комбінованого тристороннього видавлювання.

З експериментально-аналітичних методів визначення деформованого стану та аналізу процесу течії металу був обраний метод координатних сіток [25, 26].

2.2 Методика проведення теоретичних досліджень

Застосування енергетичного способу балансу потужностей.

Одним з ефективних методів вирішення задач пластичного деформування вважається енергетичний метод основними перевагами якого є його гнучкість, оперативність, можливість ефективного застосування комп'ютеру для вибору відповідних функцій і параметрів, що варіюються, що описують кінематику течії [10, 19, 27].

Згідно з цим методом у деформованій заготовці виділяють ряд пластичних зон – кінематичних елементів. Після чого для кожного елемента знаходять кінематично можливе поле швидкостей та на його основі повну потужність деформування, спрощення якої дозволяє уточнити оцінки силового режиму та картин пластичного течії та оптимізувати параметри протікання процесу деформації [5, 21–23].

$$v_z = c_1 \cdot z + c_2$$

$$v_r = -\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot r + \frac{c_3}{r},$$

де c_1, c_2, c_3 – шукані змінні.

Основні припущення, які є в енергетичному методі:

- а) швидкість руху інструменту стала;
- б) ізотропність матеріалу;
- в) матеріал не зміцнюємо, стискаємо, пружними деформаціями нехтують;
- г) напруження тертя на контактній поверхні постійні та наперед задані (за законом Зібеля).

Характерні для методу умови та обмеження:

- а) умова стисливості (умова сталості об'єму) – об'єм тіла до деформації дорівнює об'єму тіла після деформації;
- б) кінематичні граничні умови – ці умови визначають переміщення або швидкість переміщень окремо взятих обсягів, поверхонь або частинок тіла, що піддається деформації в швидкостях на вході чи на виході;
- в) умова нерозривності нормальних компонент швидкості течії, розрив можливий лише у дотичних складових.

Для вирішення задачі енергетичним методом необхідно поділити деформовану заготовку на кілька зон простої форми та визначити всі можливі потужності, що витрачаються на деформування заготовки.

Рівняння балансу потужностей виглядає так:

$$N_a = N_d + N_c + N_t$$

де N_a, N_d, N_c, N_t - потужності активних, деформуючих сил та сил зрізу та тертя.

Потужність активних сил:

$$N_d = \iiint_{V_d} \sigma_s \dot{\varepsilon}_i dV_d,$$

де N_d – потужність, що витрачається на деформування,

σ_s – напруження текучості,

$\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації,

V_d – об'єм деформування,

dV_d – нескінченно малий об'єм деформування.

Інтенсивність швидкостей деформацій

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2},$$

де $\dot{\varepsilon}_z = \frac{dV_z}{dz}$, $\dot{\varepsilon}_r = \frac{dV_r}{dr}$, $\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}$, $\dot{\gamma}_{rz} = \frac{dV_r}{dz} + \frac{dV_z}{dr}$ - швидкості лінійних та кутових деформацій.

При цьому має виконуватися умова стискання матеріалу

$$\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta = 0.$$

Підінтегральний вираз може вийти досить складним для інтегрування, тому необхідна лінеаризація інтенсивності швидкостей деформацій

$$\dot{\varepsilon}_i = 1.08 \cdot |\dot{\varepsilon}_{\max}|.$$

Потужність сил зрізу

$$N_c = \iint_{F_c} \tau_c V_c df_c,$$

де N_c – потужність, що витрачається на зріз,

$\tau_c = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ - напруження зрізу, МПа,

V_c – відносна швидкість зрізу двох сусідніх зон,

F_c – поверхня зрізу, мм²,

df_c – нескінченно мала площадка зрізу.

Потужність сил тертя

$$N_c = \iint_{F_k} \tau_k V_k df_k,$$

де N_t – потужність, що витрачається на тертя,

$$\tau_k = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \mu_s - \text{контактне напруження, МПа,}$$

V_k – відносна швидкість руху заготовки і інструменту,

F_k – поверхня контакту заготовки і інструменту,

df_k – нескінченно мала площадка контакту.

Основне для енергетичного методу – це рівняння енергетичного балансу потужностей зовнішніх та внутрішніх сил на кінематично можливих переміщеннях:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \iiint_V \sigma_s \cdot \dot{\epsilon}_i \cdot dV + \iint_{F_T} \tau_k \cdot [V_k] \cdot df_k + \iint_{F_c} \tau_s \cdot [V_c] \cdot df_c. \quad (2.1)$$

Прирівнявши активну потужність сумі потужностей деформування, тертя та зрізу, отримаємо значення тиску p

$$p = \frac{\sum(N_{di} + N_{ci} + N_{ti})}{F \cdot V_0}. \quad (2.2)$$

Для простоти розрахунків наведемо тиск до безрозмірної величини

$$\bar{p} = \frac{p}{\sigma_s}. \quad (2.3)$$

Приведений тиск є універсальною величиною, що дозволяє для певної схеми деформації для різних матеріалів розрахувати величину зусилля деформування

$$P = \bar{p} \cdot \sigma_s \cdot F, \quad (2.4)$$

де F – площа контакту інструменту, що деформує.

Застосування методу кінцевих елементів для дослідження процесів комбінованого тристороннього вичавлювання.

На сьогоднішній день метод кінцевих елементів є самим перспективним у питанні вирішення плоских та осесиметричних задач. У своїй методологічній основі цей метод тісно пов'язаний з такими проєкційними методами, як метод Галеркіна або метод Ритца, однак замість координатних функцій у цьому методі як координатні використовуються функції з кінцевим носієм, відмінні від нуля тільки в порівняно невеликій області зміни аргументів [2, 3]. Метод знайшов широке застосування для вирішення задач пластичної деформації заготовок, розрахунку напружено-деформованого стану та температурних полів у задачах, які ставляться перед обробкою металів тиском.

Метод зводиться до такого: область розбивається на окремі елементи, в межах цього елемента записується функціональне вираження для кожного з шуканих параметрів системи рівняння, як прості функції координат; прирівнюючи значення у вузлових точках для сусідніх областей, виходять рівняння (системи рівнянь), за допомогою яких визначаємо коефіцієнти у функціональних рівняннях.

Створенню такого методу багато в чому сприяло розвиток обчислювальної техніки. Сьогодні створено велику кількість програмних продуктів для моделювання процесів обробки металів тиском, основу яких покладено метод кінцевих елементів.

Використання методу кінцевих елементів потребує великої кількості часу та дуже трудомістко. Однак розвиток обчислювальної техніки та розробка програмного забезпечення дозволили звести трудомісткість використання цього до мінімуму.

Існує безліч спеціалізованих та загально інженерних пакетів для аналізу методом кінцевих елементів, такі як QForm 2D/3D, DeForm 2D/3D, Abacus, FORGE, AutoForm та ін.

Одним з найбільш популярних пакетів методу кінцевих елементів, що використовують є DeForm 2D/3D.

Алгоритм створення моделі у пакеті DeForm 2D/3D наступний. У програмі Solid Works створювалися тривимірні геометрії інструменту та заготовки у натуральному масштабі. Після чого створювалося складання елементів згідно зі схемою видавлювання з дотриманням необхідних геометричних параметрів і зберігалася з роздільною здатністю ".stl". Далі у програмі DeForm 2D/3D у розділі «Препроцесор» додавали всі елементи збирання з розширенням ".stl". Тут же задавалися для заготівлі матеріал, сітка, а для інструмент напрямок рух. Після чого ставився хід головного інструмента, коефіцієнт тертя по Зібелю. Потім проводився автоматичний розрахунок у програмному пакеті DeForm 2D/3D [144].

За допомогою методу кінцевих елементів, використовуючи математичний апарат методу планування експерименту, досліджувався силовий режим деформування та формозміна. Також оцінювалося напружено-деформований стан, використовуючи дані якого, розраховувався ресурс пластичності.

Застосування методу планування експерименту.

Підвищення ефективності досліджень та інженерних розробок досягається використанням математичних методів планування експериментів. Використання математико-статистичних методів при постановці завдань, у процесі обробки отриманих даних суттєво скорочує терміни рішення, знижує витрати на дослідження та підвищує якість одержаних результатів [6, 5].

Як незалежні змінні вибираються досліджувані параметри процесів обробки металів тиском. Локальна область визначення факторів встановлюється з апріорних міркувань. Кожен із факторів варіюється на двох рівнях. Інтервали варіювання факторів та їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому та нижньому рівнях зазначаються у таблиці рівнів факторів (табл. 2.1).

Кодовані значення факторів (x_i) пов'язані з натуральними (X_i) співвідношеннями:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}.$$

Відповідно до обраного плану для лінійної функції рівняння регресії виконується 16 дослідів. Кожен досвід повторюється тричі. Послідовність обробки результатів експерименту для рівномірного дублювання дослідів:

1. Розрахунок дисперсії досвіду. Для кожного досвіду за формулою (2.3) розраховується рядкова дисперсія.

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{f_u},$$

де y_{ug} – результат g -го повторення u -го експерименту,

\bar{y}_u – середнє арифметичне значення всіх n_u дублей u -го досвіду,

$f_u = n_u - 1$ – число ступенів вільності при визначенні u -ої построквої дисперсії S_{yu}^2 .

Для перевірки однорідності ряду за формулою (2.4) розраховується величина критерію Кохрена.

$$G^{\text{розр}} = \frac{S_{yu \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}$$

де $G^{\text{розр}} < G^{\text{табл}}$ – умова неоднорідності ряду дисперсій.

2. Розрахунок коефіцієнтів регресії. У цьому випадку модель будується за наступною залежністю:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i < j < l \leq 4} b_{ijl} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_l + b_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (2.5)$$

Для розрахунків коефіцієнтів b використовується розширена матриця планування (табл. 2.2) та результати дослідів (середнє з трьох).

Коефіцієнти розраховуються за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot y_u}{N}. \quad (2.6)$$

3. Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів. За формулою визначається дисперсія оцінок коефіцієнтів

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}. \quad (2.7)$$

Далі за формулою визначається довірчий інтервал коефіцієнтів регресії

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{b_i}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнти, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу або більше його слід визнати статистично значущими. Статистично незначущі коефіцієнти моделі можна виключити.

4. Перевірка адекватності моделі. За формулою визначається дисперсія неадекватності.

$$S_{неад} = n \cdot \sum_{u=1}^N (y_{u_{розр}} - \bar{y}_{u_{експ}})^2 \quad (2.9)$$

Гіпотеза про адекватність моделі визначається за критерієм Фішера

$$F_{f_2 f_1}^{розр} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} \quad (2.10)$$

де $F_{f_2 f_1}^{розр} < F_{табл}$ – гіпотеза про адекватність моделі не відкидається.

Часто вплив факторів на величину відгуку описується нелінійними залежностями. У таких випадках необхідно складати плани другого порядку [6]. В результаті виходять регресійні моделі у вигляді повного квадратичного полінома, для яких фактори варіюються на трьох рівнях. Вирішенням цієї проблеми є реалізація план 3к. Але оскільки реалізація такого плану потребує великої кількості дослідів вже при $k=4$, то замість планів типу 3к широко застосовують плани, яких як ядро використовуються ортогональні плани типу 2к, якому добудовують конструкцію плану другого порядку [14].

Інтервали варіювання факторів для трирівневого експерименту та їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому та нижньому рівнях зазначаються у таблиці рівнів факторів (табл. 2.3).

Таблиця 2.1 – рівні факторів

Фактори	X_1	X_2	X_3	X_4
Основний рівень (X_{i_0})	X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}	X_{4_0}
Інтервал варіювання (ΔX_i)	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4
Верхній рівень ($x_i=1$)	$X_{1_0} + \Delta X_1$	$X_{2_0} + \Delta X_2$	$X_{3_0} + \Delta X_3$	$X_{4_0} + \Delta X_4$
Нижній рівень ($x_i=-1$)	$X_{1_0} - \Delta X_1$	$X_{2_0} - \Delta X_2$	$X_{3_0} - \Delta X_3$	$X_{4_0} - \Delta X_4$

Таблиця 2.2 - Розширена матриця плану

№ дослідю	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
9	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
12	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
14	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1

Кодовані значення факторів (x_i) пов'язані з натуральними значеннями (X_i) наступним співвідношенням (2.10). Матриця планування записується як табл. 2.4.

Для планів типу V_k коефіцієнти регресійного рівняння можна визначити за такими формулами:

$$b_0 = C_1 \sum_{u=1}^N y_u - C_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (2.11)$$

$$b_i = C_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (2.12)$$

$$b_{ij} = C_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (2.13)$$

$$b_{ii} = C_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - C_2 \sum_{u=1}^N y_u, \quad (2.14)$$

де $C_1 \dots C_6$ – допоміжні константи;

y_u – значення відгуку в u -му досліді;

x_{iu} – значення i -го фактора в u -му досліді [16].

Рівняння регресії визначається залежністю

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2,$$

Визначення напруженого стану. Оцінка вичерпання ресурсу пластичності.

У процесі холодного пластичного деформування, поряд з зміцненням металу, відбувається накопичення в ньому пошкоджень, що призводить до розущільнення матеріалу та зниження показників залишкової пластичності. Внаслідок цього спостерігається погіршення службових властивостей виробів, аж до руйнування заготовок у процесі пластичної обробки або виробів під час експлуатації. Тому забезпечення якості виробів при обробці методами обробки металів тиском неможливо без оцінки здатності металів деформуватися без руйнування, при мінімальному вичерпанні ресурсу пластичності.

Таблиця 2.3 - Рівні факторів

Фактори	X_1	X_2	X_3
Основний рівень (X_{i_0})	X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}
Інтервал варіювання (ΔX_i)	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3
Верхній рівень ($x_i=1$)	$X_{1_0} + \Delta X_1$	$X_{2_0} + \Delta X_2$	$X_{3_0} + \Delta X_3$
Нижній рівень ($x_i=-1$)	$X_{1_0} - \Delta X_1$	$X_{2_0} - \Delta X_2$	$X_{3_0} - \Delta X_3$

Таблиця 2.4 - Розширена матриця плану

№ дослідю	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
11	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
12	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
13	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Головним фактором, що впливає на пластичність металів в умовах холодного деформування є схема напруженого стану. Залежність пластичності

від параметрів, що характеризують схему напруженого стану називають діаграмою пластичності.

Найбільшого поширення набуло уявлення залежності пластичності від показника напруженого стану, запропоноване у роботі [17]:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u},$$

де σ_0 – гідростатичне (середнє) напруження;
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – компоненти тензора головних напружень;
 σ_u – інтенсивність напружень.

Показник η не враховує впливу третього інваріанту тензора напружень, тому діаграму пластичності в координатах " ε_u - η " не можна вважати єдиною всім можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформованості металів у різних технологічних процесах необхідно мати «єдину» діаграму пластичності, що описує їх пластичність при різних схемах напруженого стану. Випробування металів на пластичність у камері високого тиску різними методами показали різні результати, відповідні одним і тим же значенням показника напруженого стану. Зокрема [18] встановлено, що при розтягненні в умовах $\eta=0$ пластичність вища, ніж при крученні. Результат випробувань виходить різний, при цьому яка характеристика більша, залежить від марки металу [19]. При крученні, у разі створення в камері високого тиску умов з рівними значеннями показника напруженого стану, пластичність буде все ж таки нижчою, ніж при стисканні.

Для виключення можливих розбіжностей в оцінці деформованості металів необхідно, щоб у досліджуваному технологічному процесі та експериментах з побудови діаграм пластичності дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї-Лоде, що характеризує вигляд девіатора напружень

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах " ε_u - η - μ_σ ". Зазначена залежність запропонована в роботі [11], однак її побудова пов'язана з цілим рядом труднощів експериментального характеру.

Вибір та обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань механіки матеріалів розглянуто у роботі [12].

У роботі [10] запропоновано будувати поверхню пластичності в координатах " ε_u - η - χ ", де χ – показник, що враховує третій інваріант тензора напружень.

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_u}.$$

Поверхня пластичності, побудовану в координатах " ε_u - η - χ ", можна визначити як об'ємну діаграму пластичності. Переріз поверхні площиною, перпендикулярної до осі $\chi=0$, призводить до отримання діаграми пластичності в координатах $\varepsilon_u = \varepsilon_u(\eta)$. Для побудови діаграм пластичності за даною методикою необхідно проводити трудомісткі випробування у камері високого тиску. Це виключає можливість випробування пластичних матеріалів на стиск, а випробування на розтягування призводять до спотворення результатів унаслідок появи шийки.

Розроблено методику побудови поверхонь $\varepsilon_p(\eta, \mu_\sigma)$ (рис. 2.2) шляхом простих випробувань на розтягування, стиснення, чистий зсув і випробувань на осадку циліндричних зразків в оболонках різної товщини [13, 14].

При деформуванні, коли показник напруженого стану не залишається постійним, пластичність прийнято оцінювати на основі так званих критеріїв руйнування. Сутність критеріїв руйнування полягає у застосуванні моделі накопичення пошкодженості металу, що залежить від величини накопиченої деформації та напруженого стану.

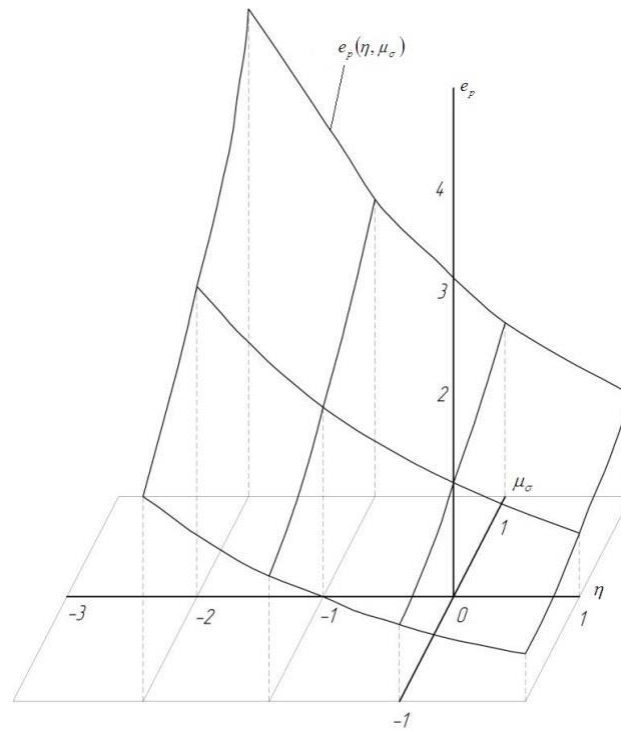


Рисунок 2.2 – Поверхня граничних деформацій

Ступінь пошкодження металу називають використаним ресурсом пластичності ψ . Величину ψ недеформованого металу приймають рівною нулю, а умова руйнування має вигляд $\psi=1$.

Використовуючи інформацію про напружено-деформований стан матеріалу та обґрунтовано застосувавши критерії руйнування, можна визначити величину використаного та залишкового ресурсів пластичності та прогнозувати якість виробів, вироблених методами локального деформування.

Результати розрахунків напружено-деформованого стану були використані для оцінки значень використаного ресурсу пластичності ψ , який визначали за формулою.

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)},$$

де $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій,

$$\mu_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{- параметр Надаї-Лоде,}$$

Головні напруження визначаються з вирішення характеристичного рівняння, яке у загальному випадку є кубічним.

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0,$$

де σ – шукане головне напруження;

I_1, I_2, I_3 – перший, другий та третій варіанти тензора напружень.

2.3 Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальна частина проведених досліджень ґрунтується на фізичному моделюванні процесів обробки металів тиском з використанням натурних експериментів та експериментально-аналітичного методу ділительних сіток

При виборі обладнання для експериментальних досліджень потрібно було враховувати необхідну для процесу холодного комбінованого видавлювання потужність обладнання, достатнього міжштампового простору, можливість регулювання швидкості руху деформуючого інструменту.

Експериментальні дослідження були проводяться в лабораторних умовах з використанням випробувальних машин МС-500 та МС-2000 із зусиллям 500 і 2000 кН відповідно.

Експериментальні дослідження були проводяться з метою отримання даних, що підтверджують адекватність обраних розрахункових схем та математичних моделей деформування, а також для отримання картини течії матеріалу з метою визначення зсувних деформацій, логарифмічних деформацій та інтенсивності деформацій по перерізу.

Методика натурних експериментів.

Експерименти були проведені на циліндричних зразках з матеріалів С1 та АД31.

Зміцнення матеріалу враховувалося за кривими істинних напружень, отриманих у результаті проведення випробувань на стиск циліндричних зразків [15 - 17].

Виготовлення свинцевих зразків для експериментів проводилося наступним чином. У спеціально виготовлене оснащення відливалися циліндричні свинцеві зразки. Після зразки зачищалися та калібрувалися тиском у спеціальному контейнері, при цьому забезпечувалася висока точність зовнішніх розмірів, висока якість поверхонь, паралельність торцевих поверхонь.

Підготовка алюмінієвих зразків проводилася в такий спосіб. Від прутка меншого діаметру, ніж необхідний, відрізалися заготовки, довжини яких було розраховано згідно із законом сталості обсягів. Потім заготовки піддавалися осадці та калібруванню, у спеціальному контейнері, до необхідних розмірів. Після чого проводився відпал алюмінієвих зразків для подальшої деформації.

Використання спеціального контейнера забезпечувало високу точність зовнішніх розмірів, висока якість поверхонь, паралельність торцевих поверхонь.

Відпал для розміцнення АД31, проводять при 350 - 430 ° С витримкою 1 год. За цих температур відбувається повний розпад пересиченого твердого розчину та коагуляція зміцнювальних фаз. Охолодження відбувається у повітрі. Після відпалу сплав має низькі значення тимчасового опору, задовільну пластичність та високу опірність корозії під напругою. Відпалений АД31 здатний витримати холодну обробку тиском з високими ступенями деформації. Графік режиму відпалу представлено на рис. 2.3.

Після термічної обробки для очищення поверхні застосовується механічний метод обробки - галтувальний барабан. Заготовки для очищення від окалини, забруднень, а також для видалення задирка, піддають галтуванню сировою тирсою, злегка змоченими бензином та абразивною крихтою. Галтування проводиться двічі із заміною тирси, тривалість галтування 7 ... 10 хвилин. Потім заготовки вивантажують а вібраційне сито і промивають

бензином. Далі здійснюється нанесення підмастильного шару. Схема технологічного процесу підготовки підмастильного шару на заготовках наведено у таблиці 2.5.

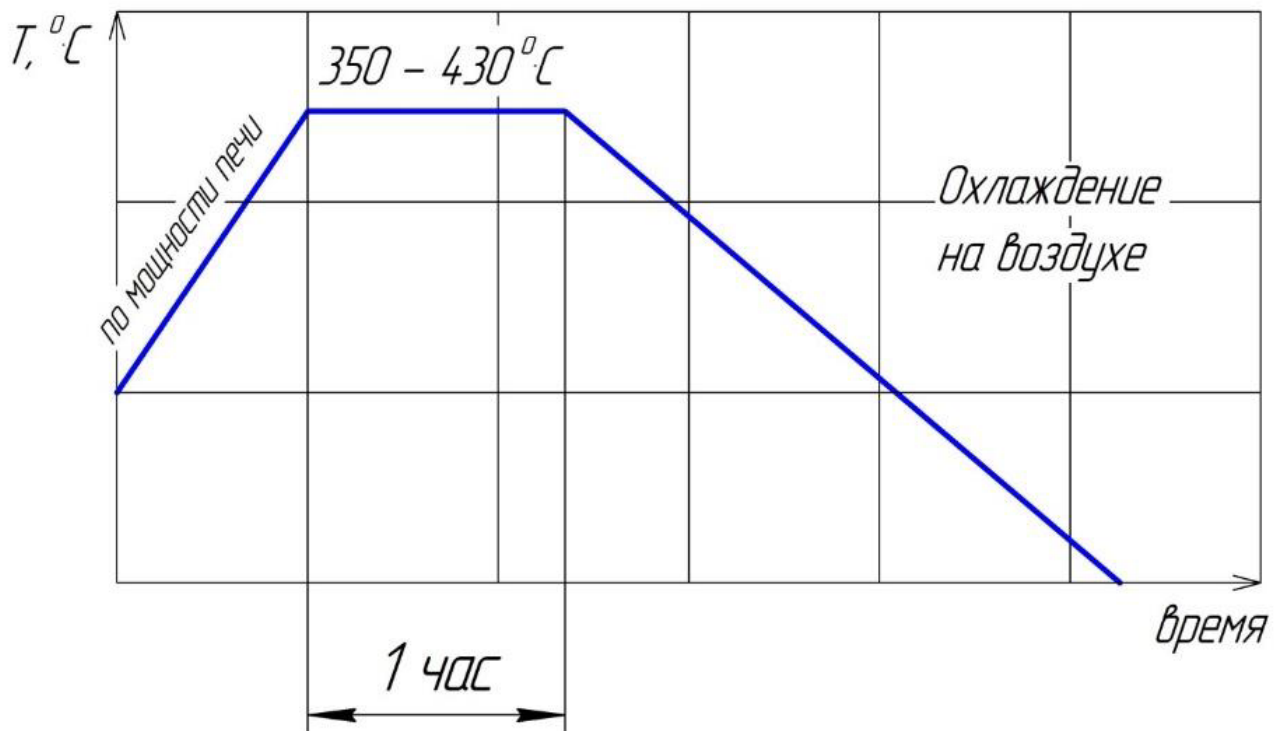


Рисунок 2.3 - Графік термічної обробки алюмінієвих зразків

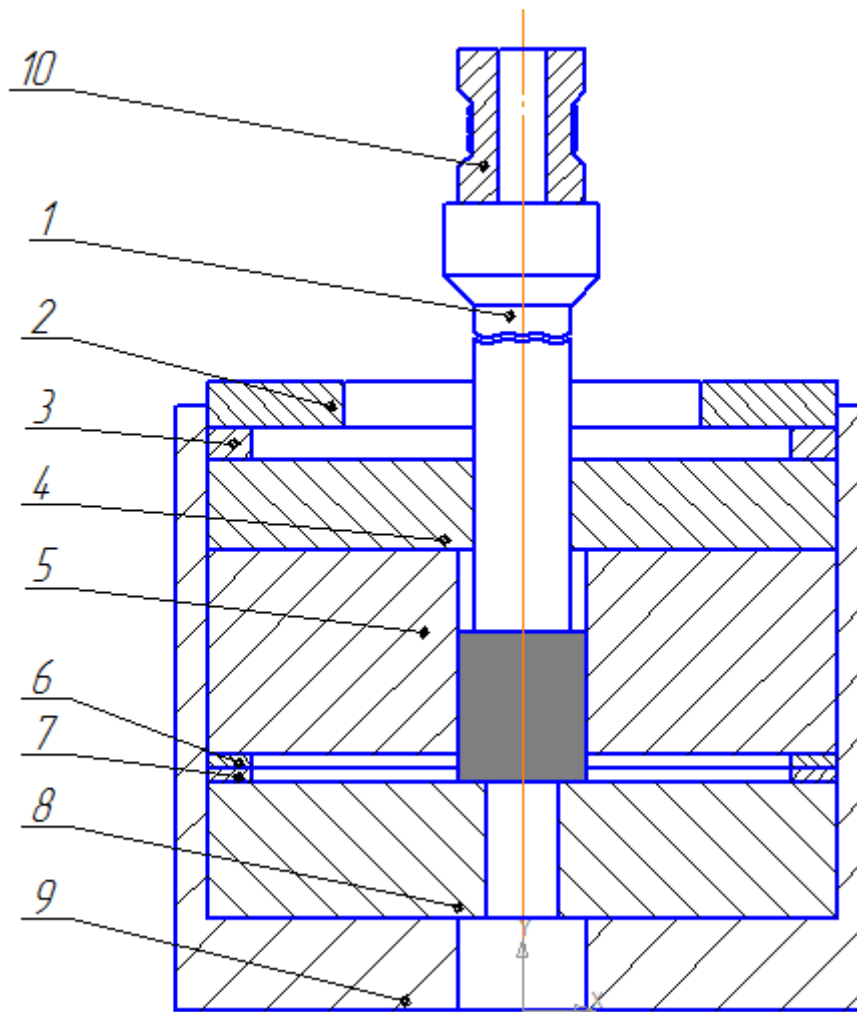
При холодному видавлюванні мастило повинно мати наступні властивостями: здатністю зменшувати сили молекулярного тяжіння між оброблюваним матеріалом та інструментом: високою пластичністю; високою термостійкістю.

В якості мастила для видавлювання застосовується технічний жир. Мастило наноситься на підготовлений підмастильний шар зануренням заготовок у ванну із мастилом. Остаточне видалення мастила здійснюється хімічним знежиренням та сушкою відштампованих деталей (табл. 2.5).

Реєстрація показань проводилася за шкалою зусиль випробувальній машині та за допомогою АЦП. Реєстрація ходу проводилась по лінійці преса та за допомогою хронографа.

Для проведення експериментів було розроблено конструкцію універсального штампу (рис. 2.4) для комбінованого тристороннього

видавлювання, а також був виготовлений набір оснастки, що складається з матриць, пуансонів, кільця, протипуансонів необхідних геометричних розмірів.



1 – пуансон,

2 – кришка, 3 – кільце, 4 – центруюче кільце, 5 – верхня матриця,
6,7 – півкільця, 8 – нижня матриця, 9 – контейнер, 10 – месдоза

Рисунок 2.4 - Схема універсального штампу

Для врахування зміцнення матеріалів АДЗ1 використовувалися криві істинних напружень, побудованих за результатами механічних випробувань на стиск циліндричних зразків (рис. 2.5).

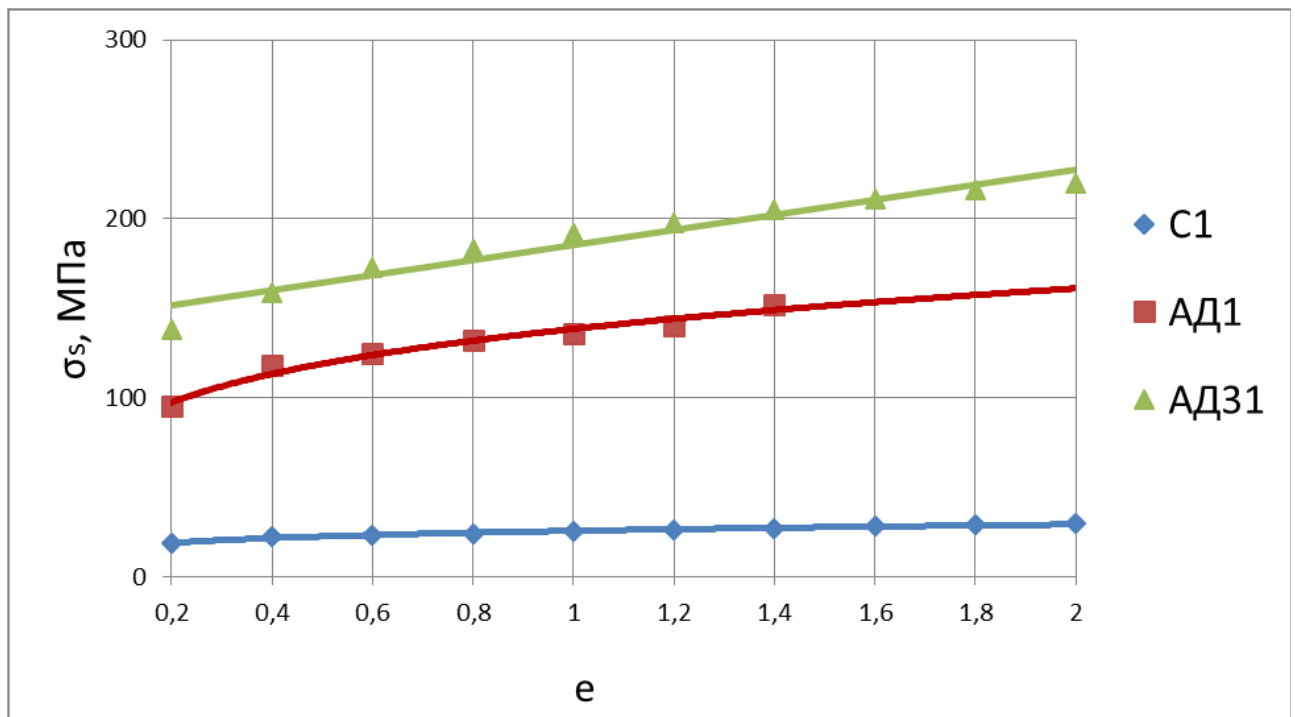


Рисунок 2.5 – Криві зміцнення для використовуваних матеріалів

Таблиця 2.5 - Схема підготовки підмастильного шару

Операція	Компоненти	Масова концентрація, г/л	Режим обробки	
			Температура, °С	Час обробки, хв
Обезжирення хімічне	Тринатрій фосфат Рідке скло	50-60 50-10	80-100	0,083-0,1
Промивання в гарячій проточній воді	Вода	-	80-100	0,2-0,3
Промивання в холодній проточній воді	Вода	-	-	0,2-0,3
Анодування	Сірчана кислота	180-200	20-25	15-25
Промивання в холодній проточній воді	Вода	-	-	0,2-0,3
Обробка в розчині хромпіка	Хромпик калієвий технічний	100-120	80-100	15-25

Промивання в холодній проточній воді	Вода	-	-	0,2-0,3
Промивання в гарячій проточній воді	Вода	-	60-100	0,2-0,3
Сушіння	-	-	80-120	15-25

Апроксимація кривих зміцнення, наведених на рис. 2.8 проводилася ступеневим рівнянням $\sigma_s = C e^n$. Значення опорів течії за певних ступенів деформації наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Значення опорів течії

e	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
АД1	95	118	125	132	136	140	152	162	169	177
АД31	138	159	173	183	192	198	205	211	216	220
С1	19	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Ступеневий вираз, отриманий для АД31: $\sigma_s = 191,51 \cdot e^{0,2029}$ МПа; для АД1: $\sigma_s = 138,42 \cdot e^{0,2182}$ МПа; для С1: $\sigma_s = 25,558 \cdot e^{0,1890}$ МПа.

Для дослідження силового режиму процесу видавлювання в якості датчиків зусилля використовувалися тензOMETричні месдозы. Месдозы (рис. 2.9) виготовлялися зі сталі Х12М з наступним загартуванням НРС 56...60, та наклейкою тензорезисторів та підключенням по мостові схемі. Месдозы тарувалися за шкалою випробувальної машини, показання якої попередньо були перевірені зразковим динамометром стискування. Для кожної месдозы будувався таріювальний графік взаємозв'язку між показаннями реєструючого приладу та зусиллям.

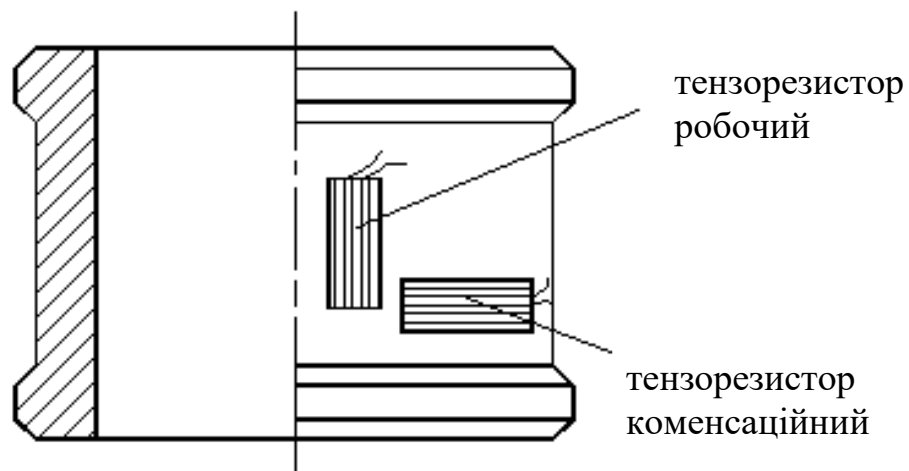


Рисунок 2.9 – Тензометричні мездози

Реєстрація переміщень проводилася за допомогою ходографа балкового типу (рис. 2.10).

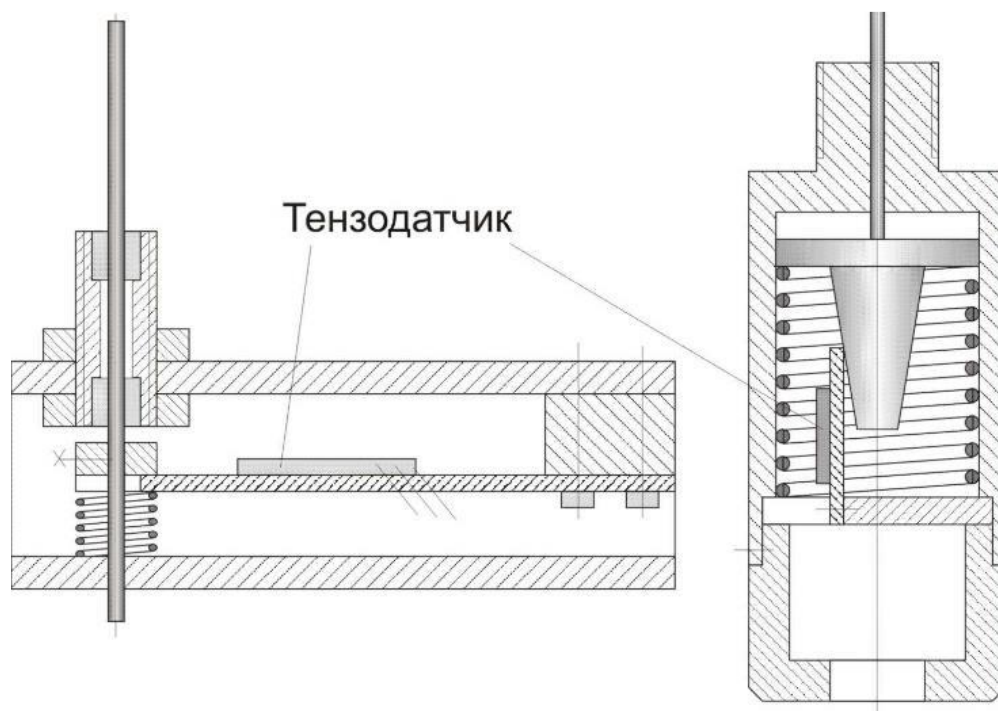


Рисунок 2.10 - Ходограф балкового типу та схема його пристрою

Для реєстрації показань датчиків використовувалися комплект тензометричної апаратури, до якого входили: 32-х канальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) L-Card E-440 та персональний комп'ютер з пакет програмного забезпечення L-Graph.

Живлення тензорезисторів проводилося від акумулятора напругою 6,5 В. Для виключення перешкод при реєстрації сигналу, що надходить від тезодатчиків, від прилеглих електроприладів проводилося заземлення АЦП та корпус персонального комп'ютера. Схеми підключення тензорезисторів до АЦП та тензоапаратури до персонального комп'ютера наведено на рис. 2.12.

У штампі використовуються змінні матриці із зовнішнім діаметром $D_m=110$ мм. Внутрішній діаметр матриць 28,2 та 15,7 мм. Застосовувалася пуансон та протипуансон $d=21,2$ мм, без радіуса закруглення. Усі матриці та пуансони виготовлені зі сталі Х12М із гартуванням в маслі та відпуском до HRC 56 ... 60, робоча поверхня шліфувалася до Ra 0,4.

Для оцінки точності результатів експериментальних досліджень (силових параметрів) використовувалися методи математичної статистики.

Було прийнято нормальний закон розподілу помилок.

Методика визначення напружено-деформованого стану.

Для визначення напружено-деформованого стану використаний метод координатних ділильних сіток [12, 16]. За вихідні та кінцеві напрямки головних осей приймаються напрямки, з якими у площині нанесення сітки збігаються матеріальні волокна, що отримали найбільшу та найменшу ступінь деформації. Робиться припущення, що напрями основних осей збігаються з напрямками тих самих матеріальних волокон тільки на даному етапі. Шлях деформування є ламаною лінією.

Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану проводився з використанням комп'ютеру.

Для розрахункової оцінки деформованості, заготовки з ділильною сіткою, накатаною на бічну поверхню, піддавали тристоронньому видавлюванню в штампі зі змінними вставками, що мають ті ж величини геометричних параметрів, що при дослідженні методом планування.

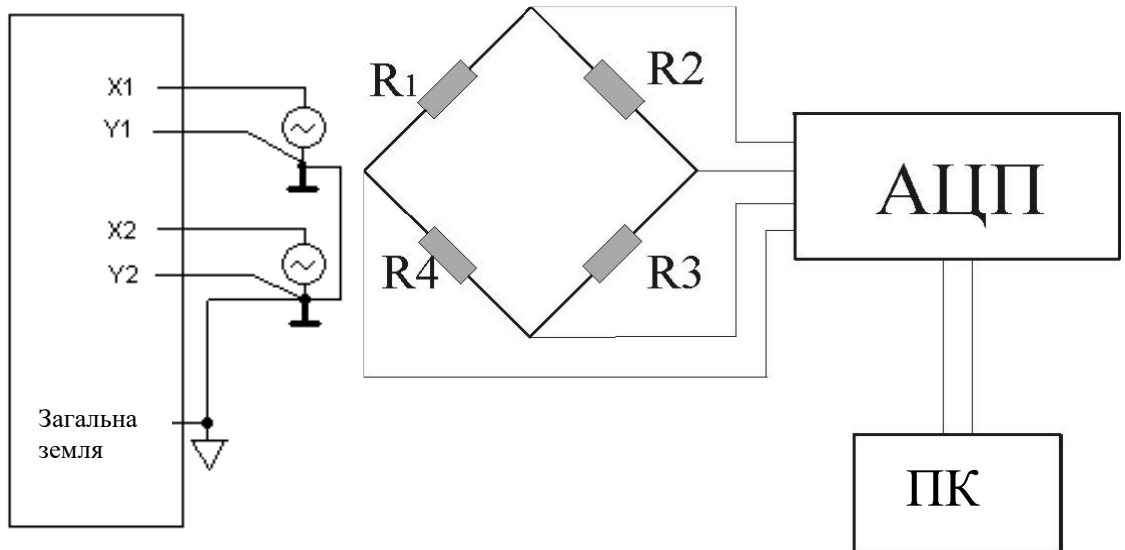


Рисунок 2.11 - Схеми підключення тензорезисторів до АЦП та тензометричної апаратури до персонального комп'ютера

3 ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ

Метою експериментальних досліджень є оцінка адекватності побудованих математичних моделей в результаті теоретичних досліджень, виведення експериментальних закономірностей щодо формозміни які не піддаються математичному рішенню. Визначення особливостей формозміни, аналіз силового режиму радіально-прямого видавлювання - це відомості, необхідні для прогнозування якості деталей, що виготовляються даним способом. Для проведення експериментів і для перевірки прийнятності отриманих розрахункових виразів було розроблено універсально-переналагоджуване оснащення, яке встановлюється на гідравлічні преси.

3.1 Дослідження напружено-деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем та відростком

Важливим елементом для визначення енергосилового режиму процесу деформування, оцінки деформованості та ступеня використання запасу пластичності матеріалу є визначення формозміни та аналіз напружено-деформованого стану при комбінованому видавлюванні. У ряді робіт відображено дослідження напружено деформованого стану для комбінованого двостороннього видавлювання. Однак, стосовно комбінованого тристороннього видавлюванню отримані раніше дані вимагають додаткового повне дослідження.

Для повного аналізу напружено-деформованого стану при тристоронньому видавлюванні можуть бути використані методи експериментального дослідження та математичного моделювання, і навіть їх комбінація. Експериментальні методики обчислення деформованого стану ґрунтуються на співвідношеннях теорії кінцевих деформацій. Зіставлення кінцевої форми та розмірів комірки ділильної сітки з її вихідною формою та

вихідними розмірами дозволяють оцінити деформований стан заготовлі після деформації. В процесі розрахунку приймаються припущення про монотонне перебіг процесу формозміни матеріальної точки, як умова зв'язку між напруженим та деформованим станами.

Експериментальні дослідження дозволяють проводити аналіз кінцевої та граничної формозміни на основі визначення напружено-деформованого стану, перевірку розрахункових залежностей, виведених в результаті теоретичного аналізу, та розробку емпіричних моделей процесу радіального видавлювання, що відображають геометричні параметри процесу та механічні властивості матеріалів, що деформуються.

Важливі відомості, необхідні для прогнозування якості штампувань, оцінки деформованості та ступеня використання запасу пластичності матеріалу, а також для розрахунків енергосилового режиму процесів деформування дозволяє отримати оцінку особливостей формозміни та аналіз напружено-деформованого стану видавлюваного зразка [18].

Дослідження деформованого стану проведено за допомогою методу координатних сіток. Для експериментального аналізу були використані зразки діаметрами 28,2 мм, 36 мм та 45 мм, які виготовлялися з матеріалів: свинцевого сплаву С1 + 2%Sb, алюмінієвих сплавів АД1 та АД31 при $H_3=D_3$, $D_{II}=21,2; 28,2; 36,2$ мм, $H_{\Phi}=3; 5; 7$ мм, $D_0=14; 21; 28$ мм.

Як мастило для алюмінієвого сплаву використовувався баранячий жир, для свинцю мінеральна олія І-20А.

Для дослідження напружено-деформованого стану використовувалися збірні заготовки зі свинцю С1 (з нанесеною сіткою з кроком 2,1 мм) та матеріалу АД1 та АД31 (з нанесеною сіткою з кроком 1 мм).

Виходячи з картини деформування координатної сітки (рис. 3.1, 3.2), можна зробити припущення про наявність проміжної жорсткої зони, матеріал у якій мало деформується. Витікання металу в зазор між пуансоном і верхньою матрицею та в зону фланця та відростка здійснюється з двох осередків деформації, розділених зоною (що підтверджує прийняті припущення при

теоретичному розрахунку енергетичним методом балансу потужностей). Характерною особливістю даного процесу є те, що висоти даних вогнищ деформації практично не змінюються протягом процесу, що досягається за рахунок витрати металу проміжної жорсткої зони. При подальшому деформуванні настає момент повного виродження проміжної зони та об'єднання верхнього та нижнього вогнищ деформації. Таке явище добре можна простежити на картині деформування, показаній на рис. 3.3. Виродження зони призводить до появи великих зсувних деформацій, які проходять між кромками верхньої та нижньої матриці.

Аналіз картини спотворення ділильної сітки дозволив чітко визначити розташування та форму вогнищ деформації: один з яких розташований між пуансоном і верхньою матрицею у стінці, що формується, склянки та другої, якою формується при радіально-прямому витоку матеріалу. Елементи сітки, що примикають до стінки матриці, зазнають стиск у радіальному напрямі, тобто, витягуються нагору. Спотворення сітки у проміжній зоні практично не відбувається (по ходу процесу висота даної зони зменшується).

Моделювання отримане в результаті кінцевоелементного аналізу та експерименту дав якісний збіг деформованого стану.

Після сканування деформованої сітки та обробки зображення, були визначені координати вузлів сіток. Виконувались обчислення значень головних компонент деформацій у площині меридіонального перерізу ϵ_z та ϵ_r , тангенціальної компоненти деформації ϵ_θ , зсувної деформації γ_{rz} , інтенсивності логарифмічної деформації ϵ_i . Обчислення компонентів деформацій проводилося в пакеті EXCEL, а обробка отриманих даних проводилася в пакеті MathCAD. Отримані результати дозволяють зробити розрахунки збільшення компонент деформації та отримати кількісну оцінку поетапної зміни деформованого стану на кожному з етапів (рис. 3.4). Дані про картину розподілу деформацій підтверджують факт наявності проміжної жорсткої зони та роз'єданого осередку деформації у ході даного процесу деформування.

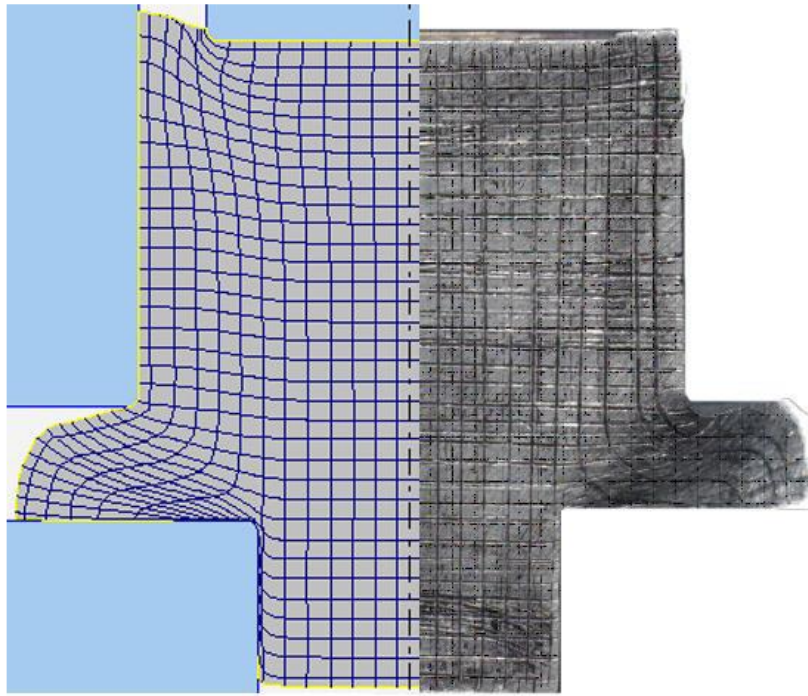
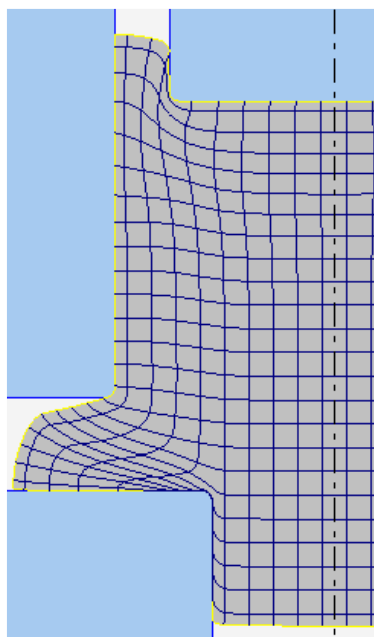
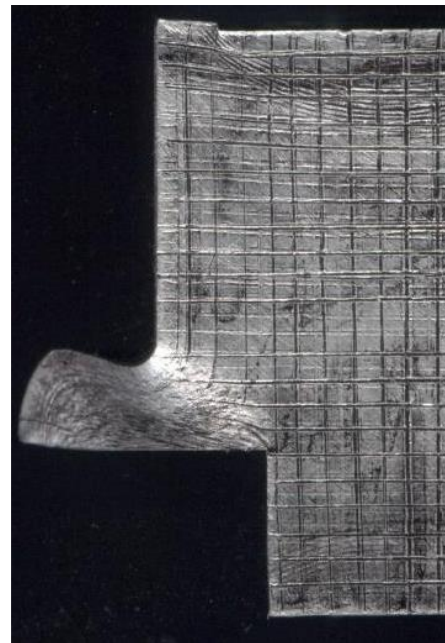


Рисунок 3.1 – Порівняння координатних сіток (крок сітки 1 мм), отриманих у пакеті QForm та в ході експерименту (матеріал АД1)



а)



б)

Рисунок 3.2 – Порівняння координатних сіток (крок сітки 1 мм) отриманих у пакеті Q-Form (а) та в ході експерименту (б) (матеріал АД31)

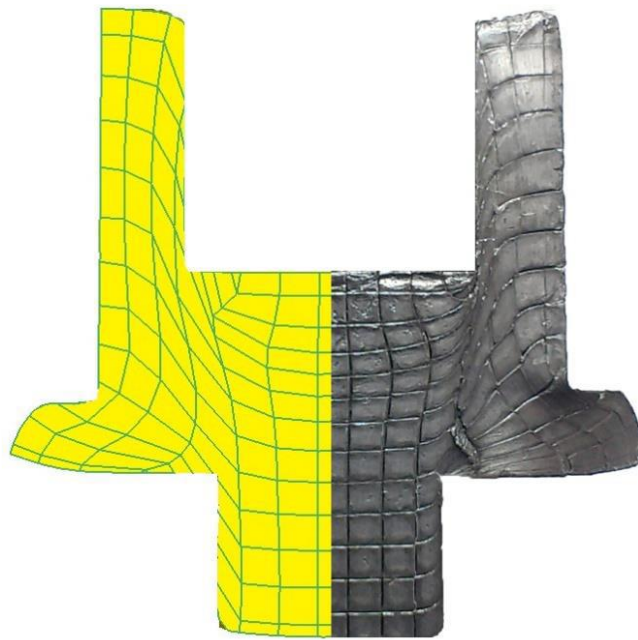


Рисунок 3.3 – Порівняння координатних сіток для свинцю С1 (крок сітки 2,1 мм)

За розподілом логарифмічних деформацій за об'ємом деформуємої заготовки деталі видно, що осередки деформації знаходяться у кромках нижньої матриці та пуансону. Ці два осередки деформації утворюють зону, де відбувається поділ течії матеріалу в зону відростка та в зону фланця. Найбільші значення деформації знаходяться на кромці матриці там інтенсивність деформацій сягає 4,5 одиниці.

При вивченні розподілу логарифмічних деформацій видно, що максимальний ступінь деформації зосереджується на лінії між кромками пуансону та матриці заготовки. Також можна помітити, що існують невеликі застійні зони, які зосереджені по зовнішній поверхні стакану, на внутрішній поверхні торця і по зовнішній поверхні фланця.

На рис. 3.5 показано порівняння результатів розрахунку. При порівнянні експериментальних та теоретичних результатів щодо розподілу логарифмічних деформацій у заготовці видно, що загальний характер розподілу деформацій по заготовці та форма осередку деформацій збігаються.

Експериментальна оцінка ресурсу вичерпання пластичності показала, що найбільш небезпечною зоною є зовнішня поверхня фланця. Зіставлення значень

використаного ресурсу пластичності в відповідній точці на зовнішній поверхні фланця при видавлюванні показує, що метод кінцевих елементів дає на 6,8% занижену оцінку.

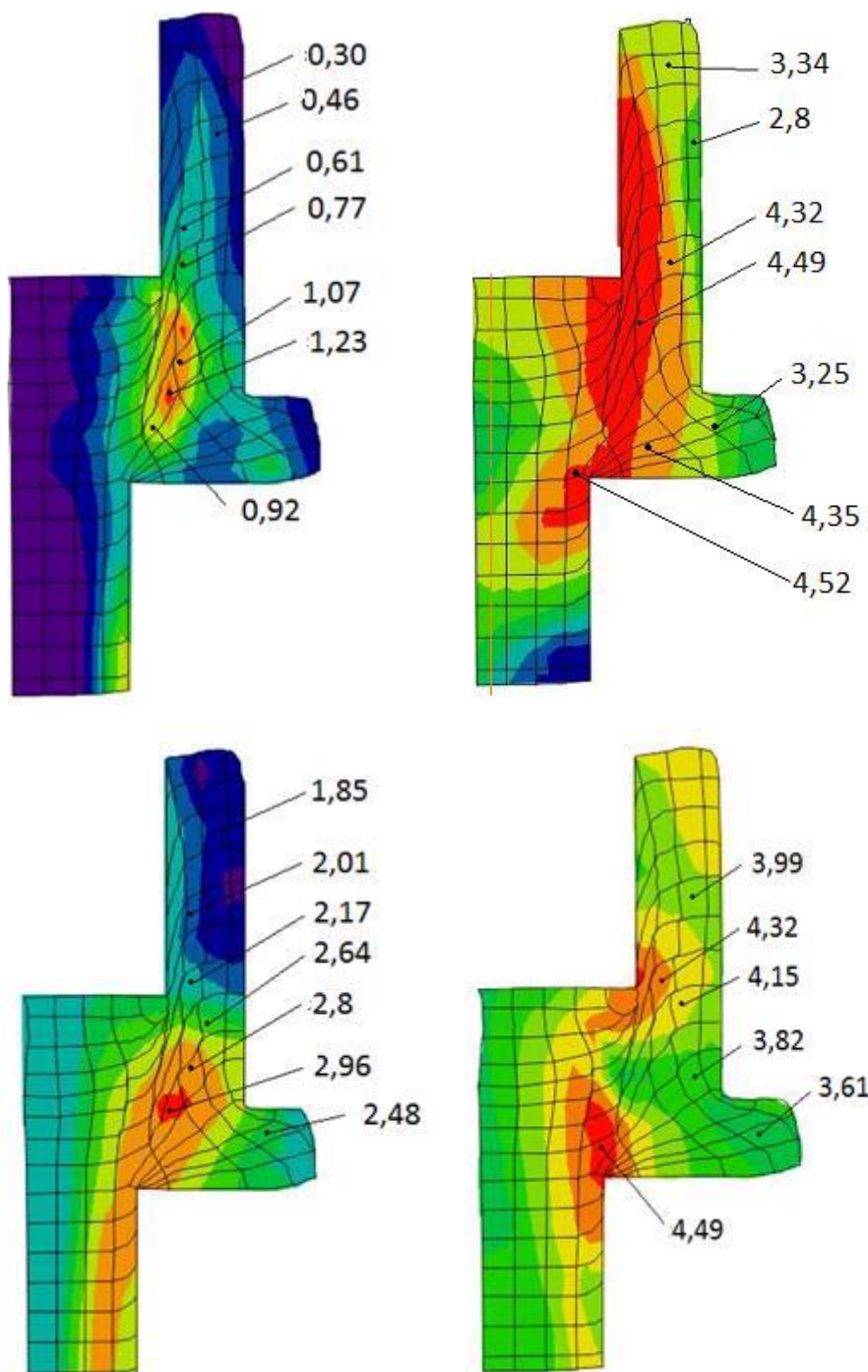


Рисунок 3.4 – Поля розподілу компонентів деформацій, МПа при комбінованому тристоронньому видавлюванні ($d_n=0,62$; $d_o=0,47$; $h=0,16$; хід $s=0,55$)

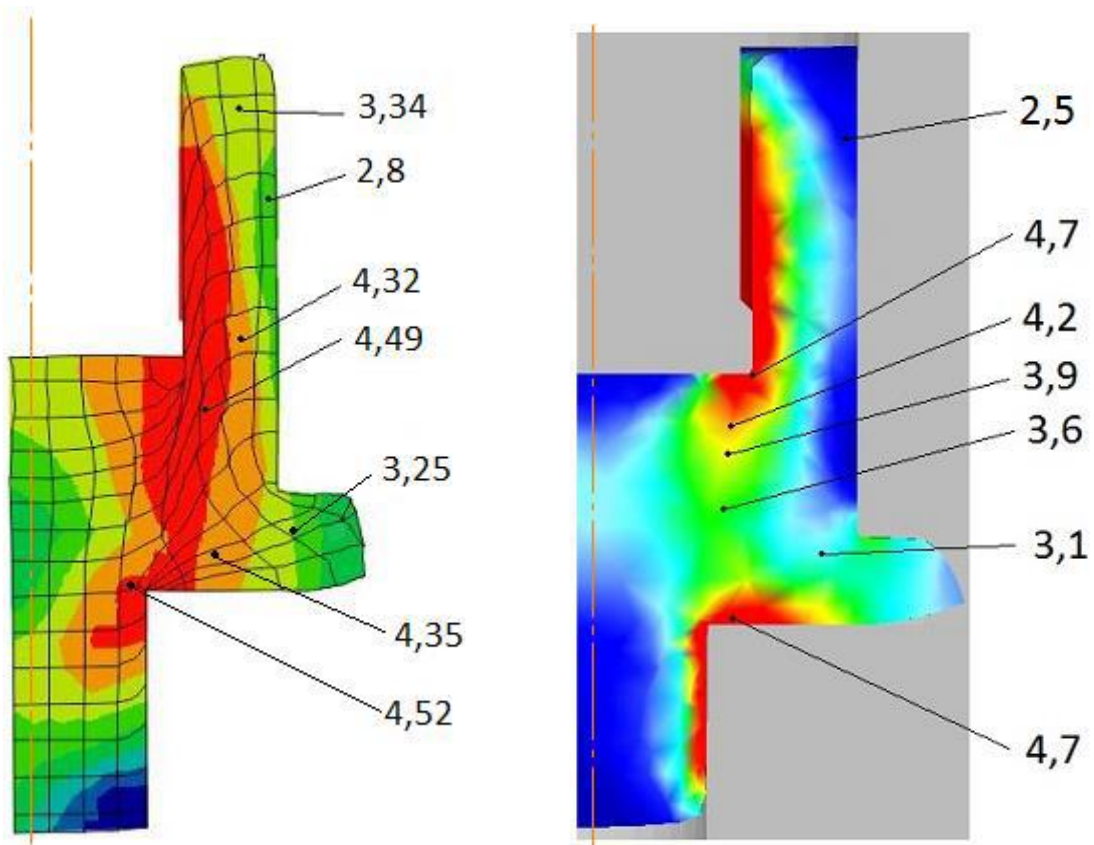


Рисунок 3.5 – Поля розподілу інтенсивності деформацій методом ділильних сіток (а) і методом кінцевих елементів (б) ($d_n=0,62$; $d_o=0,47$; $h=0,16$; хід $s=0,55$)

При обмеженні течії в зону фланця фланець з розвитком процесу перетворюється на застійну зону, що призводило до утворення тріщин по межі осередку деформації з'єднує перехідні кромки верхньої та нижньої напівматриці. Іншою небезпечною зоною є зона вздовж границі, що розділяє осередки деформації радіального та прямого витoku.

За результатами дослідження напружено-деформованого стану у процесах комбінованого тристороннього видавлювання для досить високих заготовок виділяються три характерні стадії процесу:

- 1) початкова (стаціонарна) стадія процесу – з роз'єднаним осередком деформації;
- 2) проміжна (нестационарна) стадія – з приєднаним осередком деформації;
- 3) кінцева стадія процесу.

Як зазначалося раніше, для роз'єданого вогнища деформації характерно, що висоти верхнього та нижнього вогнищ деформації практично не змінюються

протягом процесу, що досягається рахунок витрачання металу проміжної жорсткої зони. При подальшому деформуванні у момент повного виродження проміжної зони та приєднання верхнього та нижнього осередку деформації настає друга (проміжна) стадія процесу.

Протягом цієї стадії процесу потоки металу зароджуються в єдиному осередку деформації, переважний поділ на радіально-пряму і зворотну течію відбувається в залежності від висоти фланця та товщина стінки склянки. При заключній стадії процесу, при досягненні положення пуансона, що відповідає висоті фланця, відбувається різке збільшення сили видавлювання за рахунок переважного протікання процесу за схемою «осадка + видавлювання». На цій стадії утворюється затягування металу в зону фланця та відростка з утворенням дефектів у вигляді утяжин і прострілів.

Аналіз експериментальних даних дозволив зробити висновки, які враховувалися під час теоретичних досліджень процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем та відростком:

- розміри осередків деформації, роз'єднаних проміжною жорсткою зоною, на початковій стадії процесу залишаються практично незмінними до повного їх змикання і залежать тільки від геометричних параметрів процесу;

- найбільш інтенсивної деформації піддається ділянка, знаходиться безпосередньо під пуансоном і захоплюючий зазор між ним і верхньою матрицею, а також ділянка, яка утворюється течією матеріалу у фланець та відросток;

- елементи сітки, що примикають до стінки верхньої матриці, зазнають стиску в радіальному напрямку, також спостерігається поява компонентів зсувної деформації між кромками робочих інструментів;

- найбільші позитивні значення зсувних деформацій спостерігаються у фланцевій зоні (на зовнішній поверхні).

При цьому слід зазначити низку факторів, що впливають на картину течії металу у процесі деформування. До конструкційних керуючих факторів, що визначає форму виробу, що отримується, можна віднести наявність фасок на

інструменті. Технологічним фактором, що впливає (незначне, але важливе) на величину кінематичних параметрів процесу (швидкості закінчення металу в вертикальному та радіальному напрямках), можуть служити умови тертя на поверхні інструменту.

Наведений вище аналіз експериментальних досліджень дозволив підтвердити картини поетапної формозміни [17, 24, 26], співвідношення швидкостей витоку металу, напрямок переважного течії, спрогнозовані на основі представлених раніше математичних моделей. Зазначимо, що розроблені розрахункові схеми процесу комбінованого видавлювання деталей із фланцем дозволяють аналізувати початкову та проміжну стадії процесу деформування з наявністю роз'єданого чи об'єданого осередків деформації.

3.2 Дослідження силового режиму комбінованого тристороннього видавлювання

До одних із найважливіших показників, що характеризують процес холодного об'ємного штампування, і зокрема, процеси комбінованого тристороннього видавлювання, відносять силу видавлювання. Саме цей показник є визначальним при конструюванні деформуючого інструменту та виборі обладнання, на якому здійснюватиметься процес видавлювання.

Для перевірки прийнятності отриманих розрахункових виразів було здійснено комбіноване радіально-зворотне-пряме видавлювання дослідної партії деталей (табл. 4.1).

За результатами експериментів побудовано графіки, що відображають вплив геометричних параметрів видавлювання на зусилля процесу різних досліджуваних матеріалів (рис. 3.6-3.8).

Експериментальні дослідження впливу діаметра відростка показали, що із збільшенням діаметра відростка від 14,2 мм до 21,2 мм, зусилля видавлювання зменшилося в середньому на 5%. При зміні висоти фланця із 3 мм до 7 мм енергосилові параметри зменшилися на 13%. Збільшення діаметра пуансона з

21,2 мм до 36 мм (відповідно зменшення товщини) стінки стакану) призвело до збільшення сили видавлювання на 17%.

Таблиця 4.1 - Зіставлення результатів експериментального та теоретичного аналізу сил комбінованого видавлювання

Матеріал	$H_3=D_3$, мм	D_0 , мм	h , мм	D_n , мм	Ход, мм	$P_{\text{експ}}$ кН	\bar{P} теор.	σ_s , МПа	$P_{\text{теор}}$, МПа	$P_{\text{теор}}$, кН
АД1	45	21,2	7	28,2	5	250	2,65	171,2	454	283
					10	295	2,93	175,4	519	324
					15	324	2,97	176,6	538	336
					20	317	3,11	177,3	551	344
					25	328	3,15	178,3	569	355
АД1	45	14,2	7	28,2	5	264	2,31	166,2	384	240
					10	297	3,08	176,9	545	340
					15	340	3,52	182,2	641	400
					20	325	3,82	185,4	708	442
					25	328	4,02	187,5	754	471
С1	45	14,2	3	36	5	17	2,99	31,4	94	96
					10	20	3,73	32,8	122	124
					15	23	4,29	33,7	144	147
					20	19,5	4,87	34,5	168	171
					25	16	5,19	34,9	181	184
С1	45	14,2	7	36	5	15	2,16	29,6	64	65
					10	17	2,91	31,3	91	93
					15	20	3,38	32,2	109	111
					20	19	4,18	33,5	140	142
					25	16	4,5	34,0	153	155
АД31	45	21,2	5	21,2	5	287	3,88	252,2	978	345
					10	335	4,08	254,7	1039	367
					15	374	4,33	257,8	1116	394
					20	355	4,61	261,1	1204	425
					25	370	4,74	262,6	1245	439
АД31	45	21,2	5	36	5	490	2,43	229,3	557	567
					10	687	3,05	240,1	732	745
					15	800	3,64	248,9	906	922
					20	924	4,20	256,2	1076	1095
					25	1024	4,5	259,9	1169	1190

Було проведено порівняння результатів, отриманих у ході експерименту з даними теоретичних розрахунків для схем комбінованого тристороннього видавлювання.

На рис. 3.9, 3.10 показані порівняльні графіки залежності зусилля деформування для деталі з матеріалу АД1 та С1.

При порівнянні даних отриманих енергетичним методом та експериментальними дослідженнями було встановлено, що теоретичні розрахунки дають результати на 20% вище за експериментальні. Метод кінцевих елементів показав результати на 12% нижче за експерименти. Це пояснюється неможливістю створення ідеальних умов видавлювання (тертя, ідентичний матеріал) під час експерименту. Розподіл ступеня деформації, отриманої методом ділильних сіток на 11% вище даних отриманих математичним моделюванням.

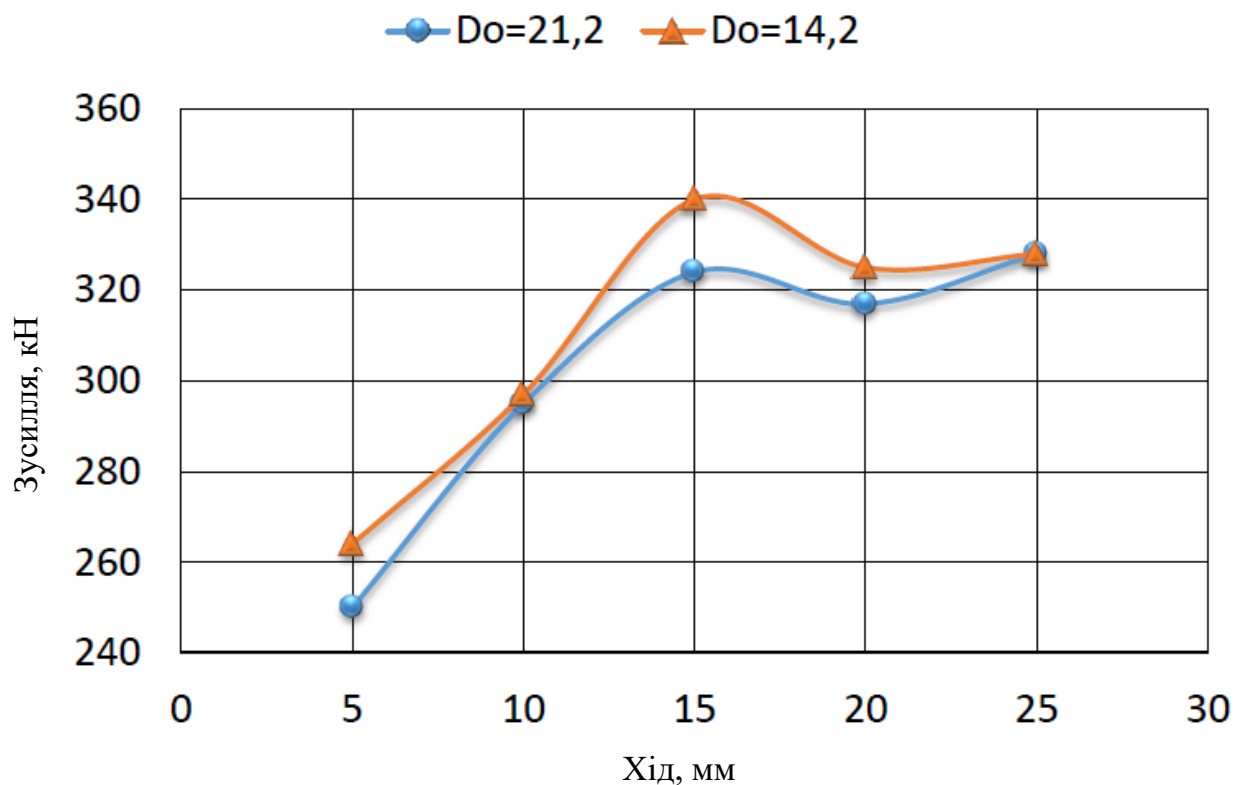


Рисунок 3.6 – Зусилля деформування для матеріалу АД1 за різних значення відростка

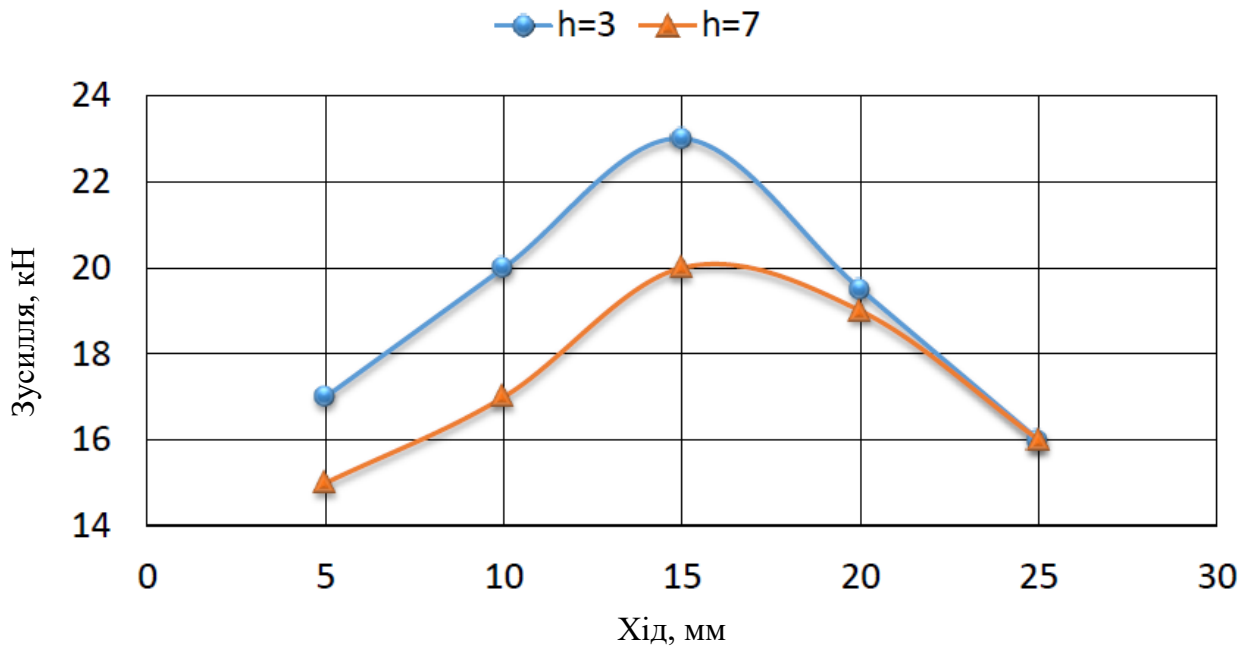


Рисунок 3.7 – Зусилля деформування для матеріалу С1 за різних значення висоти фланця

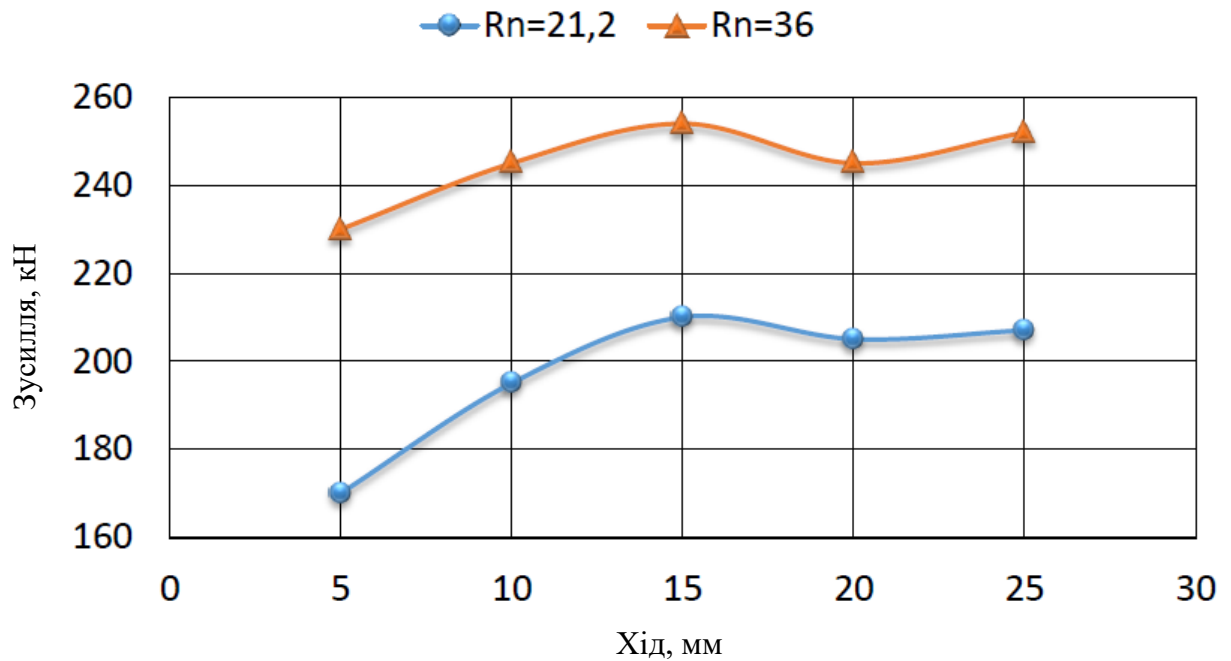


Рисунок 3.8 – Зусилля деформування для матеріалу АД31 за різних значення діаметра пуансона

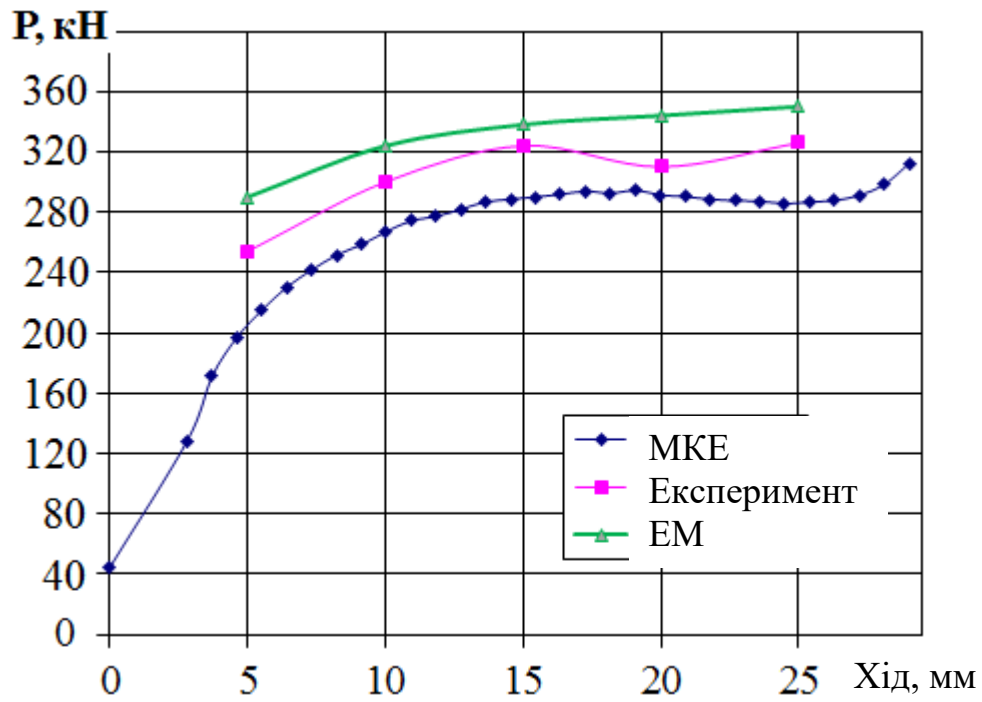


Рисунок 3.9 – Залежність зусилля від ходу пуансону для деталі з фланцем та відростком для алюмінієвого сплаву АД1

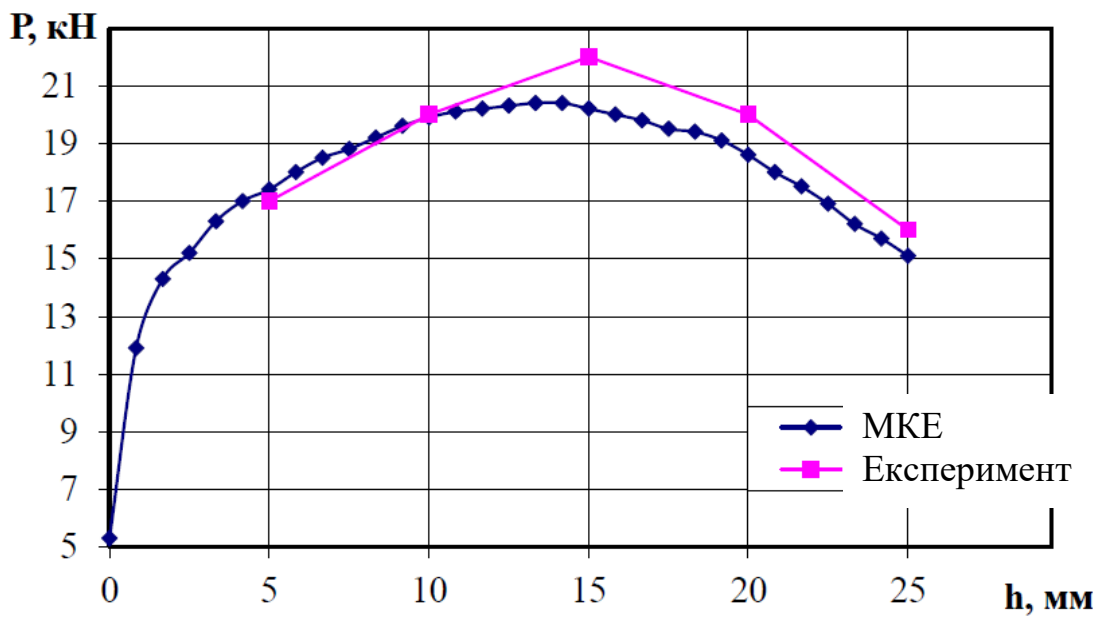


Рисунок 3.10 – Залежність зусилля від ходу пуансону для деталі фланцем для алюмінієвого сплаву С1

3.3 Моделювання формозміни у процесах комбінованого тристороннього видавлювання

Важливим показником правомірності використання отриманих математичних моделей комбінованого тристороннього видавлювання є формозміна. Через деякі припущення про характер течії металу в межах кожного з модулів, що утворюють розрахункову схему, можливе значне відхилення прирощень розмірів напівфабрикату поряд із отриманням прийнятних значень величини сили видавлювання. Тому для дослідження можливості використання кожної з розрахункових схем для якісного прогнозування поетапного формоутворення заготовлі в процесі комбінованого деформування та отримання відповідних рекомендацій, було проведено порівняльний аналіз на основі експериментальних даних та моделювання методом кінцевих елементів (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Зміни геометрії напівфабрикату із С1 отримані на основі експерименту та методом кінцевих елементів

Для експерименту було обрано заготовку з діаметром і висотою 45 мм, діаметром отвору 21,2 мм, висотою фланця 5 мм та діаметром пуансона 28,2 мм. Хід процесу дорівнює 25 мм.

Зіставлення отриманих даних показало, що формоутворення при експерименті, трохи відрізняється від методу кінцевих елементів. Це пов'язано з тертям на контактних поверхнях, складністю центрування пуансону та забезпечення паралельності торцевих поверхонь у контейнері.

Проведено порівняльний експеримент, у якому діаметр відростка приймався 14,2 мм та 21,2 мм при інших рівних параметрах.

За результатами експерименту можна зробити висновок, що за зменшенні діаметра відростка, висота відростка зменшується, при цьому також, але незначно, зменшується діаметр фланця, а ось висота стакану збільшується. Цей експеримент підтверджує математичні дослідження.

Під час проведення експерименту комбінованого видавлювання спостерігалися такі дефекти як розрив фланця, тріщини на фланці, підйом фланця від поверхні нижньої опорної поверхні («сідлоутворення»), відхилення від круглості фланця, овальність зовнішньої вертикальної поверхні фланця, овальність відростка та задирки.

Величина відхилення від форми одержуваних холодним видавлюванням фланців залежить від безлічі технологічних параметрів процесу деформування таких як: конфігурація деталі, геометрія інструменту, тертя на контактних поверхнях.

При низькій жорсткості інструменту можливе локальне розширення заготовок. Також може виникнути тріщини та розриви на фланці через дефекти на інструменті або при неметалевих домішках у матеріалі заготовки. Поява тріщин пояснюється наявністю розтягуючих окружних напружень у фланці, а також великим ступенем деформації. Овальність фланця та відростка пояснюється наявністю тертя поверхнях.

Основною причиною утворення задирок і складок є погане підганяння інструменту, ковзання напівматриць. На певному етапі видавлювання, коли пуансон досягає рівня фланця, спостерігається інтенсивна течія матеріалу у радіальному напрямку, що призводить до появи такого дефекту як простріли.

4 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВАННЯ ДЕТАЛІВ З ФЛАНЦЕМ

4.1 Моделювання силового режиму комбінованого процесу тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними блоками

Потужність активних сил деформування для осередку деформації сформованого зворотним видавлюванням:

$$N_a = p_1 \cdot \left[V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \right]$$

Потужність сил деформування за зонами

$$N_{\partial 2} = \int_{h+h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \frac{V_0}{h_2} \cdot r \cdot d\theta dz dr = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2;$$

$$N_{\partial 3} = \int_{h_1}^{h+h_1+h_2} \int_{R_n}^{R_M} \int_0^{2\pi} \left(\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot h_1 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2} \right) \cdot \sigma_s \cdot r \cdot d\theta dz dr =$$

$$= \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left(-\frac{h+h_2}{2 \cdot h_2} - \frac{R_M^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \frac{h+h_2}{h_2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_n} \right| \right).$$

Потужність сил різку по зонах

$$N_{c2-3} = \int_{h+h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0 \cdot h_1}{h_2} - \frac{V_0}{h_2} \cdot z \right) \cdot r \cdot dz d\theta =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \times \left(\frac{h_1}{R_n} - \frac{(h_1+h_2)^2 - h_1^2}{2 \cdot h_2 \cdot R_n} \right);$$

$$N_{c2-5} = \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \frac{V_0 \cdot r}{2 \cdot h_2} \cdot r \cdot dr d\theta = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{R_n}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot h_2};$$

$$N_{c3-4} = N_{c3-5} = 2 \cdot \int_{R_n}^{R_M} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \left(\frac{R_M^2}{r} - r \right) \right) \cdot r \cdot d\theta dr =$$

$$= \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(R_M^3 - R_n^3)}{3 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{R_M^2 \cdot (R_M - R_n)}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right).$$

Потужність сил тертя по границям

$$N_{m3-0} = \int_{h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0}{h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot (z - h_1 + h) \right) \cdot r \cdot d\theta dz =$$

$$= \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left[\frac{h_1 \cdot R_M}{(R_M^2 - R_n^2)} - \frac{R_M \cdot [(h_1 + h_2)^2 - h_1^2]}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right];$$

$$N_{m1-4} = \int_{h+h_1+h_2}^{h+h_1+h_2+h_3} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_1 \cdot r \cdot d\theta dz = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left(\frac{R_n \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} \right);$$

$$N_{m1-2} = \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s;$$

$$N_{m4-0} = \int_{h+h_1+h_2}^{h+h_1+h_2+h_3} \int_0^{2\pi} \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_1 \cdot r \cdot d\theta dz = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left(\frac{R_M \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} \right).$$

Потужність активних сил деформування для осередку деформації сформованого радіально-прямим видавлюванням:

$$N_a = p_2 \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2.$$

Потужність сил деформування по границям

$$N_{\partial 6} = \int_0^h \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} - \frac{W_0}{h} \right) \cdot r \cdot d\theta dz dr = \frac{R_K^2 - R_0^2}{R_M^2} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2;$$

$$N_{\partial 7} = \int_0^h \int_{R_0}^{R_K} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2} \right) \cdot r \cdot d\theta dr dz =$$

$$= \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_K}{R_0} \right| \right) \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2;$$

$$N_{\partial 8} = \int_0^h \int_{R_x}^{R_M} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2} \right) \cdot r \cdot d\theta dr dz =$$

$$= \left(\frac{(R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_K} \right| \right) \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2;$$

$$\begin{aligned}
 N_{\partial 9} &= \int_0^h \int_{R_M}^{R_1} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2} \cdot r \cdot d\theta dz dr = \\
 &= \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2}.
 \end{aligned}$$

Потужність сил зрізу по границям

$$\begin{aligned}
 N_{c5-6} = N_{c6-10} &= 2 \cdot \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h} \cdot r \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \times \left(\frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{c5-8} &= \int_{R_K}^{R_x} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r} \cdot r \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \times \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_M - R_K)}{R_M^2 \cdot h} \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{c6-7} &= \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} \cdot z - \frac{W_0}{h} \cdot z - W_0 \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \\
 &= \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{2 \cdot R_M^2} \right);
 \end{aligned}$$

$$N_{c7-8} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0}{h} \cdot z \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{R_K \cdot h}{R_M^2} \right);$$

$$N_{c8-9} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0}{h} \cdot z \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{h}{R_M} \right).$$

Потужність сил тертя по границям

$$N_{m10-0} = \int_{-h_4}^0 \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_2 \cdot r \cdot d\theta dr = \sigma_s \cdot \lambda \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0};$$

$$\begin{aligned}
 N_{m7-0} &= \int_{R_0}^{R_x} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{(R_K^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_K - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{m8-0} &= \int_{R_K}^{R_M} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_K)}{h} \right); \\
N_{m9-0} &= \int_{R_M}^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} \right).
\end{aligned}$$

Рівняння балансу для верхнього осередку деформації після скорочення на $(\sigma_s \cdot v_0 \cdot \pi \cdot R_n^2)$ мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\bar{p}_1 &= 1 + \left(-\frac{h+h_2}{2 \cdot h_2} - \frac{R_M^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \frac{h+h_2}{h_2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_n} \right| \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{h_1}{R_n} - \frac{(h_1+h_2)^2 - h_1^2}{2 \cdot h_2 \cdot R_n} \right) + \\
&+ \frac{R_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(R_M^3 - R_n^3)}{3 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{R_M^2 \cdot (R_M - R_n)}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right) + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_n \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_M \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[\frac{h_1 \cdot R_M}{(R_M^2 - R_n^2)} - \frac{R_M \cdot [(h_1+h_2)^2 - h_1^2]}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right].
\end{aligned}$$

Рівняння балансу для нижнього осередку деформації після скорочення на $(\sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2)$ мають вигляд

$$\begin{aligned}
\bar{p}_2 &= \left(\frac{(R_K^2 - 2 \cdot R_0^2)}{R_M^2} \right) + \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_K}{R_0} \right| \right) + \left(\frac{(R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_K} \right| \right) + \\
&+ \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_M - R_K)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
&+ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{R_K \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0^2 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{h}{\sqrt{3} \cdot R_M} + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_K^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_K - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
&+ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_K)}{h} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} \right).
\end{aligned}$$

При комбінованій течії поряд із балансом потужностей повинна виконуватися умова рівноваги потужностей, що діють з двох сторін від площини, що поділяє два самостійні осередки деформації λ визначається як:

$$\lambda = \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_1 + G + \bar{p}_2}.$$

У комбінованому процесі у напрямку від жорсткої проміжної зони у бік зворотного закінчення, діє тиск q_1 , яке визначається як:

$$\bar{q}_1 = \bar{p}_1 \cdot \frac{R_n}{R_m} - \Delta \bar{q}_m,$$

де Δq_m – величина визначальна зміна тиску q_1 з урахуванням тертя при переході та визначається як:

$$\Delta \bar{q}_m = G \cdot \frac{\lambda}{1 - \lambda},$$

де G - коефіцієнт, що враховує величину пригальмовування течії матеріалу вздовж стінки склянки;

λ – коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів та ступеня деформації [15].

$$G = \frac{\mu \cdot (2 \cdot h_3 + h_2)}{R_m}.$$

Параметричний вид приведенного тиску

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \left[1 + \left(-\frac{\bar{h} + \bar{h}_2}{2 \cdot \bar{h}_2} - \frac{1}{(1 - \bar{R}_n^2)} \cdot \frac{\bar{h} + \bar{h}_2}{\bar{h}_2} \cdot \ln \left| \frac{1}{R_n} \right| \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\bar{h}_1}{\bar{R}_n} - \frac{(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2 - \bar{h}_1^2}{2 \cdot \bar{h}_2 \cdot \bar{R}_n} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\bar{R}_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{h}_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(1 - \bar{R}_n^3)}{3 \cdot \bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} + \frac{(1 - R_n)}{\bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} \right) + \right. \\ \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{R}_n \cdot \bar{h}_3}{(1 - \bar{R}_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{h}_3}{(1 - \bar{R}_n^2)} + \right. \\ \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[\frac{\bar{h}_1}{(1 - \bar{R}_n^2)} - \frac{[(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2 - \bar{h}_1^2]}{2 \cdot \bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} \right] \right] - G \cdot \frac{R_m}{R_n} \cdot \lambda +$$

$$+ \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(\bar{R}_K^2 - 2 \cdot \bar{R}_0^2 \right) + \left(\frac{\bar{R}_K^2 - \bar{R}_0^2}{2} + \bar{R}_K^2 \cdot \ln \left| \frac{\bar{R}_K}{\bar{R}_0} \right| \right) + \left(\frac{1 - \bar{R}_K^2}{2} + \bar{R}_K^2 \cdot \ln \left| \frac{1}{\bar{R}_K} \right| \right) + \\ & + \ln \left| \bar{R}_1 \right| \cdot \left(1 - \bar{R}_K^2 \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\bar{R}_0^3}{3 \cdot \bar{h} \cdot \bar{R}_M^2} - \frac{\bar{R}_0 \cdot \left(\bar{R}_K^2 - \bar{R}_0^2 \right)}{\bar{h}} \right) + \\ & + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1 - \bar{R}_K^3}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{\bar{R}_K^2 \cdot \left(1 - \bar{R}_K \right)}{\bar{h}} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\bar{R}_K \cdot \bar{h} \right) + \\ & + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_K^2 - \bar{R}_0^2 \right) \cdot \bar{h}}{\bar{R}_0^2} - 3 \cdot \bar{R}_0 \cdot \bar{h} \right) + \frac{\bar{h}}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{h}_4}{\bar{R}_0} + \\ & + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_K^3 - 1 \right)}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{\bar{R}_K^2 \cdot \left(\bar{R}_K - \bar{R}_0 \right)}{\bar{h}} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{1 - \bar{R}_K^3}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{1 - \bar{R}_K}{\bar{h}} \right) + \\ & + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_1 - 1 \right)}{\bar{h}} \cdot \left(1 - \bar{R}_K^2 \right) \right) \end{aligned} \right],$$

де $\bar{R}_M = \frac{R_M}{R_M} = 1$; $\bar{R}_K = \frac{R_K}{R_M}$; $\bar{R}_n = \frac{R_n}{R_M}$; $\bar{R}_0 = \frac{R_0}{R_M}$; $\bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_M}$; $\bar{h} = \frac{h}{R_M}$;

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{R_M}; \quad h_1 = H_3 - h - h_2 - S;$$

H_3 – висота заготовки; S – хід пуансону;

$$h_2 = R_n \cdot \operatorname{tg} 45^\circ; \quad \bar{h}_3 = \frac{h_3}{R_M}; \quad \bar{h}_4 = \frac{h_4}{R_M}.$$

4.2 Моделювання силового режиму комбінованого процесу тристороннього видавлювання енергетичним методом з криволінійними блоками

Фаску на нижній матриці описуємо модулем представленим на рис. 4.1.

Похила пряма описується математичним виразом

$$T(z) = -\frac{(R_0 - R_0^*)}{H^*} \cdot z + R_0^*,$$

або

$$T(z) = k \cdot z + R_0^*,$$

де

$$k = -\frac{(R_0 - R_0^*)}{H^*} = T'(z).$$

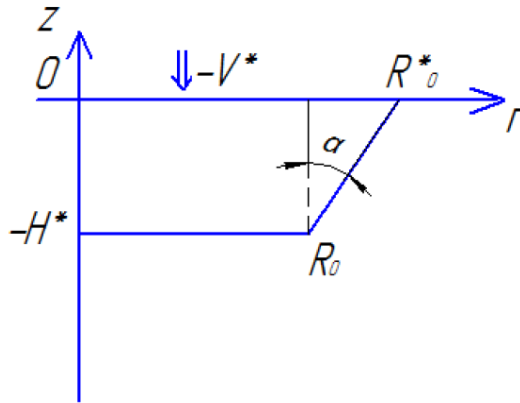


Рисунок 4.1 - Новий кінематичний модуль для розрахунку прямої течії металу

Кінематичні граничні умови мають вид

$$V_z \Big|_{z=0} = -V^* ;$$

$$V_z \Big|_{z=-H^*} = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2}{(R_0)^2} ;$$

$$V_r \Big|_{r=0} = 0 .$$

Кінематично можливі поля швидкостей даного блоку

$$V_z = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2}{T^2(z)} ;$$

$$V_r = \frac{r \cdot k}{T^3(z)} \cdot \left(-V^* \cdot (R_0^*)^2 \right) .$$

Компоненти швидкостей деформацій

$$\dot{\varepsilon}_z = -V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot (-2) \cdot T^{-3}(z) \cdot T'(z) = \frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)};$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)};$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)}.$$

Інтенсивність деформацій

$$\dot{\varepsilon}_i = 1,08 \cdot |\dot{\varepsilon}_{\max}|,$$

тоді

$$\dot{\varepsilon}_i = 1,08 \cdot \left(\frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} \right).$$

Потужність сил деформування

$$\begin{aligned} N_\partial &= \int_{-H^*}^0 \int_0^{T(z)} \int_0^{2\pi} \left(\frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} \right) \cdot 1,08 \cdot \sigma_s \cdot r \cdot d\theta dz dr = \\ &= 1,08 \cdot \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2 \cdot H^* \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T(z)}; \end{aligned}$$

Потужність сил зрізу

$$\begin{aligned} N_{с.верх} &= \int_0^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^3(z)} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\ &= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{с.низ} &= \int_0^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^3(z)} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\ &= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}. \end{aligned}$$

Потужність сил тертя

$$\begin{aligned}
 N_{\text{т.нах}} &= \int_{R_0}^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left| \frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^2(z)} \right| \cdot r \cdot d\theta dr = \\
 &= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_0^{*3} - R_0^3) \cdot \text{tg}(\alpha)}{T^3(z)}.
 \end{aligned}$$

Приведений тиск після скорочення на $(\sigma_s \cdot v^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2})$, для даного блоку має вигляд:

$$\begin{aligned}
 \bar{p}_{2.2} = 1,08 \cdot & \frac{2 \cdot H^* \cdot \text{tg}(\alpha)}{T(z)} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \text{tg}(\alpha)}{T^3(z)} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0)^3 \cdot \text{tg}(\alpha)}{T^3(z)} + \\
 & + \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_0^{*3} - R_0^3) \cdot \text{tg}(\alpha)}{T^3(z)}.
 \end{aligned}$$

4.3 Порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті

В якості методу для порівняння схеми комбінованого тристороннього видавлювання враховує фаски на інструменті та схеми не враховує фаски на інструменті був обраний метод кінцевих елементів.

Проведено порівняльний аналіз енергосилових параметрів при тристоронньому видавлюванні заготовки за схемою з фасками та без (рис. 4.2). Встановлено, що максимальне зусилля при деформуванні за двома схемами має незначне відхилення (до 5%), але встановлено, що на початку процесу сила видавлювання за схемою з фасками нижче, що пояснюється більшою свободою закінчення металу. При досягненні ходу пуансона 15 мм, меншим стає зусилля видавлювання для схеми без фасок, що можна пояснити зменшенням поверхні тертя.

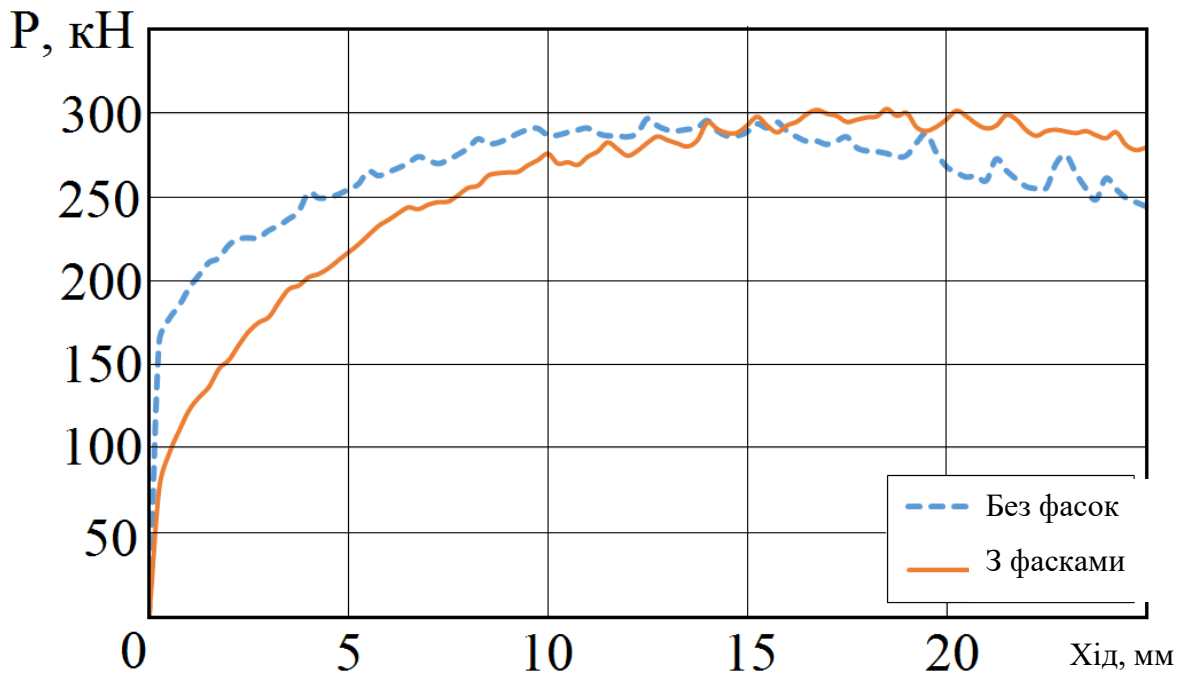


Рисунок 4.2 – Графік залежності зусилля від ходу процесу різних схем деформування

Аналіз формозміни заготовки показав, що наявність фасок на всіх інструментах сприяє течії металу в зону фланця та відростка та зменшує течію металу у стінку стакану (рис. 4.3), таким чином, що радіус фланця збільшується на 2,15%, довжина відростка на 4,06%, а висота склянки зменшується на 14,48%. Однак наявність фасок тільки на пуансоні або нижньої матриці не значно впливає на формозміну деталі, а наявність фаски на верхній матриці, за відсутності фасок на інших інструментах, що сприяє течії металу в зону фланця та відростка та зменшенню лінійного розміру зони стакану.

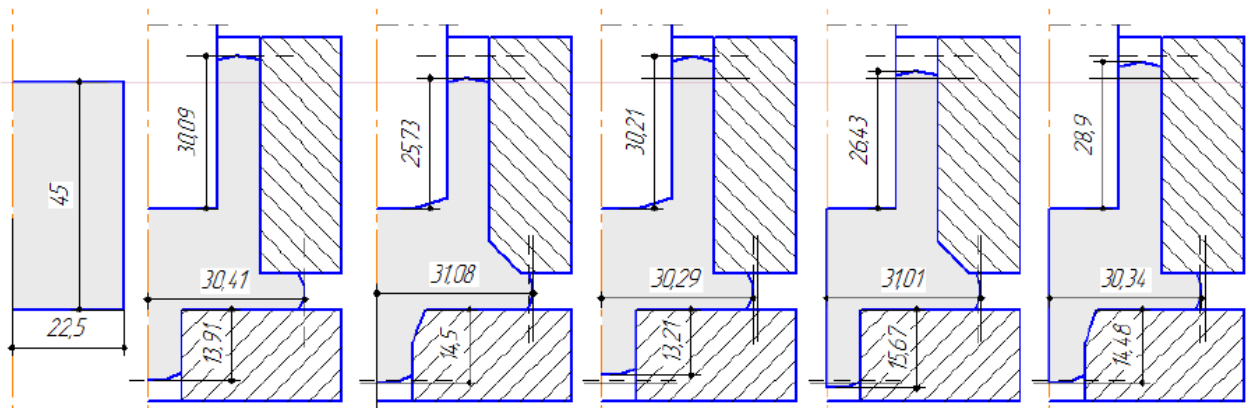


Рисунок 4.3 - Вплив фасок інструменту на формозміну заготовки

Проведено порівняння кінцевої формозміни заготовки по ходу процесу, отриманої методом кінцевих елементів та енергетичним шляхом балансу потужностей (рис. 4.4). Порівняння проведено для схеми не враховує фаски на інструменті (див. рис. 4.4, а) та для схеми з урахуванням фасок на інструменті (див. рис. 4.4 б).

Зіставлення отриманих результатів показує розбіжність збільшень деталі трохи більше 7%. Більш завищені результати отримано енергетичним методом балансу потужностей, що пов'язано з великою кількістю припущень під час розрахунку.

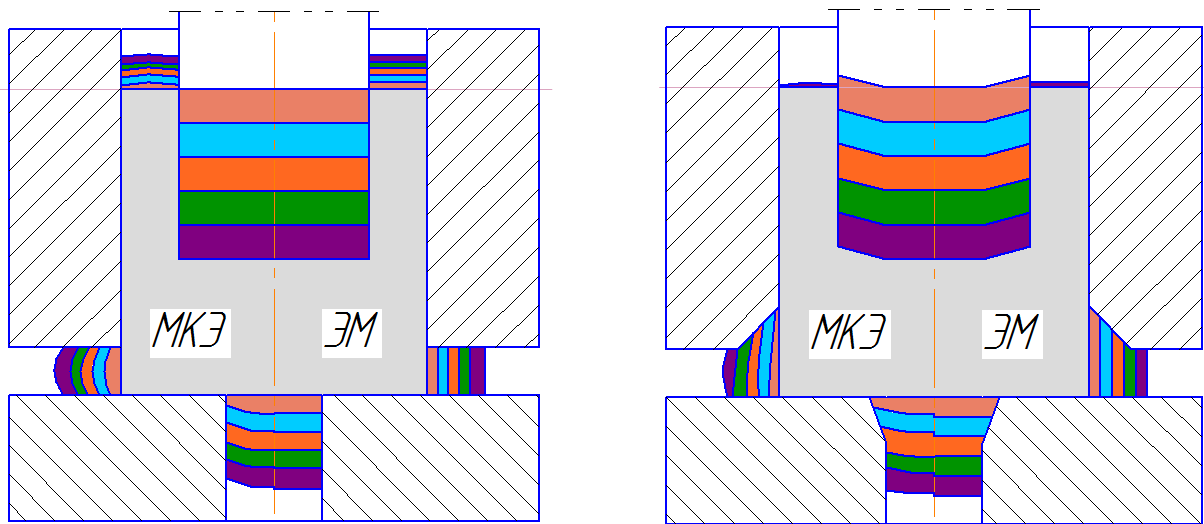


Рисунок 4.4 – Збільшення лінійних розмірів заготовки по ходу деформування (а - схема не враховує фаски на інструменті; б – схема враховує фаски на інструменті)

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом відбувалася в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника, згідно [30], могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Головними елементами робочого місця дослідника є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до [31].

Згідно із [32] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа - не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Під час безпосередньої роботи з монітором, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

1. Верхній край екрану монітора повинен знаходитися на одному рівні з очима користувача.

2. Під час роботи потрібно звертати особливу увагу на положення шиї, хребта, ліктів, кистей, стегон і ступень.

3. Клавіатура повинна знаходитися під тим же кутом, що і передпліччя.

4. Слід систематично робити перерви. Фахівці рекомендують кожен годину робити перерву на п'ять-десять хвилин.

5. Кожні десять-п'ятнадцять хвилин роботи за комп'ютером необхідно дати відпочинок очам, закриваючи їх на якусь мить.

6. Слід встановити монітор так, щоб від нього не відбивалося світло.

7. Читання паперових документів вимагає сильнішого освітлення, ніж читання з екрану монітора. Якщо працівник одночасно працює за комп'ютером і з паперовими документами, слід скористатися настільною лампою.

8. Екран монітора й інші поверхні комп'ютера необхідно регулярно протирати.

Приміщення із робочими місцями користувачів комп'ютерів для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби захисту відповідно до [33].

Категорія приміщення з електробезпеки – без підвищеної небезпеки, згідно [34].

ПК, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПУЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- увімкнути систему кондиціонування в приміщенні;
- перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран - під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має бути трохи нахиленим, нижній його край ближче до оператора;

- перевірити загальний стан апаратури, перевірити справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана;

- відрегулювати освітленість робочого місця;

- відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, зручний для користувача нахил його спинки;

- приєднати до системного блоку необхідну апаратуру. Усі кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід вставляти та виймати при вимкненому комп'ютері;

- ввімкнути апаратуру комп'ютера вимикачами на корпусах в послідовності: монітор, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування);

- відрегулювати яскравість свічення монітора, мінімальний розмір світної точки, фокусування, контрастність. Не слід робити зображення надто яскравим, щоб не втомлювати очей.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

- необхідно стійко розташовувати клавіатуру на робочому столі, не опускати її хитання. Під час роботи на клавіатурі сидіти прямо, не напружуватися;

- для уникнення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу «миша» належить забезпечувати вільну велику поверхню столу для переміщення миші і зручного упору ліктьового суглоба;

- не дозволяються сторонні розмови, подразнюючі шуми;

– періодично при вимкненому комп'ютері прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою порох з поверхонь апаратури.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє підсиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі при випаровуванні поту.

При підвищенні температури повітря мають місце зворотні явища. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати. За такої високої температури та вологості практично все тепло, що виділяється, віддається у навколишнє середовище при випаровуванні поту. При підвищенні вологості піт не випаровується, а стікає краплинами з поверхні шкіри.

Недостатня вологість призводить до інтенсивного випаровування вологи зі слизових оболонок, їх пересихання та розтріскування, забруднення хвороботворними мікробами.

Робота, яка виконується, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [35]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 5.1 (відповідно до [36]).

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

5.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці.

Рівень освітлення на робочих місцях впливає на гостроту зору, тривалість ясного бачення, контрастну чутливість і здатність бачити на далекій і близькій відстані. Нормальна гострота зору, тобто здатність розрізняти дрібні предмети, у працівників, що не страждають на дефекти зору, досягається лише при освітленні 50-70 лк. Для максимальної здатності ока розрізняти такі предмети необхідна освітленість 600-1000 лк.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 5.4 (відповідно [37]):

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнювання з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	I	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4 Виробничий шум

Шумом прийнято вважати звуки, які негативно впливають на організм людини і заважають його роботі та відпочинку. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу відображені в [38]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи із використанням ПК на працівника діє підвищений рівень електромагнітного поля. Випромінювання ПК можуть бути

небезпечними для здоров'я. Низькочастотні поля при тривалому опроміненні сидять біля ПК людей можуть привести до порушень фізіологічних процесів.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження режимів захисту персоналу в умовах дії загрозливих чинників НС

5.3.1 Дія радіації на живі організми

Оскільки 70% маси тіла складається з води, то під впливом радіації розпочинається утворення вільних радикалів гідроксогрупи і гідрогени, що в свою чергу продукують пероксид гідрогену. Утворені радикали окислюють і

відновлюють молекули органічних сполук. Цими речовинами є білки, ліпіди, нуклеопротейди, ферменти та інші.

Кінцевим результатом початкової дії іонізуючих випромінювань є порушення структури клітин і тканини.

Після припинення процесу опромінення живого організму біохімічні зміни не припиняються тому, що утворені іони та радикали продовжують свою активну дію ще протягом деякого періоду часу. Виникає період вторинної дії іонізуючих випромінювань [39].

5.3.2 Визначення режимів захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань

Вихідні дані: $P_{1max} = 45$ Р/год, $K_{носл} = 35$, $t_n = 1,2$ год, $t_{pmin} = 1,7$ год, $t_{pmax} = 12$ год, $D_d = 3,4$ Р.

Визначаємо час кінця опромінення

$$t_k = t_n + t_{pmin} \text{ [год];} \quad (5.1)$$

$$t_k = 1,2 + 12 = 13,2 \text{ (год).}$$

Визначаємо можливу експозиційну дозу опромінення протягом повної робочої зміни

$$D_{12} = \frac{1,33P_{1max} \left(\sqrt[4]{t_k^3} - \sqrt[4]{t_n^3} \right)}{K_{носл}} \text{ [Р];} \quad (5.2)$$

$$D_{12} = \frac{1,33 \cdot 45 \left(\sqrt[4]{13,2^3} - \sqrt[4]{1,2^3} \right)}{35} = 9,881 \text{ (Р).}$$

Оскільки ($D_{12} = 9,881$ Р) > ($D_d = 3,4$ Р), то робота у звичайному режимі неможлива, тому потрібно організувати змінний режим роботи.

Необхідно 1-шу повну зміну поділити на таку кількість скорочених змін

$$n = \frac{D_{12}}{D_d}; \quad (5.3)$$

$$n = \frac{9,881}{3,4} = 2,9062 .$$

Після округлення до цілого в більшу сторону, приймаємо $n = 3$.

Визначаємо час початку t_{ni} , час кінця t_{ki} , тривалість t_{pi} та можливу дозу опромінення D_i кожної скороченої зміни.

Знаходимо t_{n1} , t_{k1} , t_{p1} , D_1 :

$$t_{n1} = t_n \text{ [ГОД];} \quad (5.4)$$

$$t_{n1} = 1,2 \text{ (ГОД);}$$

$$t_{k1} = \left(\frac{D_D K_{носи} + 1,33 P_{1\max} \sqrt[4]{t_{п1}^3}}{1,33 P_{1\max}} \right)^{4/3} \text{ [ГОД];} \quad (5.5)$$

$$t_{k1} = \left(\frac{3,4 \cdot 35 + 1,33 \cdot 45 \sqrt[4]{1,2^3}}{1,33 \cdot 45} \right)^{4/3} = 4,59 \text{ (ГОД);}$$

$$t_{p1} = t_{k1} - t_{п1} \text{ [ГОД];} \quad (5.6)$$

$$t_{k1} = 4,59 - 1,2 = 3,39 \text{ (ГОД);}$$

$$D_1 = \frac{1,33 P_{1\max} \left(\sqrt[4]{t_{k1}^3} - \sqrt[4]{t_{n1}^3} \right)}{K_{носи}} \text{ [P];} \quad (5.7)$$

$$D_1 = \frac{1,33 \cdot 45 \left(\sqrt[4]{4,59^3} - \sqrt[4]{1,2^3} \right)}{35} = 3,4 \text{ (P).}$$

Знаходимо t_{n2} , t_{k2} , t_{p2} , D_2 за формулами (5.5, ..., 5.7):

$$t_{п2} = t_{п1} + t_{p1} \text{ [ГОД];} \quad (5.8)$$

$$t_{п2} = 1,2 + 3,39 = 4,59 \text{ (ГОД);}$$

$$t_{k2} = \left(\frac{3,4 \cdot 35 + 1,33 \cdot 45 \sqrt[4]{4,59^3}}{1,33 \cdot 45} \right)^{4/3} = 8,83 \text{ (ГОД);}$$

$$t_{p2} = 8,83 - 4,59 = 4,24 \text{ (ГОД);}$$

$$D_2 = \frac{1,33 \cdot 45 \left(\sqrt[4]{8,83^3} - \sqrt[4]{4,59^3} \right)}{35} = 3,4 \text{ (P).}$$

Знаходимо t_{n3} , t_{k3} , t_{p3} , D_3 за формулами (5.8, 5.5, ..., 5.7):

$$t_{п3} = 4,59 + 4,24 = 8,83 \text{ (ГОД);}$$

$$t_{K3} = \left(\frac{3,4 \cdot 35 + 1,33 \cdot 45 \sqrt[4]{8,83^3}}{1,33 \cdot 45} \right)^{4/3} = 13,67 \text{ (год)};$$

$$t_{P3} = 13,67 - 8,83 = 4,84 \text{ (год)};$$

$$D_3 = \frac{1,33 \cdot 45 \left(\sqrt[4]{13,67^3} - \sqrt[4]{8,83^3} \right)}{35} = 3,4 \text{ (Р)}.$$

Отримані результати заносимо в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Результати розрахунків режимів захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань

№ зміни	t_{ni} , ГОД	t_{pi} , ГОД	t_{ki} , ГОД	D_i , Р
1	1,2	3,39	4,59	3,4
2	4,59	4,24	8,83	3,4
3	8,83	4,84	13,67	3,4

Таким чином, як видно з табл. 5.7 перших 3 зміни будуть працювати в скороченому режимі, а вже 4-та зміна може працювати в звичайному режимі. При цьому можлива доза опромінення чергових змін формувань не перевищує допустимої дози.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оцінка доцільності підвищення ефективності технологічних процесів холодного об'ємного штампування на основі розробки та застосування способів комбінованого видавлювання, які сприяють зниженню енергосилових параметрів.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету кафедри галузевого машинобудування: д. т. н., проф. Савуляк В. І., к. т. н., доц. Слабкий А.В., к. т. н., доц. Янченко О. Б.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 6.1 [40] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

В таблиці 6.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 39 балів, і згідно з таблицею 6.3, це вказує на вище середнього рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результатом магістерської роботи є математична модель процесу комбінованого тристороннього видавлювання деталей з фланцем та відростком, що дозволяє визначити силовий режим деформування та поетапне формоутворення складнопрофільованих деталей.

Результати досліджень магістерської роботи будуть цікавими підприємствам машинобудівної та металургійної галузі.

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і комерційної реалізації ідеї

9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 6.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

Таблиця 6.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Слабкий А. В	Янченко О. Б.
	Бали, виставлені експертами:		
1	3	3	3
2	4	4	4
3	3	3	3
4	4	4	4
5	2	3	2
6	3	3	3
7	2	2	2
8	4	4	4
9	3	3	3
10	4	4	4
11	4	4	4
12	3	3	2
Сума балів	СБ ₁ =39	СБ ₂ =40	СБ ₃ =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{39 + 40 + 38}{3} = 39$		

В якості аналога для розробки було обрано порожнистий виріб отриманий шляхом зворотного видавлювання. Основними недоліками аналога є: велике зусилля деформування, висока ймовірність технологічної відмови. Також до недоліків можна віднести нерівномірність деформації в об'ємі заготовки, незадовільні експлуатаційні характеристики.

У розробці дана проблема вирішується шляхом створення сприятливої схеми напруженого стану та вибором оптимальної в енергетичному відношенні схеми формозміни деталей.

В таблиці 6.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Таблиця 6.4 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Механічна стійкість, Н	75	100	1,33	10%
Функціонал, бар	48	55	1,15	25%
Похибка, %	2	1	2	40%
Напрацювання на відмову, год	3000	6000	2	15%
Масо-габарити, кг	0,2	0,2	1	10%

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (6.1) та (6.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 6.5.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (6.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (6.2)$$

де P_{Hi} , P_{Bi} – числові значення i -го параметру відповідно нового і базового виробів.

$$q_1 = \frac{100}{75} = 1,33;$$

$$q_2 = \frac{55}{48} = 1,15;$$

$$q_3 = \frac{2}{1} = 2;$$

$$q_4 = \frac{6000}{3000} = 2;$$

$$q_5 = \frac{0,2}{0,2} = 1.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (6.3)$$

$$K_{я.в.} = 1,33 \cdot 0,1 + 1,15 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,1 = 1,62$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

В табл. 6.5 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 6.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар- конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
1. Нормативно-технічні показники		
Механічна стійкість, Н	75	100
Функціонал, бар	48	55
Похибка, %	2	1
Напрацювання на відмову, год	3000	6000
Масо-габарити, кг	0,2	0,2
2. Економічні показники		
Ціна придбання, грн.	2000	1900

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (6.4)$$

де $I_{m.n.}$ – індекс технічних параметрів; $I_{e.n.}$ – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (4.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (6.5)$$

де P_{Hei} , P_{Bei} – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{1900}{2000} = 0,95;$$

$$K = \frac{1,62}{0,95} = 1,7.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

6.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (6.6)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p \approx 21...23$ дні;

t – число робочих днів роботи дослідника.

Для розробки необхідно залучити інженера з посадовим окладом 10000 грн. Кількість робочих днів у місяці складає 21, а кількість робочих днів інженера складає 35. Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 6.6.

Таблиця 6.6 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	12000	571,4	5	2857
Інженер	9000	428,6	35	15000
Всього				17857

2. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.7)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.8)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 6.7 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Підготовчі	2	1	39,9	79,8
2. Монтажні	3	3	53,8	161,5
3. Складальні	2	5	67,8	135,6
4. Налаштовувальні	6	2	43,9	263,2
5. Випробувальні	3	4	59,8	179,5
Всього				819,6

3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{N_{\text{дод}}}{100\%} \quad (6.9)$$

$$Z_d = 0,11 * (17857 + 819,6) = 2054,44 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату $N_{зп}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (6.10):

$$N_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (6.10)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

Z_p – основну заробітну плату робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{зп} = (17857 + 819,6 + 2054,44) * \frac{22}{100} = 4560,85 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Таблиця 6.8 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Тринарійфосфат	100	0,05	5
Сірчана кислота	90	0,02	1,8
Натрієва селітра	140	0,03	4,2
Хромпik калієвий	1500	0,04	60
Всього			71
З врахуванням коефіцієнта транспортування			78,1

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{i=1}^n B_j \cdot C_{вj}, \quad (6.11)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 6.9.

6. Витрати комплектуючі K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (6.12)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – покупна ціна комплектуючих i -го найменування, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат (1,1...1,15).

Таблиця 6.9 – Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Плита верхня	1 600	1	1600
Плита нижня	1 600	1	1600
Колонка	900	4	3600
Втулка	900	4	3600
Контейнер	1 100	1	1100
Болти	800	6	4800
Матриця	1 200	2	2400
Підкладка	500	1	500
Пружина тарільчаста	800	4	3200
Пуансон	600	2	1200
З врахуванням коефіцієнта транспортування			25960,00

7. Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час виконання даного етапу роботи

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

$$A = \frac{C \cdot T}{T_{кор} \cdot 12} \quad [грн], \quad (6.13)$$

де Π – балансова вартість даного виду обладнання (приміщень), грн.;

$T_{\text{кор}}$ – час користування;

T – термін використання обладнання (приміщень), цілі місяці.

Згідно пункту 137.3.3 Податкового кодексу амортизація нараховується на основні засоби вартістю понад 2500 грн. В нашому випадку для написання магістерської роботи використовувався персональний комп'ютер вартістю 50000 грн.

$$A = \frac{35000 \cdot 1}{2 \cdot 12} = 1458,33$$

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування

Найменування обладнання, приміщень тощо	Балансова вартість, грн.	Терміни корисного використання, р	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
1. Комп'ютер	35000	2	1	1458,33
2. Гідравлічний прес	90 000	4	1	1875,00
3. Штамп	10 000	4	1	208,33
4. Автоматичний комплекс для різання прутків	15 000	4	1	312,50
5. Муфельна піч	2 500	4	1	52,08
Всього				3906,25

8. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot \Pi_e \cdot K_{\text{вмі}}}{\eta_i} \quad (6.14)$$

де W_{yt} – встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

Π_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{\text{вмі}}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{вмі}} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$V_e = \frac{0,25 \cdot 270 \cdot 7,5 \cdot 0,5}{0,8} = 316,41$$

9. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{св} = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{св}}{100\%}, \quad (6.15)$$

де $H_{св}$ – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$V_{св} = 0,2 * (17857 + 819,6) = 3735,34$$

10. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{нзв}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{нзв}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$V_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (6.17)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$V_{нзв} = (17857 + 819,6) \cdot \frac{200}{100\%} = 18676,69 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$V = 17857 + 819,6 + 2054,44 + 4560,85 + 78,1 + 25960 + 3906,25 + 316,41 + 3735,34 + 18676,69 = 77964,77 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{В}{\eta}, \quad (6.18)$$

де η – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,5$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{77964,77}{0,5} = 155929,55 \text{ грн.}$$

6.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (6.19)$$

де $\Delta\Pi_o$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_o – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$.

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $\rho = 0,25$;

ν – ставка податку на прибуток. У 2023 році – 18%.

Припустимо, що при впровадженні результатів наукової розробки підвищиться ефективність технологічних процесів холодного об'ємного штампування на основі розробки та застосування способів комбінованого видавлювання, які сприяють зниженню енергосилових параметрів. Припустимо, що ціна від зросте на 150 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 800 шт., протягом другого року – на 750 шт., протягом третього року на 600 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 1900 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\P_1 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot 800] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 280181,08 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_2 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot (800 + 750)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 542951,2 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_3 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot (800 + 750 + 600)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 753067,8 \text{ грн.}\end{aligned}$$

6.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{iHB} \cdot ЗВ, \quad (6.20)$$

k_{iHB} – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ($k_{iHB} = 2 \dots 5$).

$$PV = 2 \cdot 155929,55 = 311859,09$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій E_{abc} згідно наступної формули:

$$E_{abc} = (ПП - PV) \quad (6.21)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t}, \quad (6.22)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

T – період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{280181,08}{(1+0,2)^1} + \frac{542951,2}{(1+0,2)^2} + \frac{753067,8}{(1+0,2)^3} = 1048363,79 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (1048363,79 - 311859,09) = 736504,70 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{abc} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій E_v . Для цього користуються формулою:

$$E_v = \sqrt[T_{ж}] \left(1 + \frac{E_{abc}}{PV} \right) - 1, \quad (6.23)$$

$T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_v = \sqrt[3] \left(1 + \frac{736504,70}{311859,09} \right) - 1 = 0,79 = 79\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (6.24)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Оскільки $E_e > \tau_{\min}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_e} \quad (6.25)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,79} = 1,3 \text{ роки}$$

Оскільки $T_{ок} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Схеми комбінованого тристороннього видавлювання деталей з фланцем та відростком є перспективними для здійснення процесів штампування деталей складної форми. Дослідження даних схем деформування є актуальним. Обґрунтовано вибір енергетичного методу балансу потужностей та методу кінцевих елементів як методів теоретичних досліджень процесу комбінованого тристороннього видавлювання, а методів фізичного моделювання та координатних сіток як методів експериментальні дослідження. Використання в енергетичному методі балансу потужностей кінематичних модулів дозволить оперативно реагувати на всі зміни у розрахунковій схемі, пов'язані, як з урахуванням зміни конфігурації деталі, так і з урахуванням зміни поверхні розділу течії металу на різних стадіях процесу деформування.
2. Метод кінцевих елементів може дозволити провести за допомогою комп'ютерних моделей імітаційний математичний експеримент та, зокрема, за рахунок використання спеціалізованих програмних пакетів прогнозувати характер формозміни деталей складних конфігурацій у умовах великих і неоднозначних пластичних течій, характерних для процесів комбінованого тристороннього видавлювання. Розроблено універсальне штампове оснащення, яке дозволить у лабораторних умовах провести фізичний експеримент із варіюванням геометричних параметрів. Застосування сучасних автоматизованих пристроїв дозволить точно реєструвати отримані дані. Для експериментального дослідження деформованого стану заготовок при комбінованому тристоронньому видавлюванні вибраний метод сіток, що дозволяє вивчити закономірності формування зон пластичної течії та розподілу ступеня деформації у заготовці.
3. Проведено порівняльний аналіз способів комбінованого видавлювання з двома та трьома ступенями свободи витoku матеріалу. Доведено

доцільність використання тристороннього комбінованого видавлювання та перевагу даного виду над процесами з двома ступенями течії матеріалу.

4. Дослідження напружено-деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем і відростком з матеріалу С1 проведено методом координатних сіток та моделюванням у спеціалізованому програмному продукті. Отримані дані про картину розподілу деформацій підтверджують факт наявності проміжної жорсткої зони та роз'єданого осередку деформації на початковому етапі процесу деформування для досить високих заготовок, а також дозволяють виділити кількох зон з характерною тенденцією поетапної зміни картини деформованого стану. З метою підтвердження теоретичних досліджень силового режиму та формоутворення заготовки в процесі деформування, проведено експериментальні дослідження на заготовках з алюмінієвих сплавів АД1, АД31 та свинцю С1. При порівнянні даних отриманих енергетичним методом та експериментальними дослідженнями було встановлено, що теоретичні розрахунки дають результати на 20% вище експериментальних. Метод кінцевих елементів показав результати на 12% нижче за експерименти. Розподіл ступеня деформації, отриманої методом ділильних сіток на 11% вище даних, отриманих математичним моделюванням. Виявлено дефекти у деталей, отриманих за схемою комбінованого тристороннього видавлювання, такі як розрив фланця, тріщини на фланці, підйом фланця від поверхні нижньої опорної поверхні, відхилення від круглості фланця, овальність зовнішньої вертикальної поверхні фланця, овальність відростка та задирки. Встановлено причини виникнення та можливі способи ефективного управління формоутворенням деталі.
5. Визначено режими захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань. Встановлено, що перших 3 зміни будуть працювати в

скороченому режимі, а вже 4-та зміна може працювати в звичайному режимі.

6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на вище середнього рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,3 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Solovei, V. D., Kolmogorov, V. L. A method for calculating the plastic anisotropy constants of the Hill theory. *AIP Conference Proceedings*. 2017, 1915, 040053. DOI:10.1063/1.5017401.
2. Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., Sivak, R. I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 2018, 54(3), pp. 326–332. DOI 10.1007/s11003-018-0188-x.
3. Hrudkina, N., Levchenko, V., Aliiev, I., Sivak, R., Sukhovirska, L. Estimating the initial stage in the process of radial-reverse extrusion using a triangular kinematic module / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 2(7-116), pp. 51–59.
4. Aliiev, I. S., Sivak, R. I., Markov, O. E., Levchenko, V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(3-4), pp. 1345–1353.
5. Hrudkina, N. S., Markov, O. E., Shapoval, A. A., Abhari, P., Malii, K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion / *FME Transactions*, 2022, 50(1), pp. 90–98.
6. Aliieva, L. I., Markov, O. E., Aliiev, I. S., Levchenko, V. N., Malii, K. V. Analysis of Power Parameters of Combined Three-Direction Deformation of Parts with Flange / *FME Transactions*, 2021, 49(2), pp. 344–355.
7. Hrudkina, N., Aliiev, I., Markov, O., Sukhovirska, L., Tahan, L. Designing a kinematic module with rounding to model the processes of combined radial-longitudinal extrusion involving a tool whose configuration is complex / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 2(1-110), pp. 81–89.

8. Markov, O. E., Aliiev, I. S., Aliieva, L. I., Hrudkina, N. S. Computerized and physical modeling of upsetting operation by combined dies / *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2020, 55(3), pp. 640–648.
9. Allieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhbakov, I., Markov, O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 2(1-104), pp. 15–22.
10. Kukhar, V., Hrushko, O., Markov, O., Anishchenko, O., Prysiaznyi, A. Bypass Bends Deformability of CuZn5 Brass, X10CrNiTi18-9 and C22 Steel at Forming by Euler-Mode Buckling / *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, 510, pp. 1533–1542.
11. Kukhar, V., Povazhnyi, O., Grushko, O. Analysis of CuZn5 Tube Buckling During Producing of the Crossover Bend for Metallurgical Unit / *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, pp. 444–454.
12. Sheykin, S. Y., Grushko, O. V., Melnichenko, V. V., Iefrosinin, D. V., Melnichenko, Y. V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products / *Journal of Superhard Materials*, 2021, 43(3), pp. 222–230.
13. Lin, L., Peng, W., Zhu, S., Oleksandr, M., Titov, V. Cross wedge roll bonding process for laminated shafts forming: Interface microstructure, bonding mechanism, and parameter influence / *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317, 117971.
14. Lin, L., Peng, W., Titov, V., Wu, X., Li, H. Interface phenomena and bonding mechanism in the new method of cross wedge rolling bimetallic shaft / *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24, pp. 1132–1149.
15. Titov, A. V., Balushok, K. B., Ostash, O. P., Polyvoda, S. L., Chepil, R. V. Pressing of Semi-Finished Al–Mg–Sc Alloy Products in Isothermal Conditions / *Materials Science*, 2023, 58(5), pp. 636–642.

16. Titov, V., Mozghovyi, O., Borys, R., Amirgaliyev, Y., Aitkulov, Z. Theoretical and experimental substantiation of the extraction process with thinning bimetallic tubular elements of dissimilar metals and alloys / *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 2023, 13(2), pp. 44–49.
17. Shao, Y., Peng, W., Cao, F., Oleksandr, M., Titov, V. Effect of process parameters on AA6061/Q345 bimetal composite for hot stamping / *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, 236(6), pp. 2515–2525.
18. Zhu, S., Peng, W., Chen, Z., Oleksandr, M., Titov, V. The effect of the pre-rolling high-rolling curve of the ring rolling on the forming quality of large ring / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1-2), pp. 1081–1089.
19. Ostash, O. P., Polyvoda, S. L., Chepil, R. V., Voron, M. M., Holovchuk, M. Y. Influence of Rare-Earth Metals on the Structure and Properties of Cast and Deformed Alloys of the Al-Mg-Cr-Sc-Zr System *Materials Science*, 2022, 57(6), pp. 846–857.
20. Yu, Z.-M., Peng, W.-F., Zhang, X., Oleksandr, M., Titov, V. Evolution of microstructure of aluminum alloy hollow shaft in cross wedge rolling without mandrel / *Journal of Central South University*, 2022, 29(3), pp. 807–820.
21. Savchenko, I., Shapoval, O., Chupilko, T., Titov, V., Shchepetov, V. Computer Simulation of Safety Processes of Composite Structures Rheological Properties / *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.
22. Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. *Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2021, 60(1-2), pp. 20–34.
23. Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. Rheological Model of Sintering and Viscous Flow of Porous Materials with 2D Defects. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2019, 58(7-8), pp. 399–405.

24. Shtern, M. B., Kartuzov, E. V. Formation and Propagation of Shock Waves in Highly Porous Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2016, 55(3-4), pp. 134–140.
25. Kuzmov, A. V., Shtern, M. B., Kirkova, O. G. The Effect of Additional Shear Strains Induced by Die Rotation on the Radial Pressing of Metal Powder Billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2020, 59(3-4), pp. 127–133.
26. Gogaev, K. A., Voropaev, V. S., Podrezov, Y. N., Koval, A. Y., Yevych, Y. I. Mechanical and fatigue properties of powder titanium strips, obtained by asymmetric rolling. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2017, 56(1-2), pp. 69–77.
27. Maslov, A., Savielov, D., Salenko, Y., Puzyr, R. Research process of vibration platform movement for compacting polymer concrete mixtures. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2522, 040005.
28. Yelistratov, V., Pavlenko, O., Kharkov, O., Chernysh, A., Puzyr, R. Peculiarities of the of Engineering Disciplines Teaching Process Organization Using Three-Dimensional Computer Modeling Methods. *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.
29. Puzyr, R., Savielov, D., Dolhikh, O., Kulynych, V., Baikova, M. Theoretical Study of the Extending Electric Cable Operation. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings*, 2022.
30. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->
31. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL:

- http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
- 32.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
- 33.ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с
- 34.Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
- 35.Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
- 36.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
- 37.ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
- 38.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
- 39.Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.
- 40.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТОК А**ЗАТВЕРДЖУЮ****Завідувач кафедри ГМ****д. т. н., професор Леонід ПОЛЩУК,**_____
(підпис)

« ____ » _____ 2023

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**на дослідження процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем****Розробив студент****Спеціальності 133 «Галузеве****машинобудування»****Владислав ГАВРИЛЮК**

« ____ » _____ 2023

Керівник: д. т. н., доцент**Роман СИВАК**

1 Найменування і область застосування

Найменування – втулка з фланцем, використовується для фланцевого приєднання деталей, є буртом між притискним фланцем і відповідним фланцем деталі.

2 Підстава для виконання роботи

Підставою для розробки даного дипломного проекту є індивідуальне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

3 Мета і призначення дослідження

Мета: підвищення ефективності технологічних процесів холодного об'ємного штампування на основі розробки та застосування способів комбінованого видавлювання, які сприяють зниженню енергосилових параметрів.

Призначення розробки – застосування енергоефективної та ресурсозберігаючої технології отримання порожнистих деталей з фланцем об'ємним штампуванням.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

- 4.1 Aliiev, I. S., Sivak, R. I., Markov, O. E., Levchenko, V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(3-4), pp. 1345–1353.
- 4.2 Hrudkina, N. S., Markov, O. E., Shapoval, A. A., Abhari, P., Malii, K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion / *FME Transactions*, 2022, 50(1), pp. 90–98.
- 4.3 Aliieva, L. I., Markov, O. E., Aliiev, I. S., Levchenko, V. N., Malii, K. V. Analysis of Power Parameters of Combined Three-Direction Deformation of Parts with Flange / *FME Transactions*, 2021, 49(2), pp. 344–355.

- 4.4 Hrudkina, N., Aliiev, I., Markov, O., Sukhovirska, L., Tahan, L. Designing a kinematic module with rounding to model the processes of combined radial-longitudinal extrusion involving a tool whose configuration is complex / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 2(1-110), pp. 81–89.
- 4.5 Markov, O. E., Aliiev, I. S., Aliieva, L. I., Hrudkina, N. S. Computerized and physical modeling of upsetting operation by combined dies / *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2020, 55(3), pp. 640–648.

5 Вихідні дані для розробки:

1	Апроксимація кривої зміцнення алюмінієвого сплаву АД1, МПа	$\sigma_s=141,9 \cdot e^{0,26}$
2	Апроксимація кривої зміцнення свинцевого сплаву С1, МПа	$\sigma_s=25 \cdot e^{0,19}$
3	Густина сплаву АД1, кг/м ³	2800
4	Густина свинцю С1, кг/м ³	11340
5	Коефіцієнт тертя	0,16
6	Швидкість переміщення інструменту, мм/с	1
7	Інструмент	абсолютно твердий

5.1 Технічні вимоги

- гідравлічний прес зусиллям - 2000 кН
- температура відпалу сплаву АД31 – 350-430⁰С
- витримка відпалу сплаву АД31 – 1 год
- твердість інструменту – 56-60HRC
- напруження на тензорезисторах – 6,5 В
- шорсткість робочої поверхні інструменту – Ra=0.4

5.2 Вимоги до надійності:

довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність

деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – повинна гарантувати надійну і безпечну роботу обладнання, витримувати інтенсивні динамічні навантаження.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонті. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонті пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування і ремонту:
–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

–час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

–вид обслуговування - періодичний;

–періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці);

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

- можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів
- захист від ударів під час завантаження і розвантаження
- зберігання на складі готової продукції
- зберігання у законсервованому вигляді
- складування на стелажах.

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,
- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,
- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 1 048 363,79 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Владислав ГАВРИЛЮК

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- експериментальне дослідження та моделювання процесу комбінованого видавлювання;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
- техніко-економічне обґрунтування МКР;
- охорона праці;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

9 Порядок контролю і прийомки

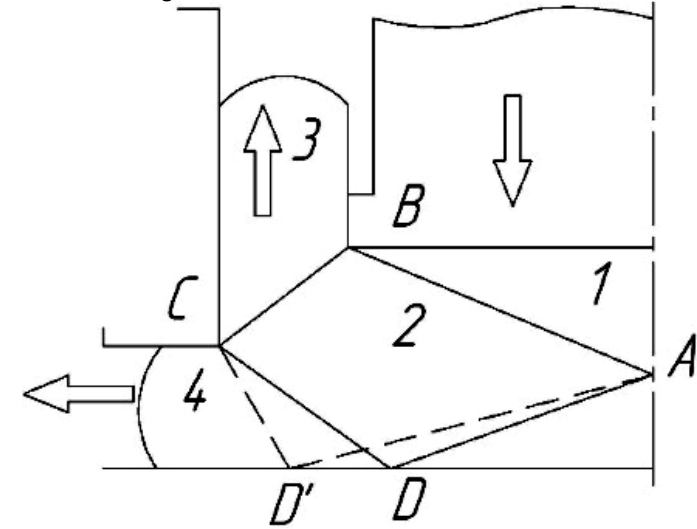
- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б

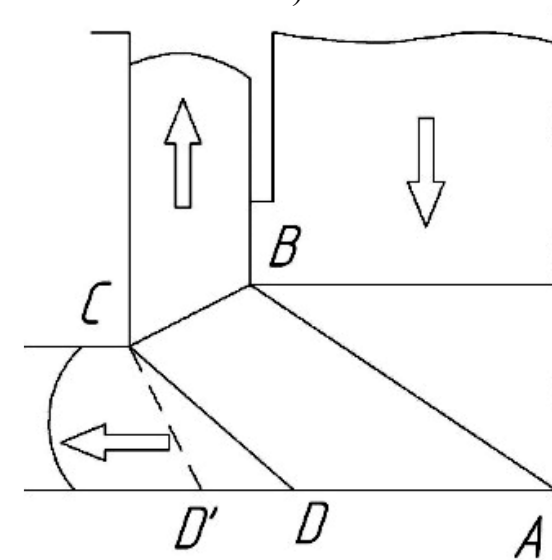
Види осередків деформації при холодному видавлюванні

	Умовна схема	Схема видавлювання		
Присланий осередок деформації				
Об'єднаний осередок деформації				
Роз'єднаний осередок деформації				
Комбінований осередок деформації				

Табл. 1



а)



б)

Рис. 1. Кінематично можливе поле швидкостей для деталі типу «стакан з фланцем»

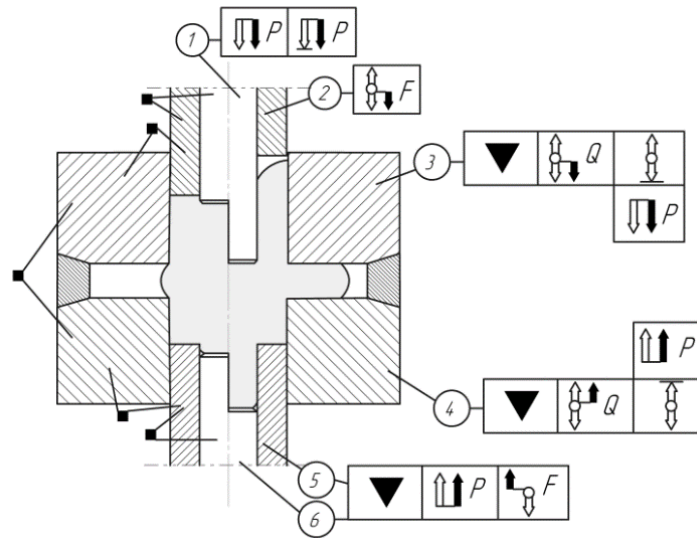


Рис. 2. Схема видавлювання з трьома ступенями свободи течії металю

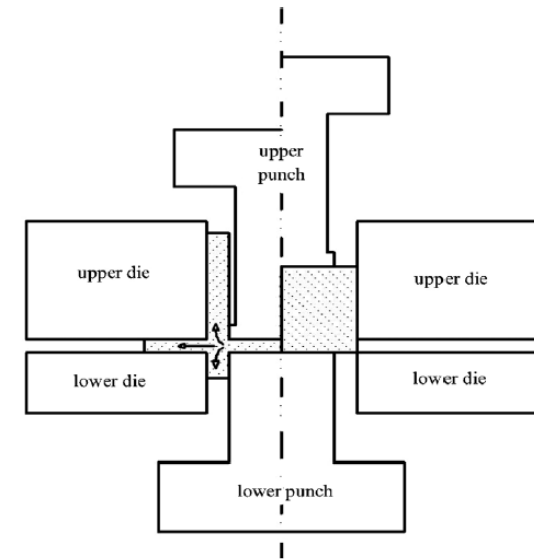


Рис. 3. Схема тристороннього видавлювання

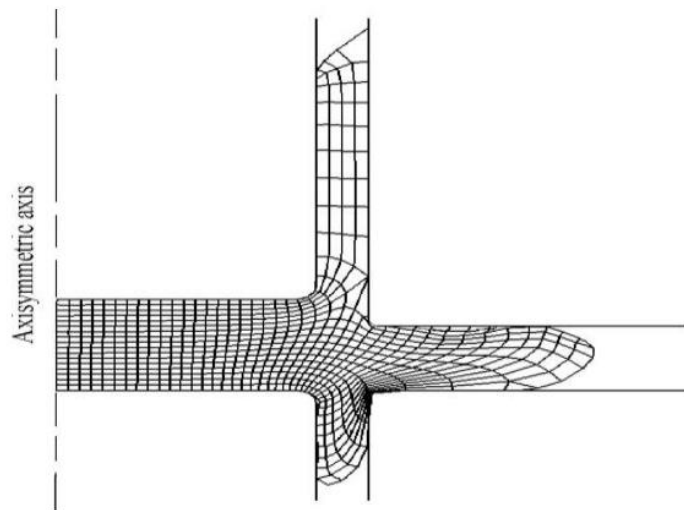


Рис. 4. Течія металю в різних зонах при комбінованому видавлюванні

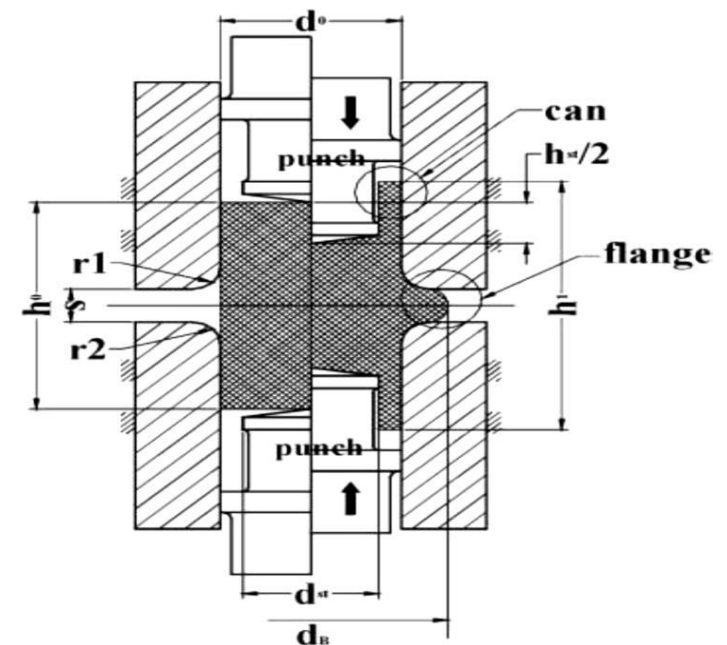


Рис. 5. Схема для аналізу процесу видавлювання

Схеми трьохстороннього видавлювання

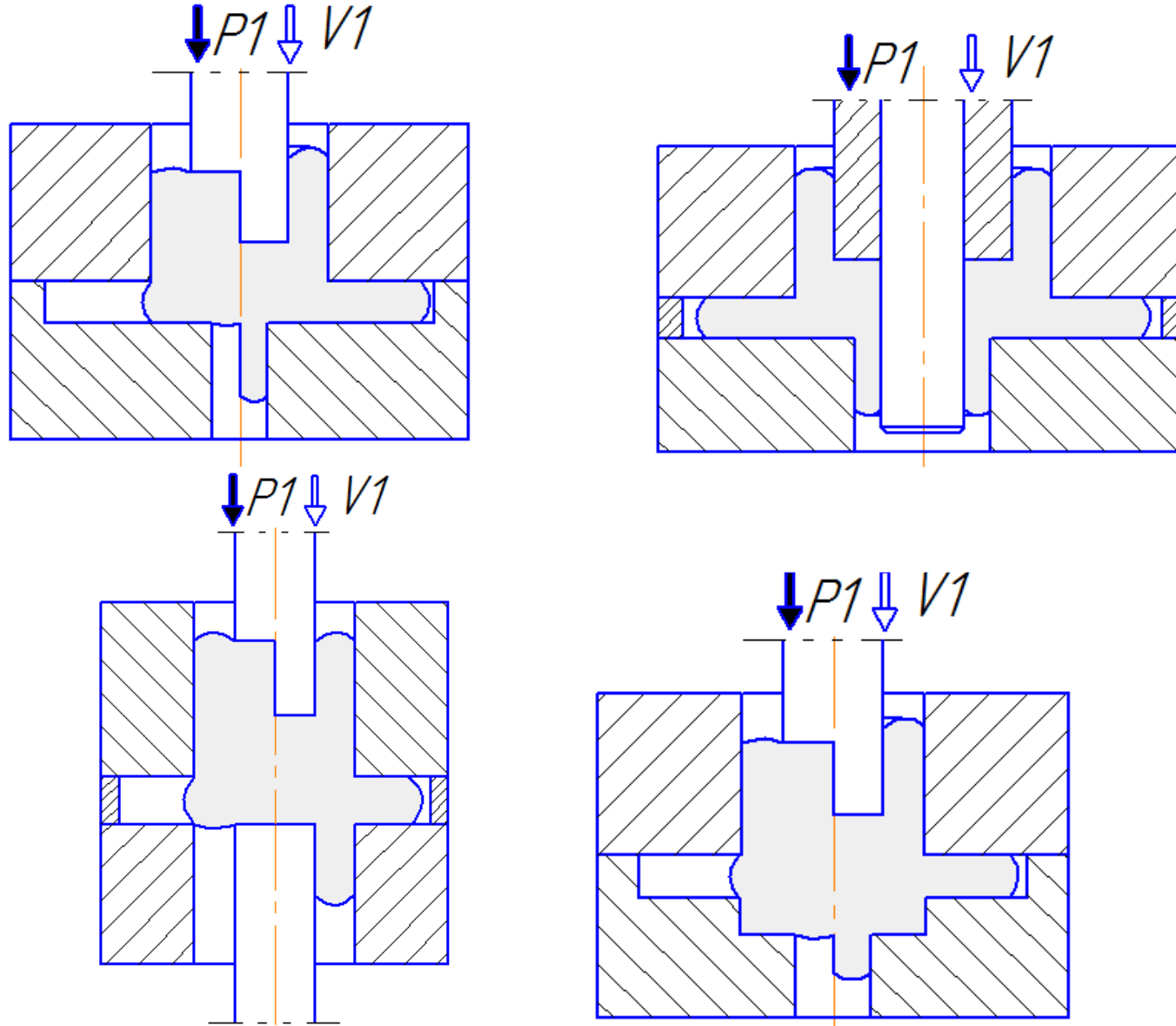


Рис. 6.

Методика проведення експериментів

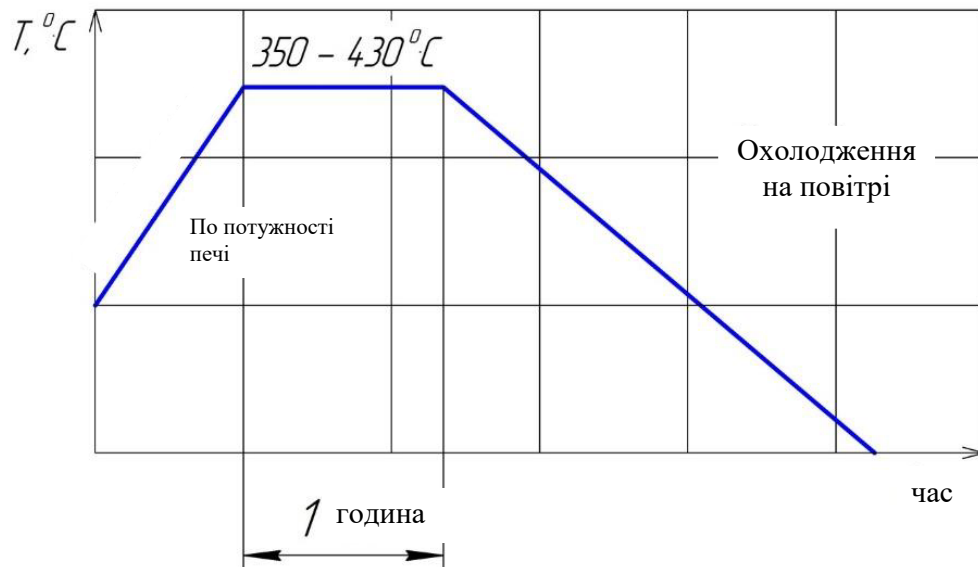


Рис. 7. Графік термічної обробки алюмінієвих зразків

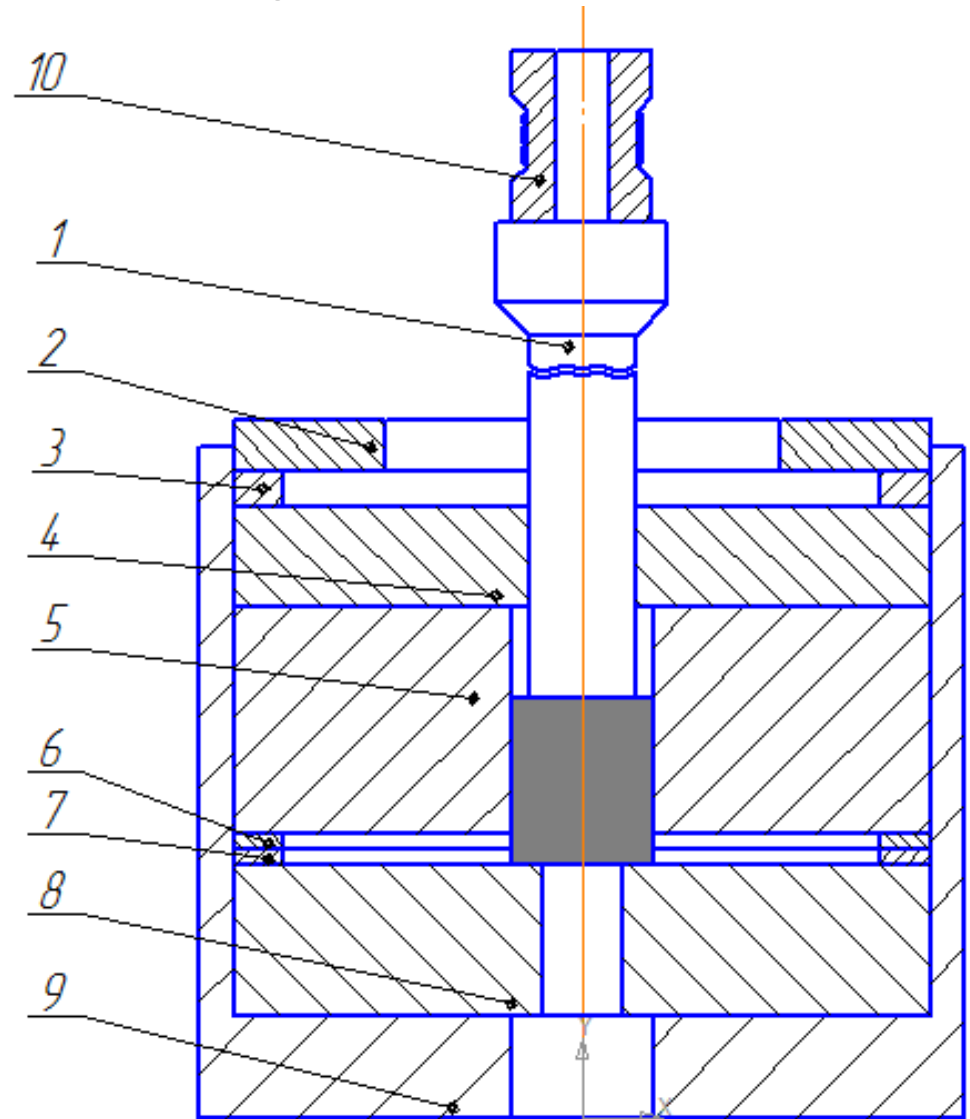


Рис. 8. Схема універсального штампу: 1 — пуансон, 2 — кришка, 3 — кільце, 4 — центруюче кільце, 5 — верхня матриця, 6, 7 — півкільця, 8 — нижня матриця, 9 — контейнер, 10 — месдоза

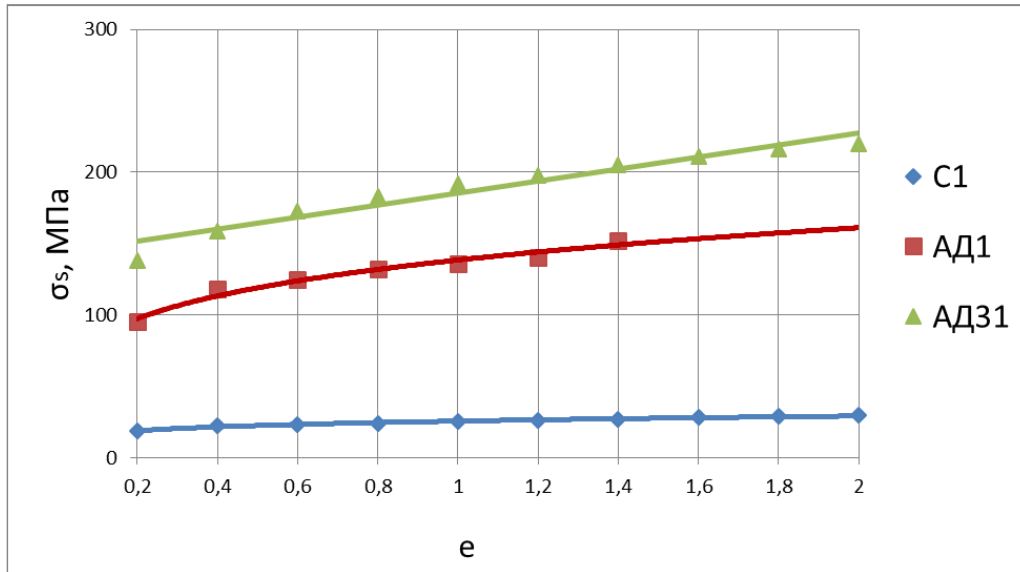


Рис. 9. Криві зміцнення для використовуваних матеріалів

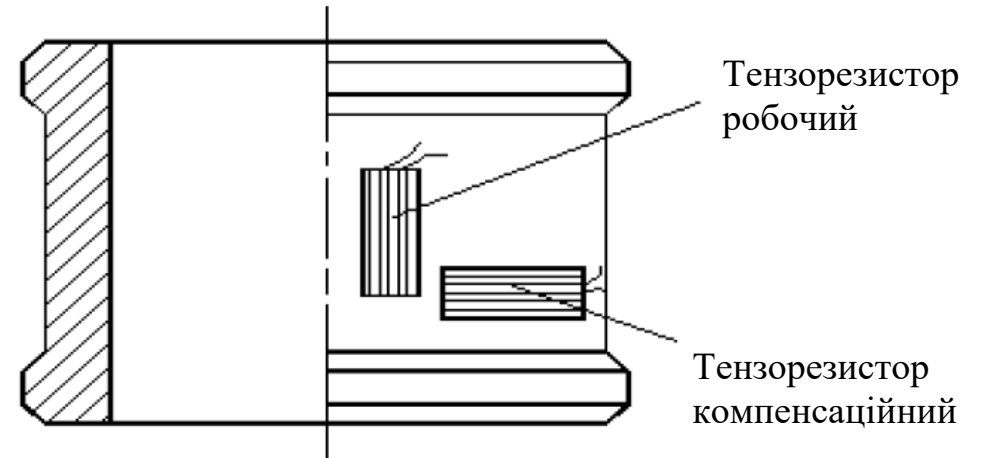


Рис. 10. Тензометрична мессоза

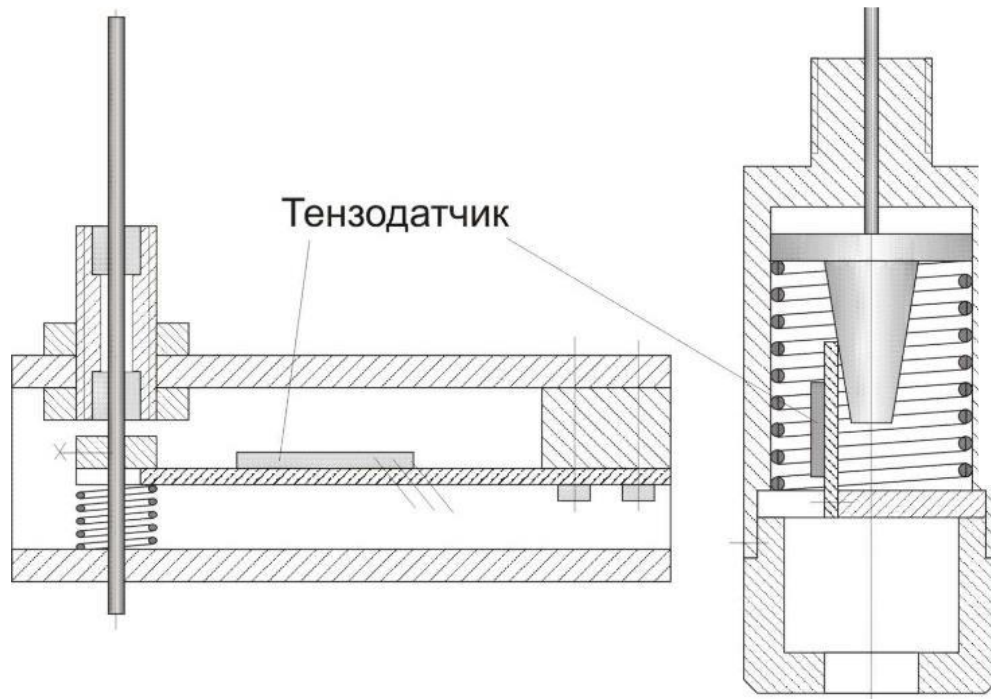


Рис. 11. Ходограф балочного типу та схема його пристрою

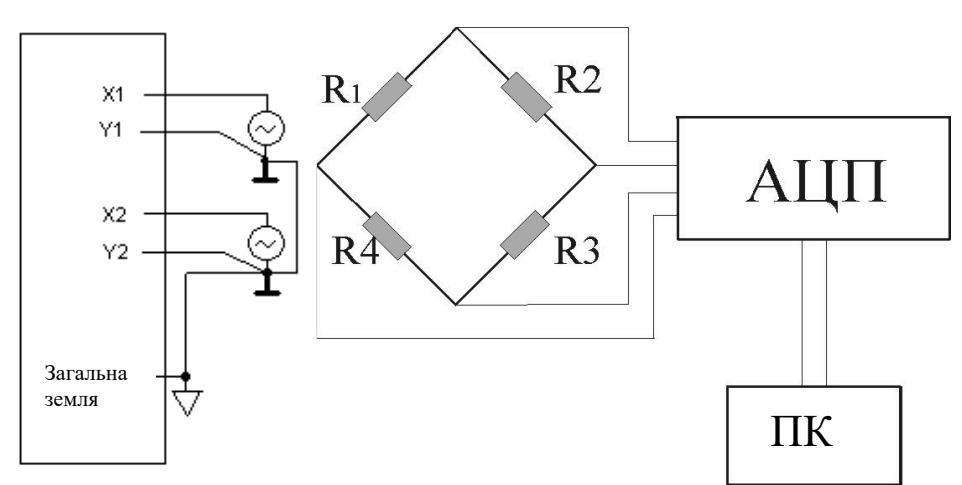


Рис. 12. Схеми підключення тензорезисторів та тензометричної апаратури до персонального компютера

Порівняння процесів комбінованого тристороннього видавлювання з фасками та без фасок на інструменті

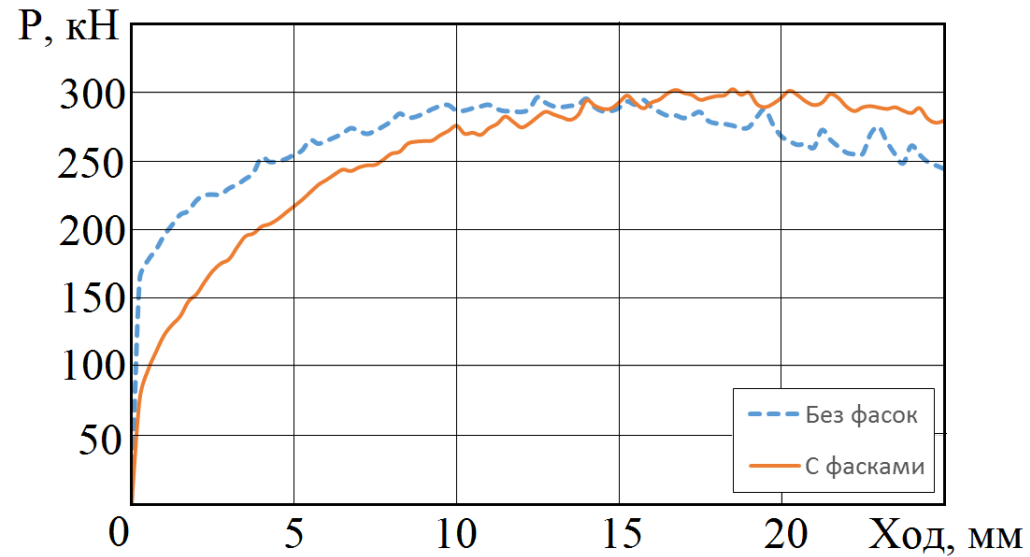


Рис. 13. Графік залежності зусилля від ходу процесу різних схем деформування

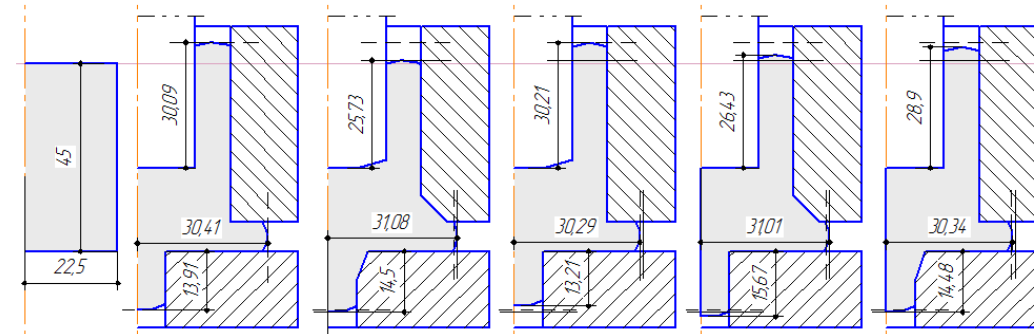


Рис. 14. Вплив фасок інструменту на формозміну заготовки

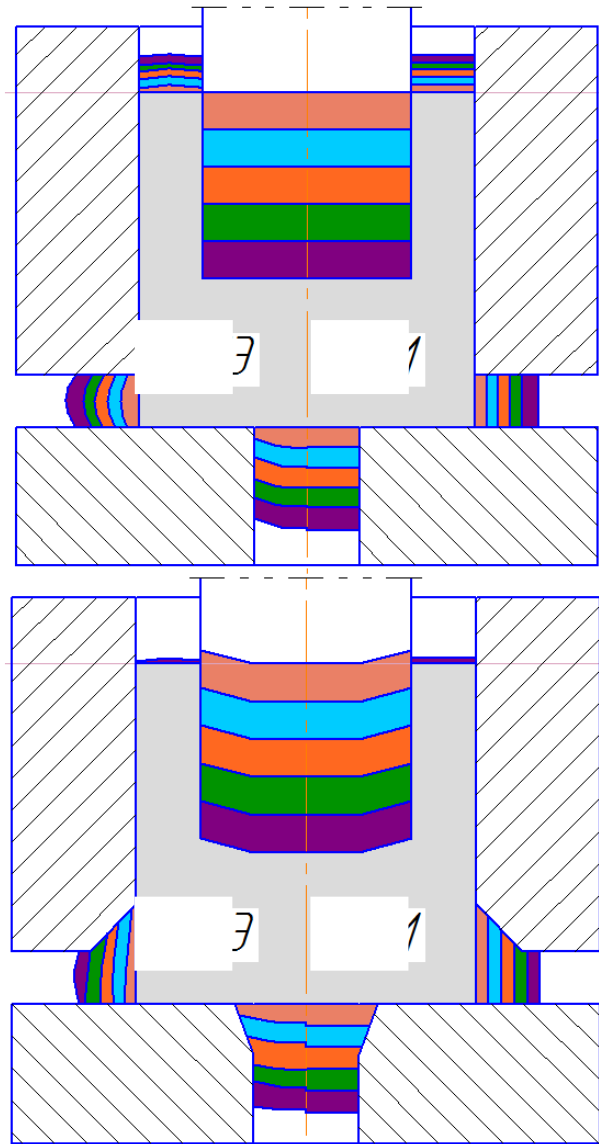


Рис. 15. Збільшення лінійних розмірів заготовки по ходу деформування (а - схема не враховує фаски на інструменті; б – схема враховує фаски на інструменті)

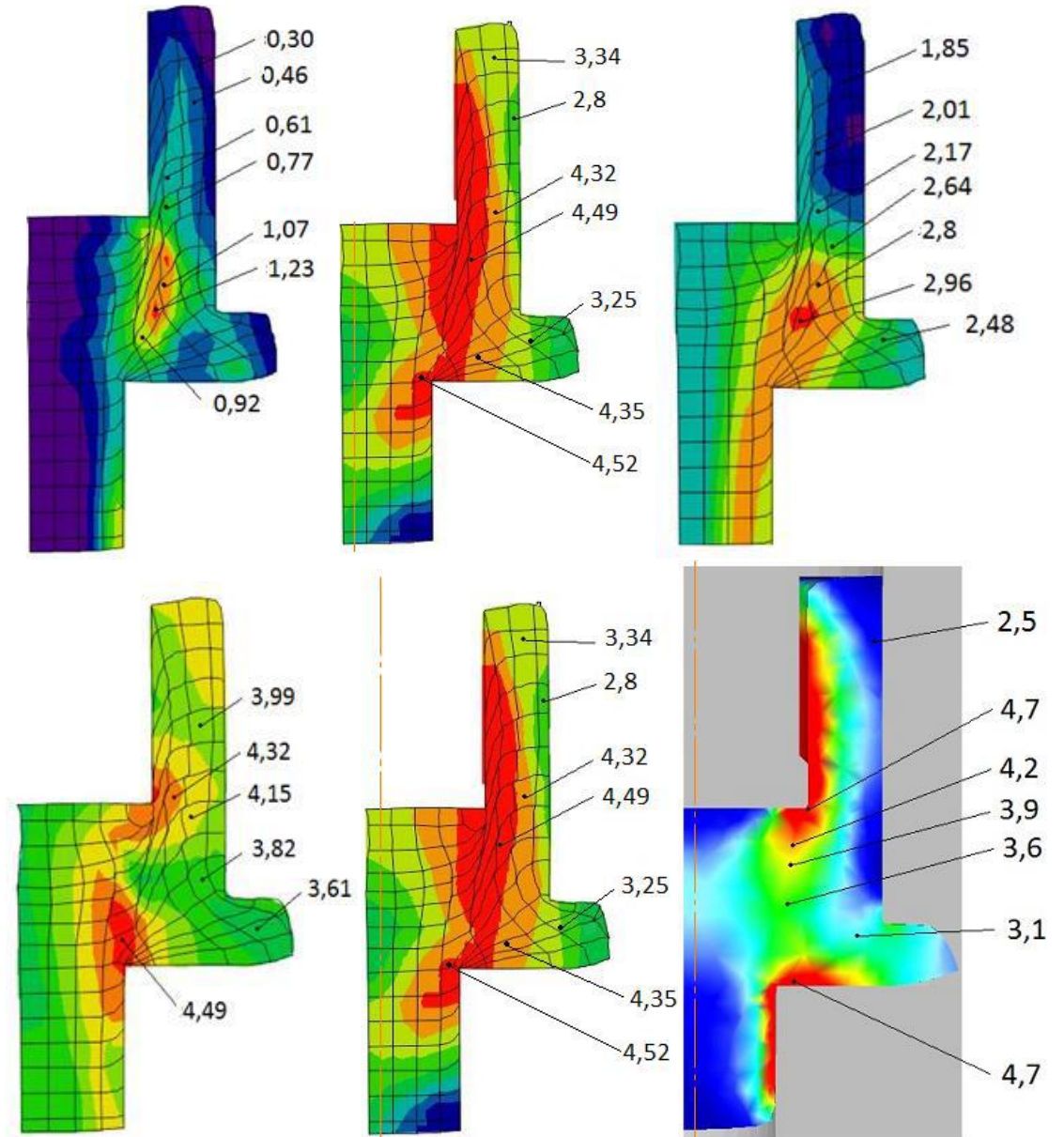


Рис. 16. Поля розподілу компонентів деформацій, інтенсивності деформацій при комбіноване тристороннє видавлювання методом ділильних сіток та методом кінцевих елементів

ВИСНОВКИ

1. Схеми комбінованого тристороннього видавлювання деталей з фланцем та відростком є перспективними для здійснення процесів штампування деталей складної форми. Дослідження даних схем деформування є актуальним. Обґрунтовано вибір енергетичного методу балансу потужностей та методу кінцевих елементів як методів теоретичних досліджень процесу комбінованого тристороннього видавлювання, а методів фізичного моделювання та координатних сіток як методів експериментальні дослідження. Використання в енергетичному методі балансу потужностей кінематичних модулів дозволить оперативно реагувати на всі зміни у розрахунковій схемі, пов'язані, як з урахуванням зміни конфігурації деталі, так і з урахуванням зміни поверхні розділу течії металу на різних стадіях процесу деформування.
2. Метод кінцевих елементів може дозволити провести за допомогою комп'ютерних моделей імітаційний математичний експеримент та, зокрема, за рахунок використання спеціалізованих програмних пакетів прогнозувати характер формозміни деталей складних конфігурацій у умовах великих і неоднозначних пластичних течій, характерних для процесів комбінованого тристороннього видавлювання. Розроблено універсальне штампове оснащення, яке дозволить у лабораторних умовах провести фізичний експеримент із варіюванням геометричних параметрів. Застосування сучасних автоматизованих пристроїв дозволить точно реєструвати отримані дані. Для експериментального дослідження деформованого стану заготовок при комбінованому тристоронньому видавлюванні вибраний метод сіток, що дозволяє вивчити закономірності формування зон пластичної течії та розподілу ступеня деформації у заготовці.
3. Проведено порівняльний аналіз способів комбінованого видавлювання з двома та трьома ступенями свободи витoku матеріалу. Доведено доцільність використання тристороннього комбінованого видавлювання та перевагу даного виду над процесами з двома ступенями течії матеріалу.
4. Дослідження напружено-деформованого стану при комбінованому тристоронньому видавлюванні деталей з фланцем і відростком з матеріалу С1 проведено методом координатних сіток та моделюванням у спеціалізованому програмному продукті. Отримані дані про картину розподілу деформацій підтверджують факт наявності проміжної жорсткої зони та роз'єданого осередку деформації на початковому етапі процесу деформування для досить високих заготовок, а також дозволяють виділити кількох зон з характерною тенденцією поетапної зміни картини деформованого стану. З метою підтвердження теоретичних досліджень силового режиму та формоутворення заготовки в процесі деформування, проведено експериментальні дослідження на заготовках з алюмінієвих сплавів АД1, АД31 та свинцю С1.
5. Визначено режими захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань. Встановлено, що перших 3 зміни будуть працювати в скороченому режимі, а вже 4-та зміна може працювати в звичайному режимі.
6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на вище середнього рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,3 роки.

ДОДОТОК В
ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
 (БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра «Галузевого машинобудування», ФМТ
 (кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 89,5% Схожість 10,%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна

за перевірку

(підпис)

Шенфельд В. Й.
 (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Гаврилюк В. В.
 (прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сивак Р. І.
 (прізвище, ініціали)