

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту  
(повне найменування інституту, назва факультету(відділення))

Кафедра галузевого машинобудування  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом»

Виконав: студент 2-го курсу, групи 1ГМ-22м

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

Базалівський Д. І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., доцент кафедри ГМ

Сивак Р. І.  
(прізвище та ініціали)

«    » \_\_\_\_\_ 2023 р.

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

Борисюк Д. В.  
(прізвище та ініціали)

«    » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Допущено до захисту  
завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. Поліщук Л. К.  
(прізвище та ініціали)

« 12 » зрудня 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 ПОЛІЩУК

«18» вересня 2023 р.

### ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ Дмитру БАЗАЛІВСЬКОМУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом».

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):

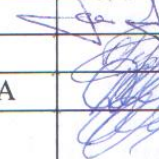

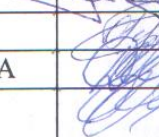

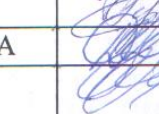



1) вступ; 2) стан та перспективи розвитку процесів холодного видавлювання; 3) теоретичний аналіз процесу комбінованого видавлювання деталей з фланцем; 4) методика проектування та штампове оснащення; 5) моделювання процесу комбінованого видавлювання методом кінцевих елементів; 6) охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; 7) економічна частина.

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

1) Класифікація, принципові схеми способів холодного видавлювання, класифікація технологічних схем поперечно-прямого видавлювання, способи видавлювання порожнистих деталей (пл. ф.А1); 2) теоретичне дослідження процесів комбінованого видавлювання (пл. ф. А1); 3) штампи і оснащення для процесів комбінованого видавлювання (пл. ф.А1); 4) дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними та трапецеїдальними блоками (пл. ф.А1); 5) дослідження силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом планування експерименту (пл. ф.А1); 6) схема штампу для комбінованого видавлювання (пл. ф.А1); 7) моделювання поетапного видавлювання порожнистих деталей з фланцем методом кінцевих елементів (пл. ф.А1); 8) оцінка величини використаного ресурсу пластичності (пл.

ф.А1): 9) дослідження формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом кінцевих елементів (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 БЕРЕЗЮК		

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.	<i>вир.</i>
2	Шляхи розвитку процесів холодного видавлювання	15.10.2023 р.	<i>вир.</i>
3	Теоретичне дослідження процесів комбінованого видавлювання	2.11.2023 р.	<i>вир.</i>
4	Штампи і оснащення для процесів комбінованого видавлювання	9.11.2023 р.	<i>вир.</i>
5	Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними блоками	15.11.2023 р.	<i>вир.</i>
6	Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями	19.11.2023 р.	<i>вир.</i>
7	Дослідження силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом планування експерименту	22.11.2023 р.	<i>вир.</i>
8	Методика проектування процесів видавлювання	24.11.2023 р.	<i>вир.</i>
9	Технологія та штампове оснащення для процесу радіально-прямо-зворотного видавлювання	26.11.2023 р.	<i>вир.</i>
10	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	1.12.2023 р.	<i>вир.</i>
11	Економічна частина	3.12.2023 р.	<i>вир.</i>
12	Підготовка ілюстративної частини МКР	7.12.2023 р.	<i>вир.</i>
13	Попередній захист на кафедрі	12.12.2023 р.	<i>вир.</i>

Студент  Дмитро БАЗАЛІВСЬКИЙ  
( підпис ) ( ім'я та прізвище )

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

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.777.4:621.77.01

Базалівський Д. І. Моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2023. 133 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 40 назв; рис.: 64; табл. 27.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд шляхів розвитку процесів холодного видавлювання, теоретичних досліджень процесів комбінованого видавлювання, штампів і оснащення для процесів комбінованого видавлювання. Виконано дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними та трапецеїдальними блоками і дослідження силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом планування експерименту. Запропонована методика проектування процесів видавлювання, технологія та штампове оснащення для процесу радіально-прямо-зворотного видавлювання, а також розширення технологічних можливостей комбінованого видавлювання. Здійснено моделювання поетапного видавлювання порожнистих деталей з фланцем, оцінка величини використаного ресурсу пластичності та дослідження формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні.

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

Bazalivskiy D. I. Modeling of the power mode of the process of combined extrusion by the energy method. Master's qualification work on specialty 133 - industrial mechanical engineering, educational program - industrial mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2023. 133 p.

Ukraine language Bibliography: 40 titles; Fig.: 64; table 27.

In the master's qualification work, an overview of the ways of development of cold extrusion processes, theoretical studies of combined extrusion processes, stamps and equipment for combined extrusion processes was carried out. The study of the power mode of the process of combined three-way extrusion by the energy method with rectilinear and trapezoidal blocks and the study of the power mode during the combined three-way extrusion by the method of planning the experiment was carried out. The method of designing extrusion processes, technology and die equipment for the process of radial-direct-reverse extrusion, as well as the expansion of the technological capabilities of combined extrusion are proposed. Modeling of step-by-step extrusion of hollow parts with a flange, assessment of the amount of used plasticity resource and study of shape change during combined three-way extrusion was carried out.

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 mode.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	9
<b>1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ.....</b>	11
1.1 Шляхи розвитку процесів холодного видавлювання.....	11
1.2 Теоретичне дослідження процесів комбінованого видавлювання.....	17
1.3 Штampi і оснащення для процесів комбінованого видавлювання.....	22
<b>2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ.....</b>	29
2.1 Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними блоками.....	29
2.2 Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями.....	36
2.3 Дослідження силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом планування експерименту.....	43
<b>3 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ТА ШТАМПОВЕ ОСНАЩЕННЯ.....</b>	48
3.1 Методика проектування процесів видавлювання.....	48
3.2 Технологія та штампове оснащення для процесу радіально- прямо-зворотного видавлювання.....	54
3.3 Розширення технологічних можливостей комбінованого видавлювання.....	58
<b>4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ...</b>	63

4.1	Моделювання поетапного видавлювання порожнистих деталей з фланцем.....	63
4.2	Оцінка величини використаного ресурсу пластичності.....	70
4.3	Дослідження формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні.....	74
<b>5</b>	<b>ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>82</b>
5.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	82
5.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії...	85
5.2.1.	Мікроклімат.....	85
5.2.2.	Склад повітря робочої зони.....	86
5.2.3.	Виробниче освітлення.....	87
5.2.4.	Виробничий шум.....	88
5.2.5.	Виробничі випромінювання.....	88
5.3	Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження режимів захисту персоналу в умовах дії загрозливих чинників НС...	89
5.3.1.	Дія радіації на живі організми.....	89
5.3.2.	Визначення режимів захисту персоналу в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	90
<b>6</b>	<b>ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>93</b>
6.1	Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	93
6.2	Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	99
6.3	Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	106
6.4	Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	107
	<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>110</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>112</b>
	<b>ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....</b>	<b>117</b>

ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	122
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ.....	132



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Основне завдання машинобудівного виробництва, у сучасних умовах високої конкуренції є випуск високоякісної продукції з мінімальними затратами. Практичній реалізації цих актуальних вимог сприяє застосування ресурсозберігаючих процесів заготівельного виробництва, зокрема точного об'ємного штампування. Фасонні вироби складної конфігурації широко поширені в промисловості та виготовляються поетапно способами точного об'ємного штампування, у тому числі видавлюванням. Для цих процесів 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. Виходячи з вищевикладеного, тема роботи, присвячена вдосконаленню технологічних процесів холодного об'ємного штампування деталей з фланцем та відростком на основі застосування способів комбінованого тристороннього видавлювання, є актуальною.

*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, способів та оснащення холодного вичавлювання; 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, а також

встановити можливості технологічних схем штампування; розробити методики та рекомендації щодо проектування технологічних процесів комбінованого тристороннього видавлювання та конструювання штампового оснащення; розробити процеси точного об'ємного штампування деталей із фланцем і відростком на основі використання способу радіально-зворотно-прямого видавлювання.

*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.* Енергетичним методом балансу потужностей, на основі запропонованих кінематично можливих полів швидкостей, розроблена математична модель процесу комбінованого тристороннього видавлювання деталей з фланцем та відростком, що дозволяє визначити силовий режим деформування та поетапне формоутворення складнопрофільованих деталей

# 1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

## 1.1 Шляхи розвитку процесів холодного видавлювання

Розвиток науки тісно пов'язаний із підвищенням практичного використання її результатів у промисловому та господарському виробництві. Найважливішим фактором у вирішенні подібних завдань є розробка нових технологічних процесів, що дозволяють отримувати вироби високої якості із заданими експлуатаційними властивостями та найменшими витратами на їх виробництво [1].

Номенклатура виробів на підприємствах машинобудування і приладобудування містить велику кількість порожнистих деталей з фланцями, буртами, відростками різної форми. Для їх виготовлення застосовуються різноманітні матеріали. Поряд із застосуванням високопластичних матеріалів, таких як мідь та її сплави, сплави на основі алюмінію, деталі виготовляються також і з вуглецевих сталей.

Одним із прогресивних ресурсозберігаючих методів отримання виробів високої якості є холодне об'ємне штампування. Основні переваги холодного видавлювання полягають у високих показниках продуктивності, точності розмірів та якості поверхні, ефективному використанні металу, підвищенні механічних властивостей матеріалу, що зміцнюється, значному зниженні трудомісткості виготовлення деталей. Процеси холодного об'ємного штампування характеризуються високим рівнем механізації та автоматизації. Застосування багатопозиційних штампувальних автоматів, а також установка на преси багатопозиційних штампів-автоматів забезпечує підвищення продуктивності в 5 – 10 раз і більше порівняно із сучасними автоматами для обробки різанням еквівалентних деталей.

Застосування процесів видавлювання дозволяє максимально наблизити форму та розміри заготовок до параметрів готової деталі. Завдяки цьому досягається значна економія металу, коефіцієнт використання металу збільшується до 0,98, при цьому скорочується, а іноді повністю виключається, подальша обробка різанням. Холодним видавлюванням можна отримувати порожнисті та суцільні заготовки досить складної симетричної і асиметричної форми. Зовнішні та внутрішні поверхні деталей можуть мати циліндричну, багатогранну або зубчасту форму [2].

При всіх вагомих перевагах холодне об'ємне штампування має і низку обмежень, головним з яких є високий опір пластичній деформації та низька пластичність більшості металів за кімнатної температури. Високий опір пластичній деформації та низька пластичність, пов'язані з деформаційним зміцненням, що призводить до виникнення великих питомих зусиль на інструмент та, як наслідок, його швидкого зношування.

Найбільш повну характеристику формозмінювальних операцій холодного об'ємного штампування дає їх класифікація з кінематики відносного руху металу та інструменту. Усі формозмінні операції з кінематики відносного руху металу та інструменту ділять на прості та комбіновані.

Прості операції - це операції, в яких рух металу однозначно поставлено кінематикою руху інструменту, тобто метал має можливість рухатися щодо інструменту лише в одному напрямку.

При комбінованих операціях метал має дві чи кілька ступенів вільності течії металу.

Усі прості формозмінювальні операції доцільно, в певних випадках, додатково ділити на відкриті та закриті. Відкриті операції іноді називають вільними. При відкритій операції переміщення металу не обмежена бічними стінками інструменту. Форма виробу у плані не задана інструментом. Вона визначається анізотропією металу, анізотропією тертя, правильністю геометричної форми заготовки, а в загальному випадку – правилом найменшого опору. При закритій операції переміщення металу у радіальному напрямку

обмежено бічними стінками інструменту. Зазвичай процес складається із двох етапів - відкритого, який поступово перетворюється на закритий.

Серед простих процесів можна виділити чотири основні способи видавлювання, що відрізняються схемами напружено-деформованого стану та областю використання. У роботі [3] наведено таблицю структурно-морфологічного аналізу та принципові базові схеми поздовжнього, поперечного та комбінованого видавлювання. Класифікація методів наведено на рис. 1.1.

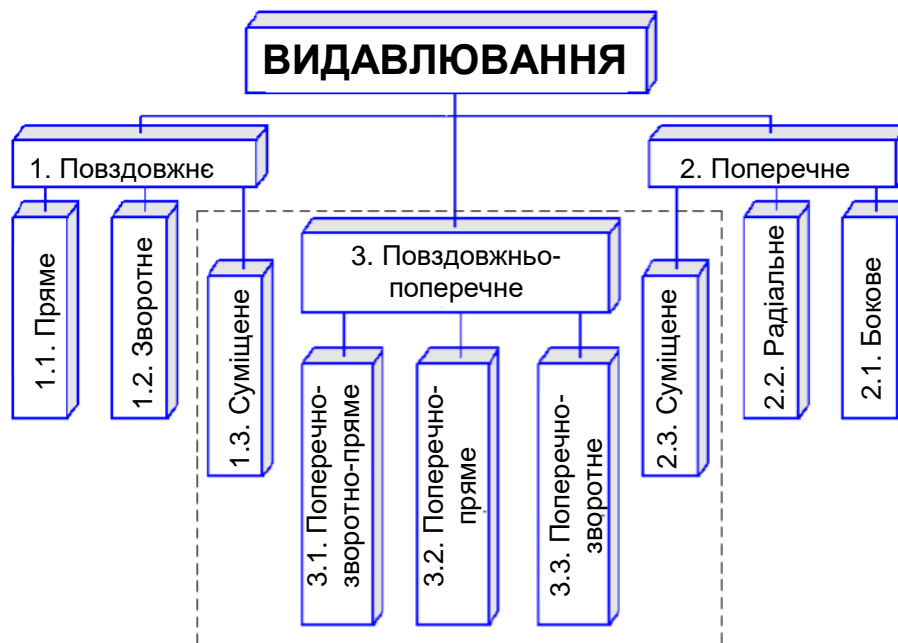


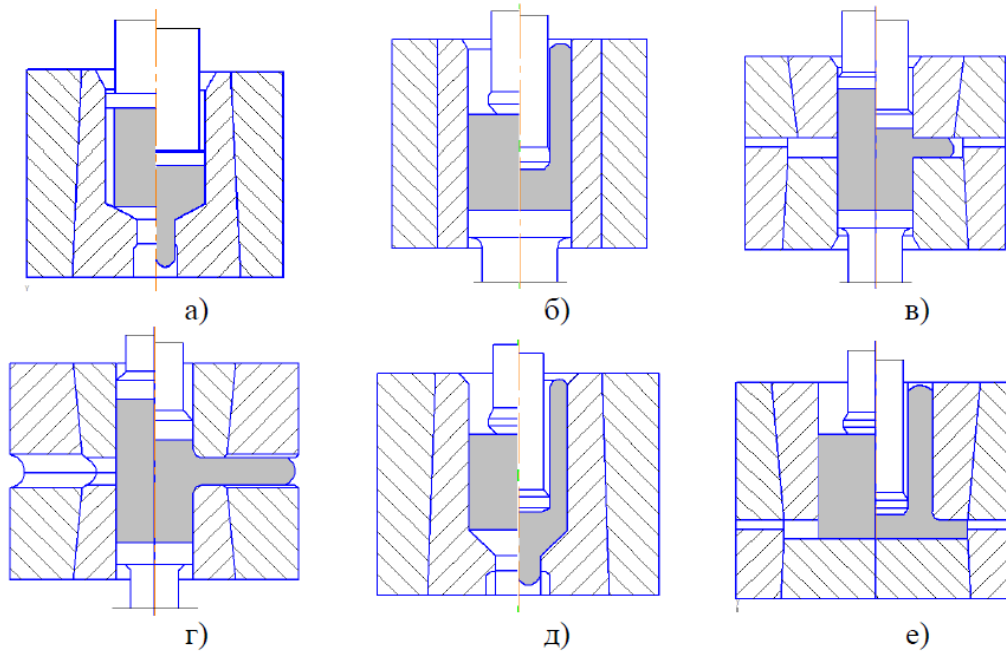
Рисунок 1.1 - Класифікація способів видавлювання

При прямому видавлюванні (рис. 1.2, а) течія металу відбувається у напрямку докладання зусилля та збігається з напрямком руху пуансона. Цим способом видавлюють деталі типу стрижнів з фланцями, трубок або стаканів з фланцями або без них, якщо видавлювання здійснюється напрохід.

При зворотному видавлюванні (рис. 1.2, б) течія металу відбувається у напрямку, протилежному до руху пуансона. Даним способом одержують деталі типу стаканів та коробок.

Спосіб поперечного (бічного або радіального) видавлювання характеризується течією металу в напрямку перпендикулярному до руху пуансона. Його можна поділити на два види. При поперечному радіальному

видавлюванні метал видавлюють у кругову порожнину (рис. 4.1, в), що призводить до утворення осесиметричних деталей з потовщеннями (фланцями). Для бічного видавлювання характерна течія металу в одну або кілька канальних порожнин з утворенням деталей, що мають відростки різної конфігурації (рис. 1.2, г) [4].



а – пряме; б – зворотне; в – поперечне (радіальне); г – поперечне (бічне); д - комбіноване (зворотно-пряме); е – комбіноване (радіально-зворотне)

Рисунок 1.2 - Способи холодного видавлювання

Існує розширення можливостей холодного видавлювання шляхом зміни виду середовища, що створює навантаження, а також схему застосування деформуючих сил.

Головний напрямок інтенсифікації процесів холодної об'ємно-пластичної течії має бути заснований на регулюванні (із застосуванням мастил оптимальної в'язкості) сил контактного тертя, створення сприятливих схем напружено-деформованого стану та виборі оптимальної в енергетичному відношенні схеми формозміни деталей.

Значним резервом розширення технологічних можливостей холодного об'ємного штампування є розробка та впровадження процесів, що дозволяють суттєво зменшити силові характеристики за рахунок регулювання кінематики течії металу та його напруженого стану у порожнині штампі як при традиційних схемах холодного об'ємного штампування, так і в комбінації з процесами із примусовою локалізацією осередку деформації [5].

Розширити номенклатуру деталей, що штампуються, і область застосування видавлювання можна, досліджуючи способи, засновані на поєднанні прямого, зворотного та поперечного видавлювання. Для впровадження процесів штампування складних деталей необхідні розробка та широке застосування різних поєднаних і комбінованих процесів, способів і пристроїв для регулювання кінематики течії металу та його напруженого стану у штампі.

Комбіноване поздовжньо-поперечне видавлювання із суцільної заготовки характеризується безліччю можливих для реалізації варіантів.

Процесам поперечно-прямого видавлювання властива більша різноманітність у комбінуванні простих схем і, відповідно, тому можлива і велика складність конструкцій деталей, що штампуються. Поперечно-пряме видавлювання можна здійснити за схемами суміщеного (з одночасною течією металу за різними напрямками) або послідовного (з поділом осередків деформації вздовж траєкторії течії або за часом) деформування. На рис. 1.3 верхній ряд можна віднести до схем суміщеного, а нижній - до схем послідовного комбінованого видавлювання. У поєднаних схемах, що містять пряме видавлювання, напрямки інтенсивної течії металу поділяються від початку процесу, що обмежує граничний ступінь деформації [14].

На рис. 1.4 показані певні способи, що характеризують напрями вдосконалення традиційних схем поздовжнього видавлювання порожнистих деталей.

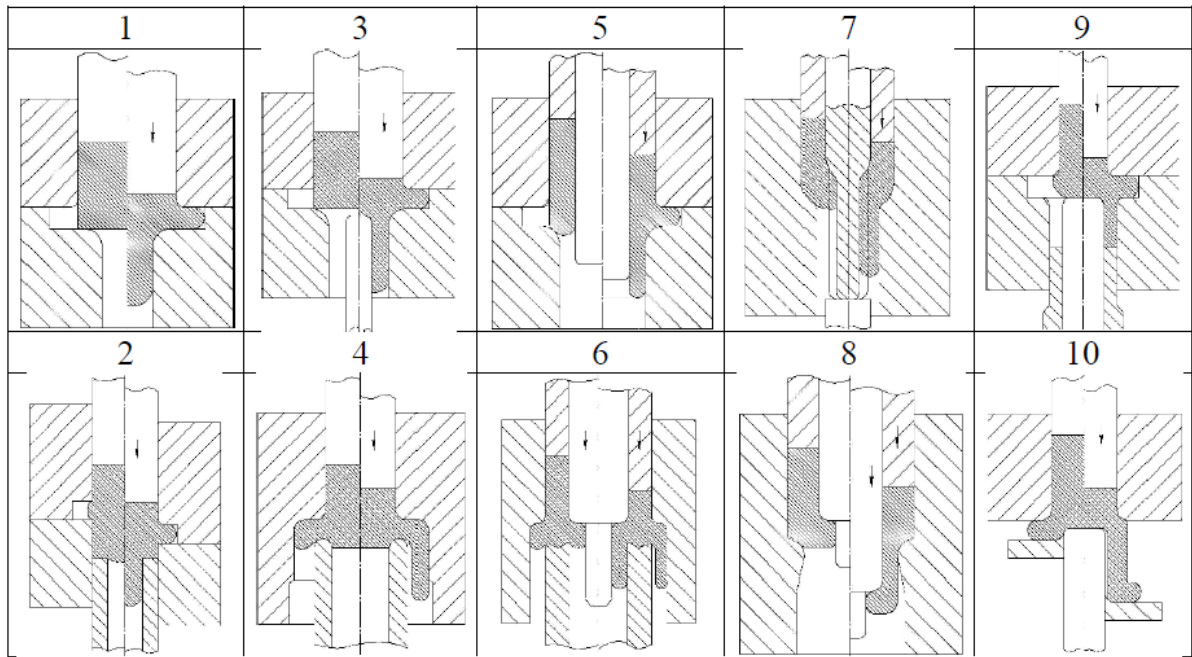


Рисунок 1.3 - Класифікація технологічних схем поперечно-прямого видавлювання

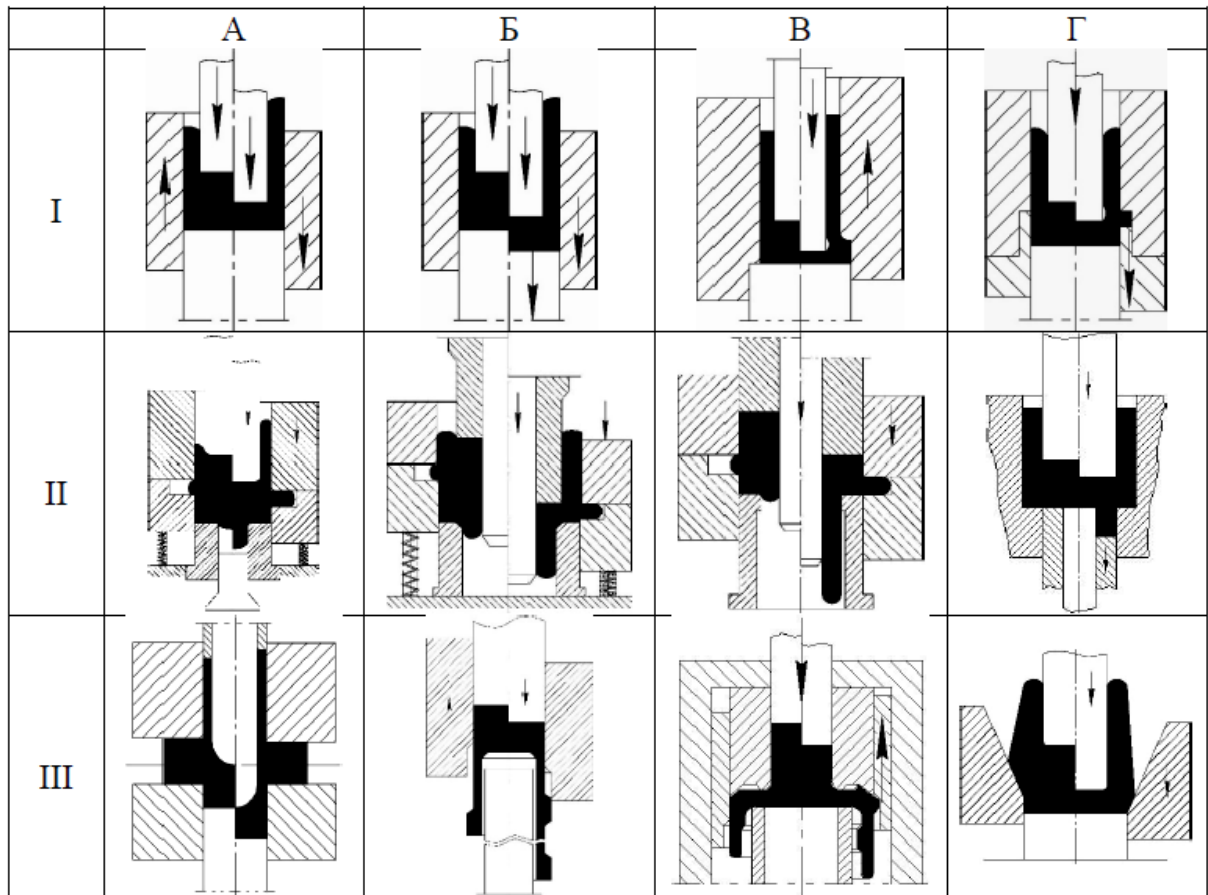


Рисунок 1.4 - Способи видавлювання порожнистих деталей



## 1.2 Теоретичне дослідження процесів комбінованого видавлювання

Аналіз робіт, а також промислового досвіду виробництва сталевих виробів методами холодного об'ємного штампування показує, що якість визначається комплексом взаємозалежних характеристик, які можна об'єднати у чотири групи:

- 1) механічні властивості та структура металу;
- 2) геометричні параметри;
- 3) показники поверхні;
- 4) залишкові напруження.

Одним з перспективних, але малодосліджених процесів холодного об'ємного штампування є комбіноване видавлювання, у тому числі комбіноване радіально-пряме (рис. 1.5). Більш широкого поширення набув процес радіально-зворотного видавлювання.

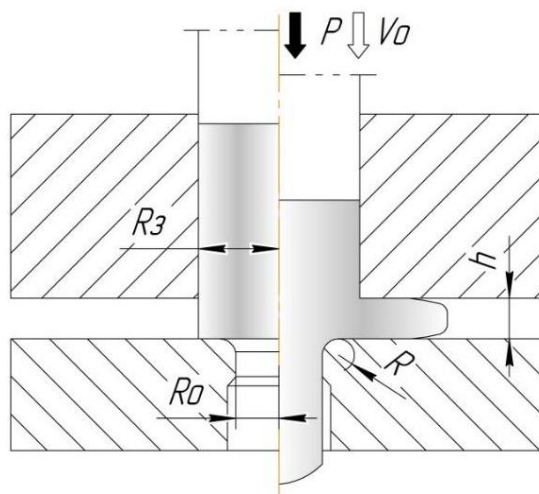
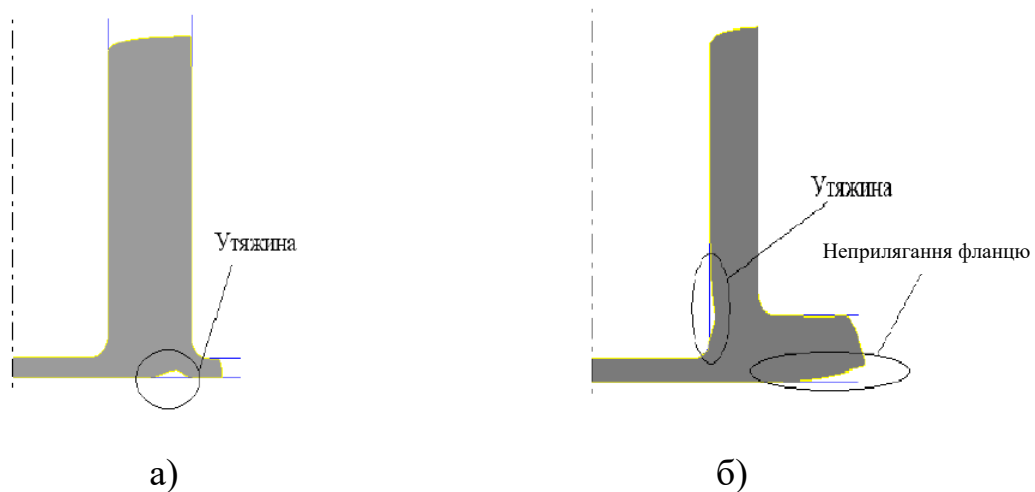


Рисунок 1.5 - Схема комбінованого радіально-прямого видавлювання

У дослідженні силових параметрів комбінованого видавлювання стрижневих деталей із фланцем, в силу певних обмежень радіально-зворотного видавлювання (великі енергетичні витрати, застосування в основному для отримання порожнистих деталей та можливе дефектоутворення), постало питання про використання радіально-прямого видавлювання для виготовлення виробів з фланцем [6].

Моделювання процесу комбінованого видавлювання деталі з фланцем методом кінцевих елементів дозволило визначити місце утворення осередку деформації та величин ступенів логарифмічної деформації. Встановлено, що із збільшенням відносного радіусу закруглення матриці  $R$  та відносної висоти фланця  $h$  значення приведенного тиску знижується, а при збільшенні відносної величини плеча  $b$  - збільшується.

До способів штампування порожнистих деталей типу стакану з фланцем, що дозволяє знизити силу видавлювання по відношенню до традиційно використовуваним процесам поздовжнього та поперечного видавлювання, відноситься спосіб комбінованого радіально-зворотного видавлювання. Зниження сил видавлювання в цьому способі визначається наявністю додаткових ступенів течії металу. При видавлюванні за схемою комбінованого видавлювання можлива поява на дні стакану при інтенсивній течії металу вгору вертикальної утяжини, а при інтенсивній течії металу у фланець, можлива поява радіальної утяжини та неприлягання фланця (рис. 1.6) [7].



а – утворення вертикальної утяжини; б – утворення радіальної утяжини та неприлягання фланця

Рисунок 1.6 - Дефекти, що виникають при радіально-зворотному видавлюванні

Дослідженням була встановлена формозміна деталі в процесі комбінованого радіально-зворотного видавлювання. Встановлено, що утяжина

у нижній частині деталі утворюється на останній стадії видавлювання, коли течія металу в радіальному напрямі практично відсутня, а основна частина металу заготовки тече вертикально вгору. Крім того, визначено вплив розміру осередку деформації при радіально-зворотному видавлюванні на енергосилові показники.

Перевагами методу балансу потужності для теоретичного дослідження комбінованого процесу радіального та зворотного видавлювання у конічній матриці є наочність, оперативність, можливість ефективного застосування ЕОМ, можливість використання дослідних даних для уточнення граничних умов, кінематичних полів швидкостей, розмірів та форми зон інтенсивної деформації (рис. 1.7).

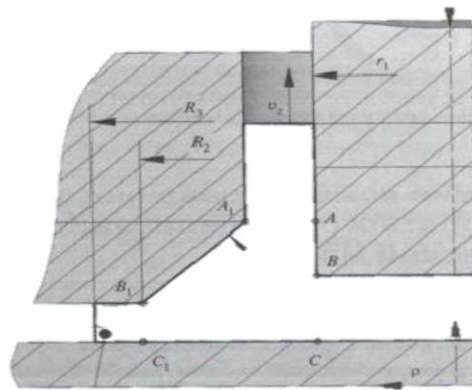


Рисунок 1.7 - Ескіз конічної матриці для радіально – зворотного видавлювання

Попередні експериментальні дослідження показали, що в процесі видавлювання переріз заготовки можна розділити на характерні області з різними швидкостями течії металу [8].

Характерним недоліком комбінованого видавлювання із протитиском є нестійкість швидкостей течії матеріалу в різних напрямках. У виробництві це призводить до того, що технолог повинен задавати значні припуски на обрізання, а якщо вони не виконуються, то деталь вважається остаточним браком, причому коефіцієнт використання металу суттєво скорочується.

Для запобігання появі дефекту в комбінованому прямо-зворотному холодному видавлюванні поршня, був розроблений новий процес

видавлювання (рис. 1.8). Дане дослідження пропонує нові процеси, які можуть запобігти дефектам, видаляючи мертві зони металу. Дослідження полягає в тому, що для запобігання дефекту, слід змінити структуру матриці та рухатися в осьовому напрямку видавлювання в контейнері, для забезпечення одночасного заповнення та ліквідації дефекту.

Штампувальні характеристики радіально-прямого вичавлювання впливають на такі конструктивні параметри, як діаметр оправки, радіус матриці та коефіцієнт тертя (рис. 1.9). Для перевірки достовірності дослідження в результаті моделювання, виконаного за тих же умов, в якості експерименту порівнюються дослідні дані в умовах формування навантаження.

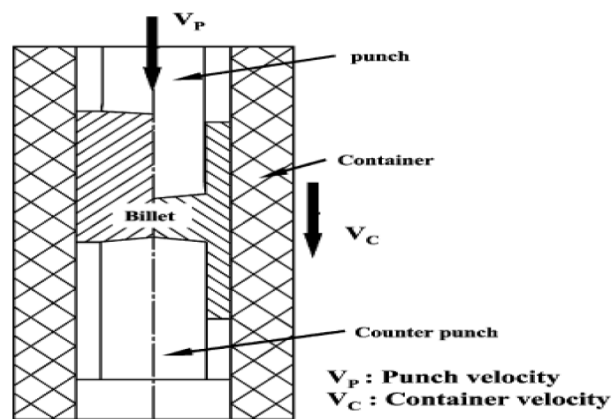


Рисунок 1.8 - Процес прямо-зворотного видавлювання поршня

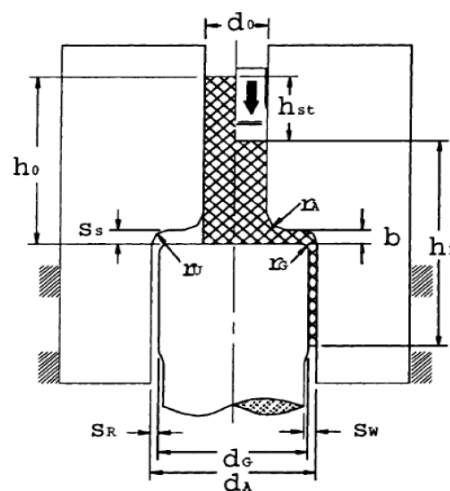


Рисунок 1.9 - Геометрія матриці, що використовується під час аналізу

Методом верхньої оцінки несиметричних процесів комбінованого видавлювання проводився аналіз полів швидкостей, які визначають штампувальні навантаження, довжину, що видавлюється, і швидкість розподілу металу по ходу течії в процесі комбінованого видавлювання (рис. 1.10).

Аналітичний підхід для радіально-прямого процесу видавлювання використовується для отримання сумарної деформації, яка досягається в компоненті при радіальному видавлюванні. Аналіз ґрунтується на визначенні компонентів полів швидкостей та швидкостях деформації (рис. 1.11). Визначається тиск видавлювання у радіальному напрямку у вигляді функції властивостей матеріалу та конструктивних параметрів. Використовуючи метод верхньої оцінки, аналіз підтверджується ґрунтуючись на експериментальних даних [9].

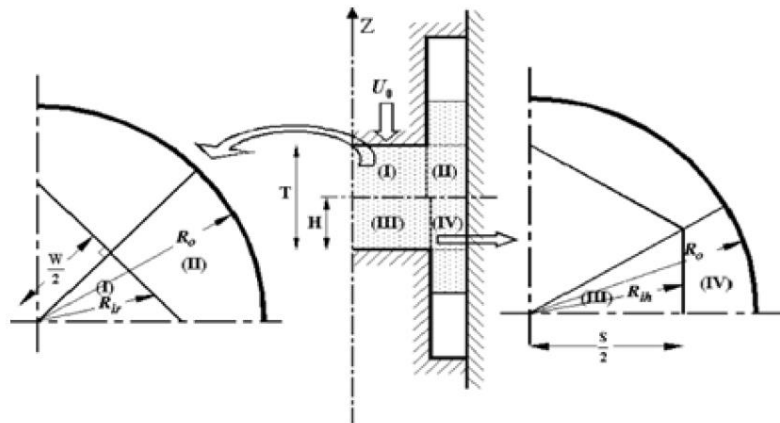


Рисунок 1.10 - Поле швидкостей при видавлюванні

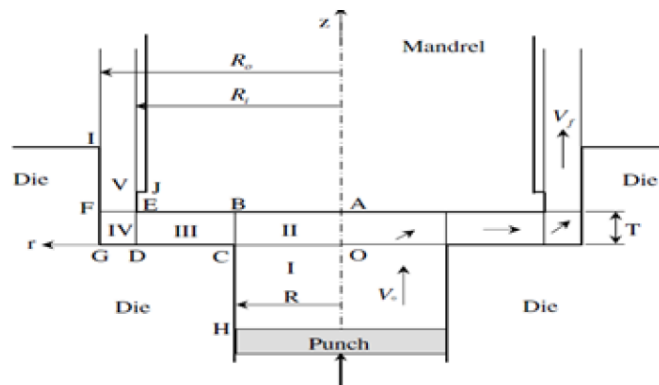


Рисунок 1.11 - Поля швидкостей при радіально-прямому видавлюванні

Додатково до чисельного моделювання процесу комбінованого видавлювання проводяться розрахунки процесів прямого та зворотного видавлювання (рис. 1.12). На основі енергетичного методу розроблено математичну модель процесу комбінованого видавлювання, що дозволяє визначити енергосилові параметри процесу як функції від основних параметрів.

При дослідженнях комбінованого двостороннього видавлювання та проведенні аналізу прямого та зворотного видавлювання шестикутних та трехоїдально-подібних скручених болтів, передбачається, що процес видавлювання ділиться на два етапи. 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 формуюче зусилля, видавлену довжину і картину деформації відносно ходу пуансону.

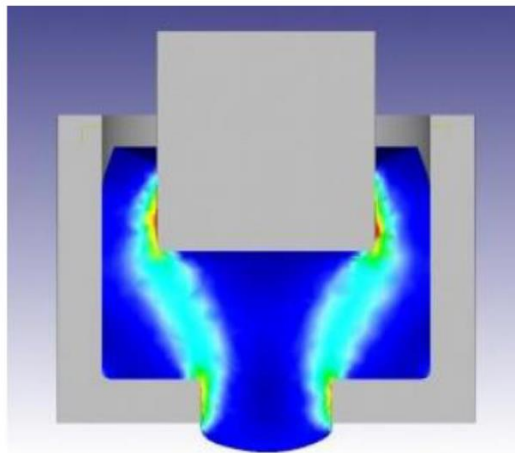


Рисунок 1.12 - Схема циклічного комбінованого видавлювання

### **1.3 Штampi і оснащення для процесів комбінованого видавлювання**

Стабільність та ефективність процесу видавлювання у значній мері залежать від конструкції використовуваного штампу.

Штампи з роз'ємними матрицями, необхідні для поперечного та комбінованого видавлювання, недостатньо поширені як через складності конструкції, так і через недостатність рекомендацій щодо їх вибору та конструювання. Однак приклади впровадження таких штампів свідчать про їх перспективність та конкурентоспроможність [10].

Завдяки інтенсифікації формозміни, що призводить до зменшення числа штампувальних переходів, застосування штампів з роз'ємною матрицею виявляється вигідним навіть для осесиметричних поковок нескладної форми (рис. 1.13).

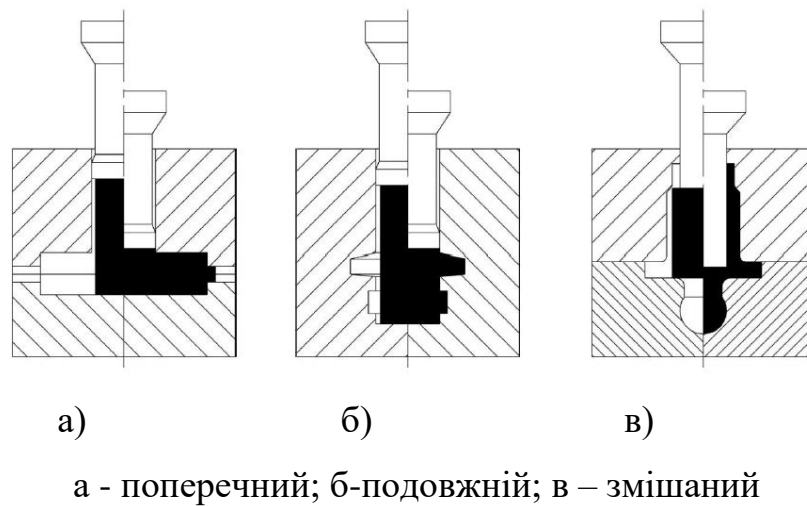


Рисунок 1.13 - Основні варіанти роз'єму матриці

Штампи з поздовжнім роз'ємом напівматриць застосовуються в гарячому об'ємному штампуванні і особливо часто на гвинтових пресах, з поперечним роз'ємом напівматриць – для маловідходного штампування складнопрофільних деталей. Дані штампи можуть мати як одну, так і кілька поверхонь роз'єму, розташованих на різних рівнях і мають різну просторову орієнтацію. Конструктивною особливістю штампів для поперечного видавлювання в роз'ємних матрицях є необхідність замикання складової матриці зусиллям таким, що гарантовано перевищує зусилля розпору порожнини під впливом деформованого металу [11]. Традиційне вирішення цього завдання - жорстке замикання напівматриць, що забезпечує сталість розмірів одержуваних виробів.

Нові рішення для конструкції штампів, розроблені на основі систематизації технологічних завдань підтвердили можливість значного розширення можливостей процесів штампування без суттєвого ускладнення оснастки. З розмаїття існуючих і можливих конструктивних схем штампів із роз'ємними матрицями можна виділити окремі групи штампів, що відрізняються положенням роз'ємної матриці та площини роз'єму, кількістю площин роз'єму, реалізуємою кінематичною схемою та ступенем рухливості матриці. Для групування компоновальних схем можна використовувати і принцип дії системи замикання роз'ємної матриці, характер замикання силової системи та особливості розвитку силового режиму.

Положення площини роз'єму напівматриць має велике значення з точки зору конструктивного виконання затискного вузла штампів, проте із усього різноманіття конструкцій штампів можна виділити низку загальних ознак затискних пристроїв [12]:

- пристрої з активним затискачем;
- пристрої з реактивним затискачем;
- пристрої з пасивним затискачем.

Пристрої з активним затискачем використовують для замикання та утримання напівматриць у замкнутому стані додатковими механізмами з автономним приводом. Оригінальний механізм у вигляді клина із змінним кутом розкриття (табл. 1.1 Схеми В2). Так у штампах із поздовжньою площиною роз'єму характерне застосування проміжних, найчастіше важільних механізмів, що мають автономний привід (табл. 1.1, А1, В1). Для штампів з поперечною площиною роз'єму характерним є застосування клинових або кулачково-клинових приводних пристроїв затиску напівматриці (табл. 1.1, Б1, В1). Для пристроїв з активним затискачем характерною є відсутність передачі зусилля розкриття матриць на повзун преса, за рахунок повного сприйняття замикаючим пристроєм. Недоліком замикаючих пристроїв даного типу є наявність додаткового приводу, що ускладнює конструкцію та налаштування



штампу, вимагає наявності пристроїв для приводу виконавчих органів замикаючих пристроїв штампів та узгодження переміщень.

Таблиця 1.1 - Конструкції замикаючих пристроїв

Повздовжня площина роз'ємну матриць			
	1	2	3
А			
Поперечна площина роз'ємну матриць			
Б			
В			
Д			

Відмінна риса пристроїв з реактивним затискачем (табл. 1.1, Б2) - повна або часткова передача зусилля розкриття матриць на повзун преса. Найбільш прості пристрої даного типу – пружинні та гідравлічні буферного типу, що передають всі зусилля розкриття матриць на повзун преса, що змушує застосовувати прес набагато більшу, ніж необхідно для деформування потужність. Так у групі штампів з поздовжньою площиною роз'єму напівматриць типовими представниками пристроїв з реактивним затискачем є штампи з конічною підпружиненою запірною обоймою та пристрої (табл. 1.1, А2), які використовують принцип самозатиску напівматриць (табл. 1.1, А3), а у підгрупі з поперечною площиною роз'єму - штампи з буферно-пружинним затискачем (табл. 1.1, Б2).

Значне зростання зусилля розкриття до кінця робочого ходу негативно впливає на працездатність штампів та може викликати заклинювання преса. Запропонована класифікацією відносить штампи з буферним затискачем до групи пристроїв з наростанням зусилля розкриття.

Схема таблиці 1.1, А2 відноситься до групи пристроїв зі зниженням зусилля розкриття. Широко застосовуються пристрої із самозатискачем матриць важільного типу або за рахунок розміщення блоку роз'ємних матриць в контейнері з конічною порожниною (табл. 1.1, А3).

У пристроях з пасивним затискачем сили розкриття матриць замикаються у штамповому блоці, а, отже, не передаються ні на повзун преса, ні на певний додатковий привід. Найбільш широке поширення дані схеми отримали в штампах із поперечною площиною роз'єму. Серед конструктивних рішень доцільно відзначити ригельні пристрої затискача (табл. 1.1, Б3), кулачкові пристрої, що автоматично замикаються (табл. 1.1, В2) та пристрої з поворотною скобою, що автоматично замикаються та розмикаються (табл. 1.1, В3). Застосування пристроїв цього типу дозволяє використовувати штампи на будь-якому універсальному пресі. До недоліків рішення можна віднести складності з розмиканням замикаючих пристроїв [13].

У пристроях із компаундним затискачем – реалізується ідея використання для затискача напівматриць технологічного зусилля деформування. Пристрої та технологічні схеми деформування даного типу мало поширені. Серед відомих рішень можна виділити схеми затиску силами тертя (табл. 1.1, Д2) і конструкції, у яких співвідношення між зусиллями розкриття та технологічним зусиллям залежить від конструктивного виконання пристрою (табл. 1.1, Д1, Д3).

Штамп для комбінованого видавлювання стакану з фланцем містить пуансон (рис. 1.14), протипуансон, матрицю, контейнер, верхню плиту та нижню плиту. Штамп додатково має штифти, які центрують заготовку відносно верхньої напівматриці, важелів та притиску. Зазначений штамп використовується для експериментальної оцінки формозміни металу і не дозволяє точно встановити заготовку відповідно до матриці та не може використовуватися у великосерійному виробництві внаслідок швидкого зношування пружного елемента [14].

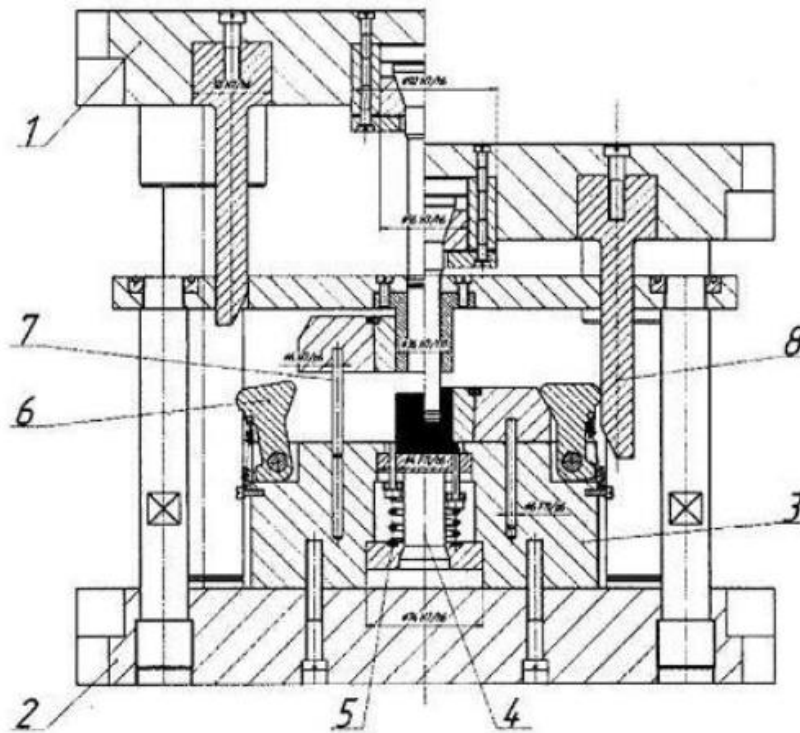


Рисунок 1.14 - Штамп для комбінованого видавлювання

Штамп для холодного зворотного видавлювання (рис. 1.15) працює наступним чином. При ході повзуна преса вниз відбувається захід напрямної частини пуансона в матрицю. При цьому відбувається налаштування плаваючого пуансону та його напрямок. При ході повзуна преса вгору відбувається вихід пуансону з матриці, який необхідний для того, щоб була можливість видалення відштампованої поковки із матриці шляхом виштовхування. Ця особливість змушує передбачати між напрямною частиною пуансона та матрицею таку величину технологічного зазору, яка виключала б можливість їх зіткнення під час ходу повзуна преса вниз у момент заходу пуансона у матрицю.

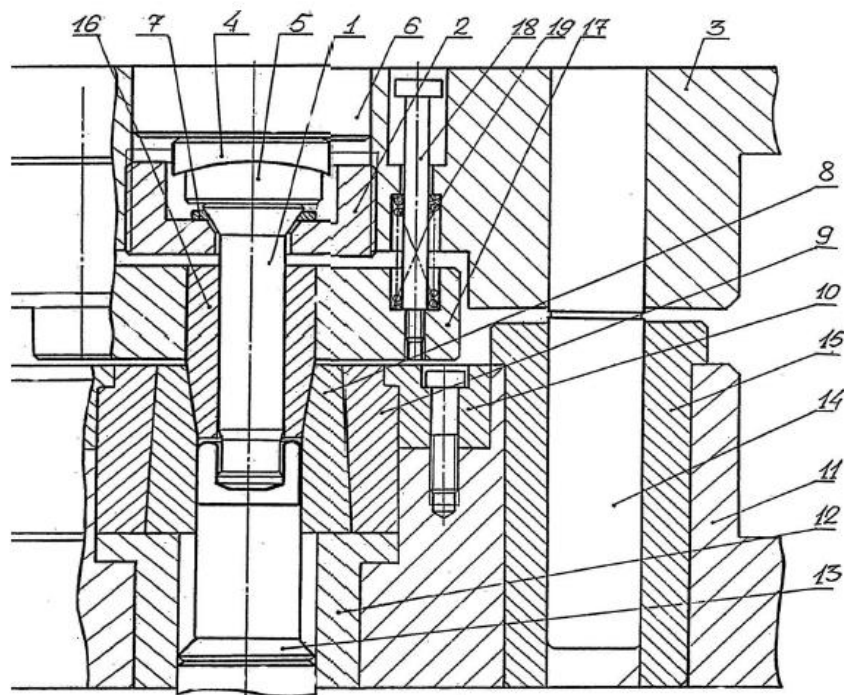


Рисунок 1.15 - Штамп для холодного зворотного видавлювання

## 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ

### 2.1 Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними блоками

Для аналізу силового режиму деформування при комбінованому тристоронньому видавлюванні використовуємо енергетичний метод [15]. Об'єм металу, що деформується, умовно розбиваємо на низку кінематично-елементарних зон (рис. 2.1). Приймаємо, що деформований матеріал жорстко-пластичний та незміцнюваний ( $\sigma_i = \sigma_s$ ).

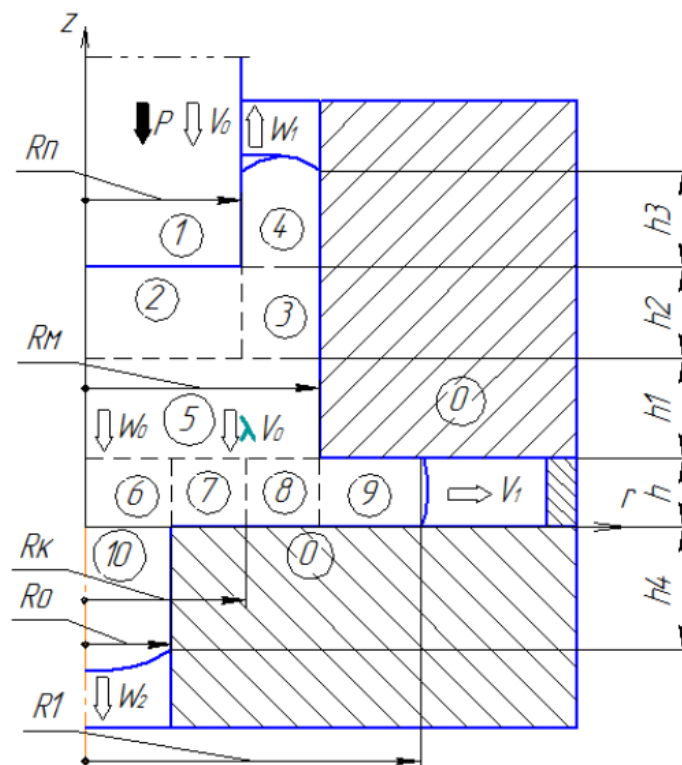


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема комбінованого тристороннього видавлювання

При комбінованому тристоронньому видавлюванні спостерігається наявність двох осередків деформації з жорсткою зоною між ними, яка врівноважується показником, що залежить від геометричних параметрів і

ступеня деформації  $\lambda$ . Верхній осередок деформації, сформований зворотною течією матеріалу, а нижній осередок деформації - радіально-прямою течією [16]. Особливістю радіально-прямого видавлювання є наявність межі поділу течії матеріалу у двох напрямках, яка описується параметром, що варіюється - радіусом  $R_k$ .

Розрахунок ведемо для кожного осередку окремо наприкінці приводячи до загального рівняння балансу потужностей. Для верхнього осередку деформації зону 5 приймаємо жорсткою, а для нижнього осередку деформації – як вхідну зону зі швидкістю переміщення –  $W_0$ . Встановлюємо граничні умови всім елементарних зон.

Кінематичні граничні умови для зон в осередках деформації представлені у табл. 2.1. Кінематично можливі поля швидкостей для осесиметричної задачі у загальному вигляді мають вид

$$\begin{aligned} v_z &= c_1 \cdot z + c_2 \\ v_r &= -\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot r + \frac{c_3}{r} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де  $c_1, c_2, c_3$  – постійні, що знаходяться із обумовлених кінематичних граничних умов.

Отримані кінематично можливі поля швидкостей для цієї схеми представлені в табл. 2.2.

Для розрахунку компонентів швидкостей та інтенсивності швидкостей деформацій використовуємо рівняння

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2}, \quad (2.2)$$

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

Тоді для зон 2, 3, 6, 7, 8, 9 значення компонентів та інтенсивності швидкостей деформацій мають вигляд, представлений у табл. 2.3, 2.4.

Таблиця 2.1 - Кінематичні граничні умови для осередків деформації

Зона	Координата	Скорість
2	$z = h + h_1$	$v_z = 0$
	$z = h + h_1 + h_2$	$v_z = -V_0$
	$r = R_M$	$v_r = \frac{V_0 \cdot R_M}{2h_2}$
3	$z = h + h_1$	$v_z = 0$
	$z = h + h_1 + h_2$	$v_z = -W_1 = \frac{-R_M^2 \cdot V_0}{(R_M^2 - R_N^2)}$
	$r = R_M$	$v_r = \frac{V_0 \cdot R_M}{2h_2}$
	$r = R_N$	$v_r = 0$
6	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$z = 0$	$v_z = -W_2 = \frac{W_0 \cdot R_K^2}{R_0^2}$
	$r = R_0$	$v_r = \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0 \cdot h}$
7	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$r = R_0$	$v_r = \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0 \cdot h}$
	$r = R_K$	$v_r = 0$
8	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$r = R_K$	$v_r = 0$
	$r = R_M$	$v_r = \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M \cdot h}$
9	$z = h$	$v_z = 0$
	$r = R_M$	$v_r = \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M \cdot h}$
	$r = R_1$	$v_r = -V_1 = \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_1 \cdot h}$

Таблиця 2.2 - Кінематично можливі поля швидкостей для осередків деформації

Зона	$v_z$	$v_r$
2	$-\frac{V_0}{h_2} \cdot z + \frac{V_0 \cdot (h_1 + h)}{h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot r$
3	$\frac{V_0}{h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot (z - h_1 + h)$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \left( \frac{R_M^2}{r} - r \right)$
6	$-\frac{W_0}{h} \cdot z + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} \cdot z - W_0$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h} \cdot r$
7	$-\frac{W_0}{h} \cdot z$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r}$
8	$-\frac{W_0}{h} \cdot z$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r}$
9	0	$-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r}$

Таблиця 2.3 - Значення компонентів швидкостей деформації

Зона	$\dot{\varepsilon}_z$	$\dot{\varepsilon}_r$	$\dot{\varepsilon}_\theta$
2	$\frac{V_0}{h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2}$
3	$\frac{V_0 \cdot R_n^2}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)}$	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} - \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$
6	$-\frac{W_0}{h} + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h}$
7, 8	$-\frac{W_0}{h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
9	0	$\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$	$-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$



Таблиця 2.4 - Значення інтенсивності швидкостей деформацій

Зона	$\dot{\varepsilon}_i$
2	$\frac{V_0}{h_2}$
3	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} - \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$
6	$-\frac{W_0}{h} + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h}$
7, 8	$\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
9	$\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$

Значення тиску деформування  $p$  визначаємо з рівняння балансу потужностей зовнішніх та внутрішніх сил на кінематично можливих швидкостях переміщень

$$N_a = N_d + N_c + N_t, \quad (2.3)$$

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

Які в даному випадку набувають вид

$$N_a = N_{\partial 2} + N_{\partial 3} + N_{c2-3} + N_{c2-5} + N_{c3-4} + N_{m3-0} + N_{m1-4} + N_{m1-2} + N_{m4-0} \quad (2.4)$$

для верхнього осередку деформації та

$$N_a = N_{\partial 6} + N_{\partial 7} + N_{\partial 8} + N_{\partial 9} + N_{c5-6} + N_{c6-10} + N_{c5-8} + N_{c6-7} + N_{c7-8} + N_{c8-9} + \\ + N_{m10-0} + N_{m7-0} + N_{m8-0} + N_{m9-0} \quad (2.5)$$

для нижнього осередку,

де  $N_a$  - потужність активних сил;

$N_{\partial i}$  - потужність сил деформування;

$N_{ci}$  – потужність сил зрізу;

$N_{mi}$  – потужність сил тертя.

Тоді загальний вигляд рівняння енергетичного балансу для тристороннього комбінованого видавлювання матиме вигляд [17]

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_1 - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \bar{p}_2 \cdot \frac{R_M}{R_n}. \quad (2.6)$$

Рівняння балансу для тристороннього видавлювання має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{p} = (1 - \lambda) \cdot & \left[ 1 + \left( \frac{h + h_2}{2 \cdot h_2} \cdot \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) + \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)} + \\ & \left. + \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] \right] - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \\ & + \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \left[ \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) + \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) + \\ & \left. + \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) \right]. \quad (2.7) \end{aligned}$$

Для схеми встановлено оптимальні значення межі поділу течії металу  $R_K = R_0 + t \cdot (R_M - R_0)$  з урахуванням параметра  $t \in (R_0; R_M)$ , де  $t = 0,23$  в нижньому осередку деформації, при якому наведений тиск процесу мінімальний (рис. 2.2).

За результатами розрахунків та із застосуванням оптимального значення критичного радіусу були отримані графічні залежності енергосилових параметрів тристороннього комбінованого видавлювання (рис. 2.3)

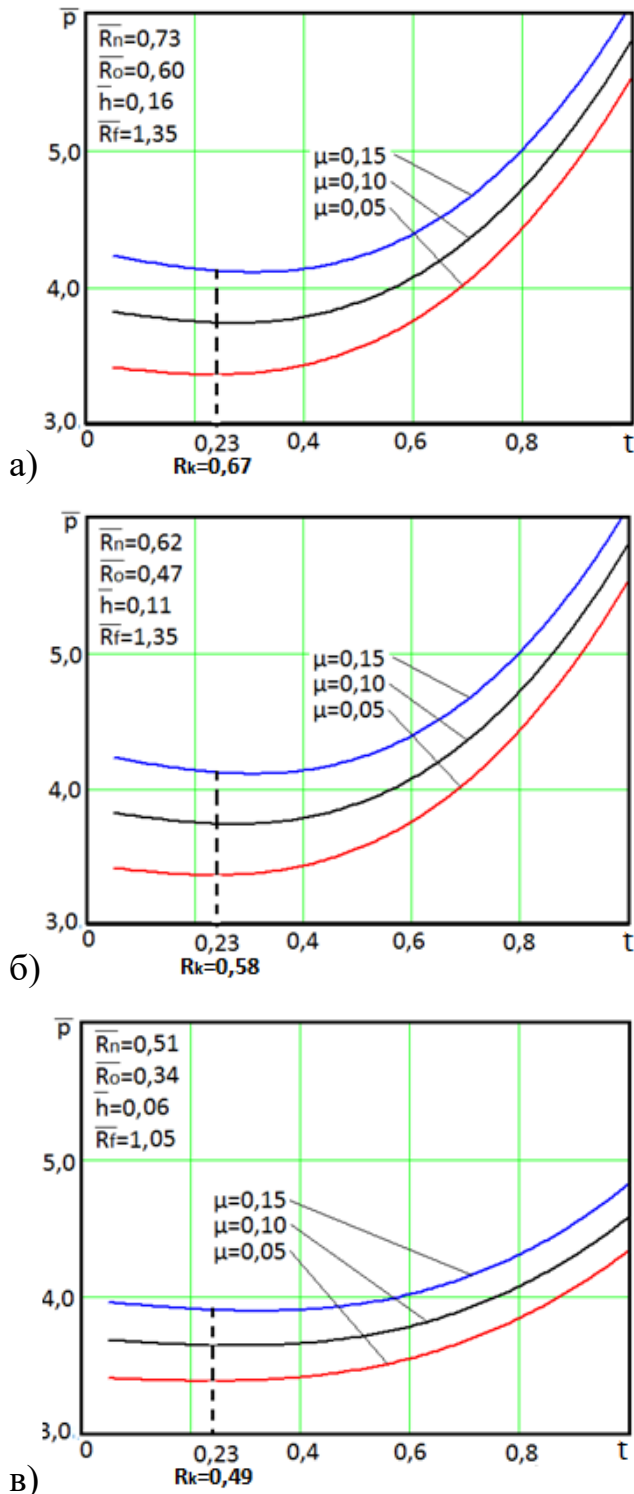


Рисунок 2.2 - Графіки залежності приведенного тиску від відносного критичного радіусу при різних значеннях тертя  $\mu$  і відносних геометричних параметрів

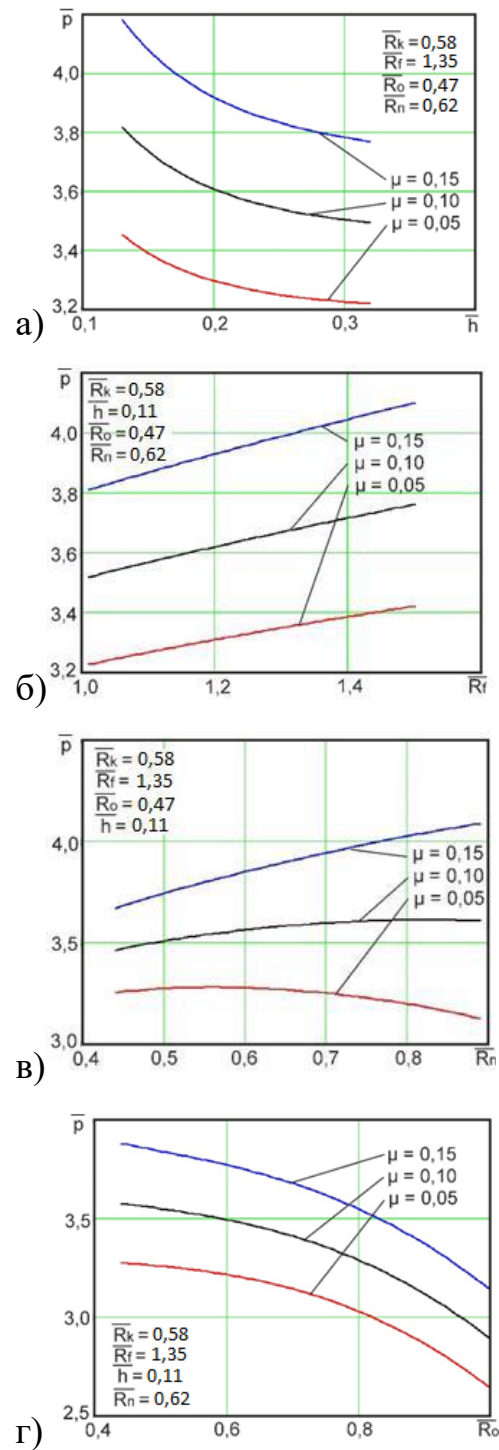


Рисунок 2.3 - Графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця (а), від відносного радіусу фланця (б), від відносного радіусу пуансону (в) та від відносного радіусу відростка (г) при різних значеннях тертя  $\mu$

## 2.2 Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями

Розглянута задача комбінованого тристороннього видавлювання в два етапи. Верхній осередок деформації є зворотним видавлюванням стакану (рис. 2.4)

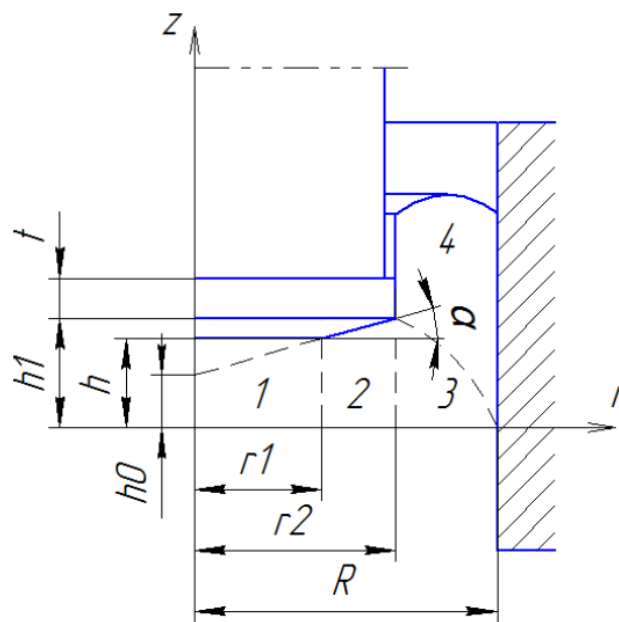


Рисунок 2.4 - Розрахункова схема зворотного видавлювання

Згідно з розрахунками [18] приведений тиск видавлювання, з урахуванням фаски на пуансоні має вигляд

$$P_{зв.в.} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\mu \cdot r_2}{12 \cdot h} + \frac{h}{r_2} + \frac{R - r_2}{a} + 3 \cdot \mu + 0,226 + \frac{b}{r_2^2} \cdot \left( b \cdot \ln \frac{a}{h} - 0,5 \cdot r_2 \right) \cdot (8 \cdot \mu - 1,57) + \right. \\ \left. + \frac{2}{R^2 - r_2^2} \cdot \left[ R^2 \cdot \ln \frac{R}{r_2} + 2 \cdot \mu \cdot t \cdot (R + r_2) + 2 \cdot a \cdot \left( \mu \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{R^3 - r_2^3}{R^2 - r_2^2} \right) \right] \right]$$

де  $a = h + 0,134 \cdot r_2$ ;  $b = 3,73 \cdot h - 0,5 \cdot r_2$ .

Нижній осередок деформації включає в себе приведений тиск  $p_2$

$$\begin{aligned}
\bar{P}_2 = & \left( \frac{R_K^2 - 2 \cdot R_0^2}{R_M^2} \right) + \left( \frac{R_K^2 - R_0^2}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_K}{R_0} \right| \right) + \left( \frac{R_M^2 - R_K^2}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_K} \right| \right) + \\
& + \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{R_M^3 - R_K^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_M - R_K)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
& + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( -\frac{R_K \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{(R_K^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0^2 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{h}{\sqrt{3} \cdot R_M} + \\
& + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{(R_K^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_K - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
& + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_K)}{h} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} \right).
\end{aligned} \tag{3.3}$$

нижнього осередку деформації зі схеми з прямолінійними блоками з додаванням двох нових кінематичних модулів, які представлені нижче.

Фаску на верхній матриці можна описати модулем, представленим на рис. 2.5.

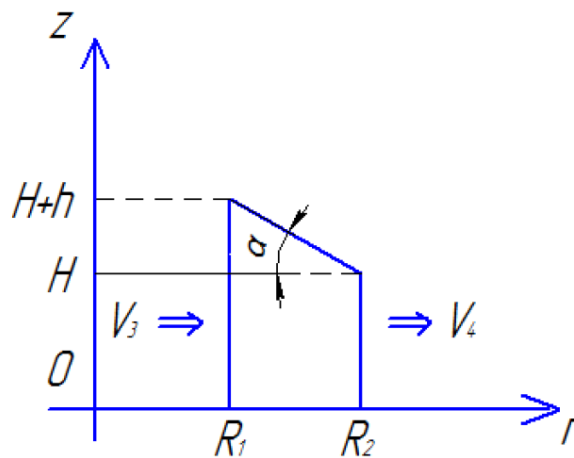


Рисунок 2.5 - Новий кінематичний модуль для розрахунку радіальної течії металу

Аналітично похила пряма описується залежністю

$$z(r) = -\frac{h}{R_2 - R_1} \cdot (r - R_1) + H + h,$$

де

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{h}{R_2 - R_1}.$$

Тоді  $z(r) = -tg(\alpha) \cdot (r - R_1) + H + h$ .

Кінематичні граничні умови для даного блоку

$$V_z \Big|_{z=0} = 0;$$

$$V_r \Big|_{r=R_1} = V_3;$$

$$V_r \Big|_{r=R_2} = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h)}{R_2 \cdot z(r)}.$$

Кінематично можливі поля швидкостей мають вид

$$V_z = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h) \cdot tg(\alpha)}{r \cdot z^2(r)} \cdot z;$$

$$V_r = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h)}{r \cdot z(r)}.$$

Значення компонентів швидкостей деформації

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h) \cdot tg(\alpha)}{r \cdot z^2(r)};$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h)}{r^2 \cdot z(r)};$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h) \cdot [z(r) + r \cdot tg(\alpha)]}{r^2 \cdot z^2(r)};$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h) \cdot tg(\alpha) \cdot z \cdot [z(r) + 2 \cdot r \cdot tg(\alpha)]}{r^2 \cdot z^3(r)}.$$

Тоді інтенсивність деформації має вид

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i^2 &= \frac{2}{9} \left[ \left( \dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_r \right)^2 + \left( \dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\theta \right)^2 + \left( \dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\theta \right)^2 + 1,5 \cdot \dot{\gamma}_{rz}^2 \right] = \frac{2}{9} \left[ V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h) \right]^2 \times \\ &\times \left[ \frac{6}{z^2(r) \cdot r^4} + \frac{2 \cdot tg^2(\alpha)}{r^2 \cdot z^4(r)} + \frac{6 \cdot tg(\alpha)}{r^3 \cdot z^3(r)} + 1,5 \cdot tg(\alpha) \cdot \frac{(z(r) + 2 \cdot r \cdot tg(\alpha))^2}{z^6(r) \cdot r^4} \right]. \end{aligned}$$

Запишемо потужності сил зрізу

$$N_{c.вх.} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \int_0^{H+h} V_r \Big|_{r=R_1} dz = \frac{\pi \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (H+h)}{\sqrt{3}};$$

$$N_{c.вих.} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \int_0^H V_r \Big|_{r=R_2} dz = \frac{\pi \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (H+h)}{\sqrt{3}}.$$

Потужності сил тертя

$$N_{\text{тп}} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \mu_s \int_0^{2\pi} d\theta \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r \cdot z(r)} r dr =$$

$$= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{H+h}{H} \right|;$$

$$N_{\text{тнх}} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \mu_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)) \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r \cdot z(r)} r dr =$$

$$= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot V_3 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)) \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right|.$$

Потужність сил деформування

$$N_{\partial} = 2\pi \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \times$$

$$\left[ \left( N \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right) \cdot \left( \frac{6 + 0.5 \operatorname{tg}^2(\alpha)}{2 \cdot N} \cdot \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (2.5 \operatorname{tg}^2(\alpha) + 12)}{N^2} \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \right) \times$$

$$\times \left[ \ln \left| \frac{R_2}{R_1} \right| + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N} \cdot \left( \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_2)^2} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_1)^2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{4 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (2 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^2} \cdot \left( \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_2)} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_1)} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right| \right],$$

де  $N = H + h + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1$ .

Приведений тиск, після скорочення на  $\sigma_s V_3 \pi R_1 (H+h)$ , для даного блоку має вигляд:

$$\bar{p}_{2.1} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \left( \begin{aligned} & \left( N \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right) \cdot \left( \frac{6 + 0.5 \operatorname{tg}^2(\alpha)}{2 \cdot N} \cdot \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \right. \\ & + \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (2.5 \operatorname{tg}^2(\alpha) + 12)}{N^2} \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \times \\ & \times \ln \left| \frac{R_2}{R_1} \right| + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N} \cdot \left( \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2)^2} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1)^2} \right) + \\ & + \frac{4 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (2 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^2} \cdot \left( \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2)} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1)} \right) + \\ & \left. + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right| \right) + \\ & + \frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{H+h}{H} \right| + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right| \end{aligned} \right)$$

Фаску на нижній матриці описуємо модулем представленим на рис. 2.6.

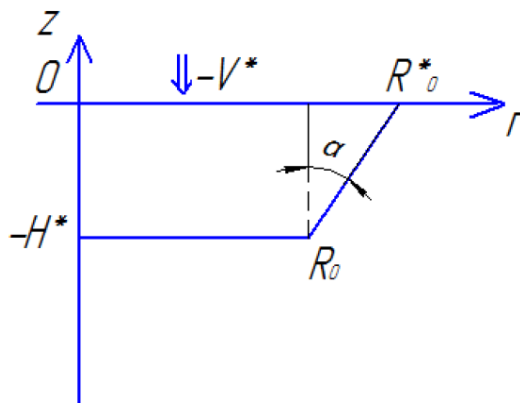


Рисунок 2.6 - Новий кінематичний модуль для розрахунку прямої течії металу

Загальна схема розбиття осередків деформації комбінованого тристороннього видавлювання із застосуванням трапецеїдальних модулів показано на рис. 2.7.

Загальний вид рівняння енергетичного балансу потужностей для тристороннього комбінованого видавлювання з трапецеїдальними модулями буде мати вигляд:

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_{\text{обр.в.}} - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot (\bar{p}_2 + \bar{p}_{2.1} + \bar{p}_{2.2}),$$



де

$$\lambda = \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_1 + G + (\bar{p}_2 + \bar{p}_{2.1} + \bar{p}_{2.2})};$$

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

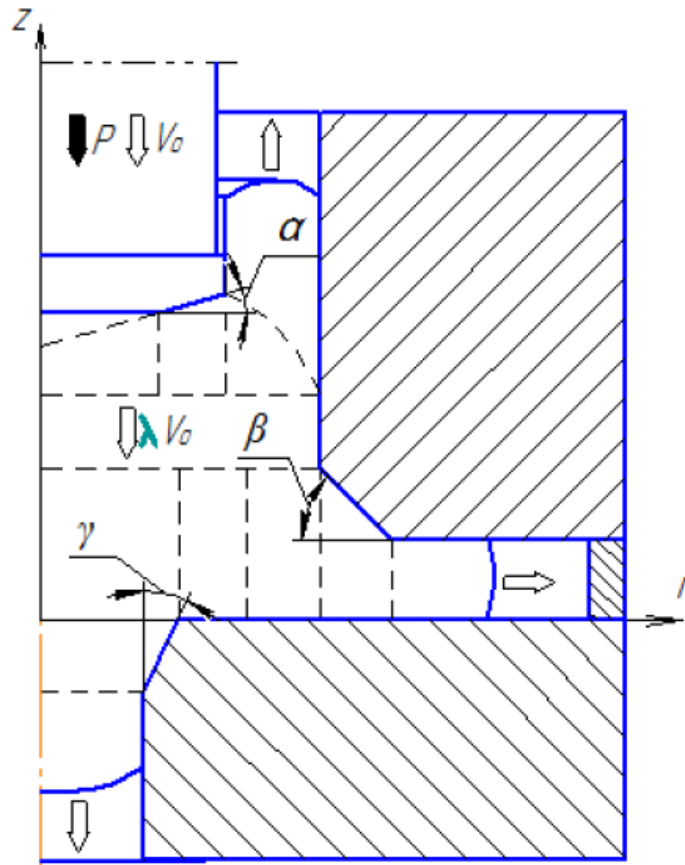


Рисунок 2.7 - Розрахункова схема комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями

Для схеми з фасками на інструменті встановлено оптимальне значення межі поділу течії металу  $R_k = R_o \cdot (1 + tg\gamma) + t \cdot (R_m - R_o \cdot (1 + tg\gamma))$  з урахуванням параметра  $t \in (R_o \cdot (1 + tg\gamma); R_m)$ , де  $t = 0,25$  у нижньому осередку деформації, при якому наведений тиск процесу мінімальний (рис. 2.8).

Графіки залежності приведенного тиску від різних геометричних параметрів для схеми з трапецеїдальними модулями показані на рис. 2.9 мають схожий характер із графіками залежності для прямолінійних блоків.

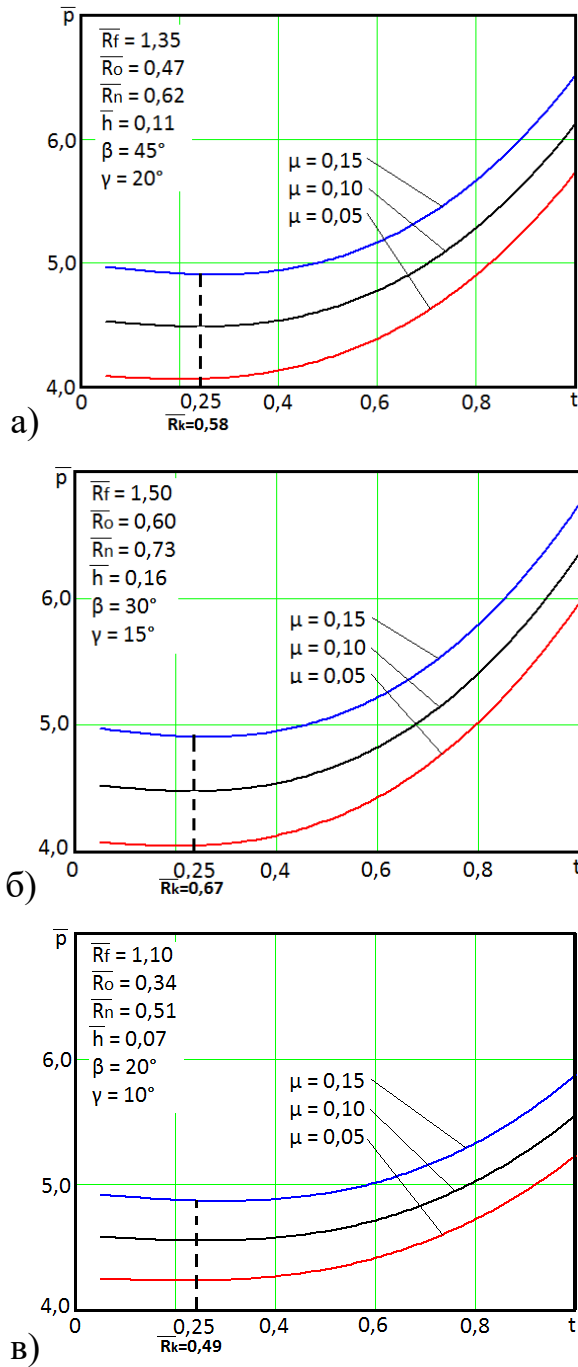


Рисунок 2.8 - Графіки залежності приведенного тиску від відносного критичного радіусу при різних значеннях тертя  $\mu$  і відносних геометричних параметрах для комбінованого видавлювання схеми з фасками на інструменті

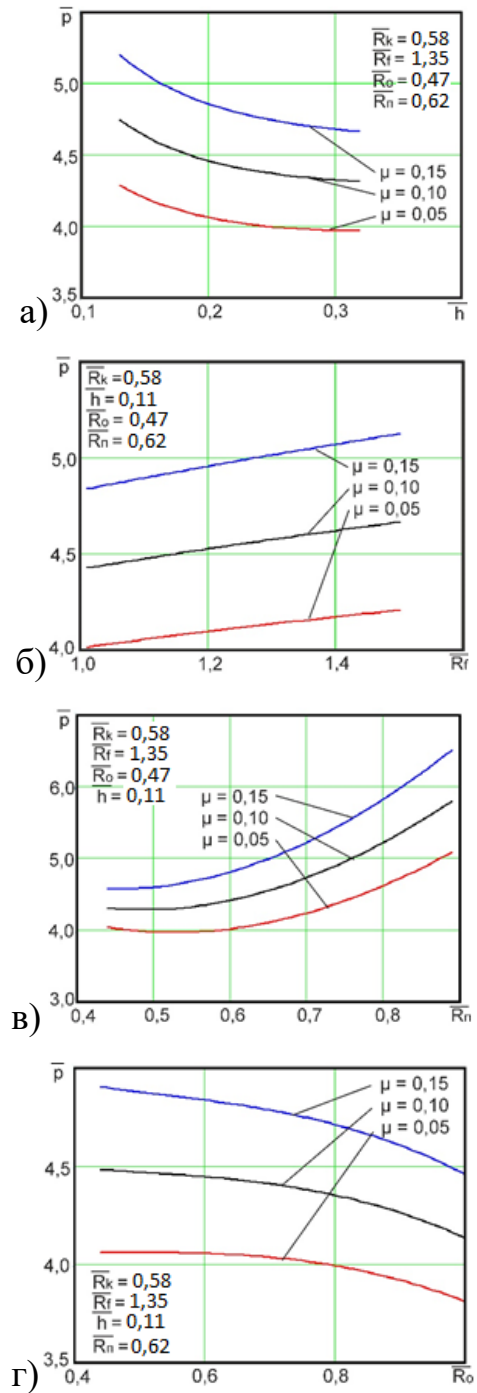


Рисунок 2.9 - Графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця (а), від відносного радіусу фланця (б), від відносного радіусу пуансону (в) та від відносного радіусу відростка (г) при різних значеннях тертя  $\mu$  схеми з трапецеїдальними модулями

### 2.3 Дослідження силового режиму при комбінованому тристоронньому видавлюванні методом планування експерименту

Для моделювання напружено-деформованого стану, силового режиму та формозміни в даний час широко використовують метод кінцевих елементів [19].

Моделювання процесу комбінованого видавлювання проводилося у програмному продукті QForm 2D. Граничні умови для осесиметричної задачі були задані в наступному вигляді: зміцнення алюмінієвого матеріалу АД1 описано кривою зміцнення  $\sigma_s=141,9 \cdot e^{0,26}$  МПа, свинцевого сплаву С1 -  $\sigma_s=25 \cdot e^{0,19}$  МПа при швидкості деформування  $0,25 \text{ с}^{-1}$ , щільність матеріалу  $\rho_{\text{АД1}}=2800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{С1}}=11340 \text{ кг/м}^3$ ; коефіцієнт тертя  $\mu_s=0,16$ ; швидкість переміщення інструменту  $1 \text{ мм/с}$ ; інструмент абсолютно твердий.

Для визначення залежності сили видавлювання та сили розкриття матриці від різних параметрів процесу використовувався метод планування експерименту (повний факторний експеримент  $3^3$  другого порядку з добудовою конструкції плану) [20]. Варіювалися наступні параметри: відносна висота фланця  $\bar{h} = \frac{h_f}{d_m}$ , відносний радіус пуансона  $\bar{D}_n = \frac{d_n}{d_m}$  і відносний радіус отвору відростка  $\bar{D}_0 = \frac{d_0}{d_m}$ , де:  $d_m$  - діаметр матриці (заготовки);  $d_0$  - діаметр отвору для формування відростка;  $d_n$  - діаметр пуансону. Інтервали варіювання факторів та їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому та нижньому рівнях зазначені у таблиці рівнів факторів (табл. 2.5).

Методом планування експерименту було отримано залежності приведенного тиску видавлювання та приведенного тиску розкриття матриці

$$Y(\bar{p}; \bar{q}) = b_0 + b_1 \cdot \bar{d}_n + b_2 \cdot \bar{h} + b_3 \cdot \bar{d}_o + b_4 \cdot \bar{d}_n \cdot \bar{h} + b_5 \cdot \bar{d}_n \cdot \bar{d}_o + b_6 \cdot \bar{h} \cdot \bar{d}_o + b_7 \cdot \bar{d}_n^2 + b_8 \cdot \bar{h}^2 + b_9 \cdot \bar{d}_o^2, \quad (3.4)$$

від факторів, що варіюються, де  $b_i$  - постійні коефіцієнти рівняння регресії (табл. 2.6).

Таблиця 2.5 - Рівні факторів

Фактори	$x_1 (\bar{h})$	$x_2 (\bar{D}_0)$	$x_3 (\bar{D}_n)$
Основний рівень ( $X_{i_0}$ )	0,111	0,471	0,626
Інтервал варіювання ( $\Delta X_i$ )	0,044	0,133	0,111
Верхній рівень ( $x_i=1$ )	0,155	0,604	0,737
Нижній рівень ( $x_i=-1$ )	0,067	0,338	0,515

Таблиця 2.6 - Коефіцієнти рівняння регресії

$b_i$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
$\bar{p}$	9,026	-4,25	-32,9	-2,87	-13,4	0,43	-22,3	4,05	174,4	3,49
$\bar{q}$	17,5	-72	-46,6	52,36	-26,1	-3,49	0,96	59,1	140,6	-56,2

На рис. 2.10–2.15 наведено залежності наведеного тиску видавлювання та наведеного тиску розкриття матриці від відносної висоти фланця, діаметра пуансона і діаметра відростка при різних параметрах процесу.

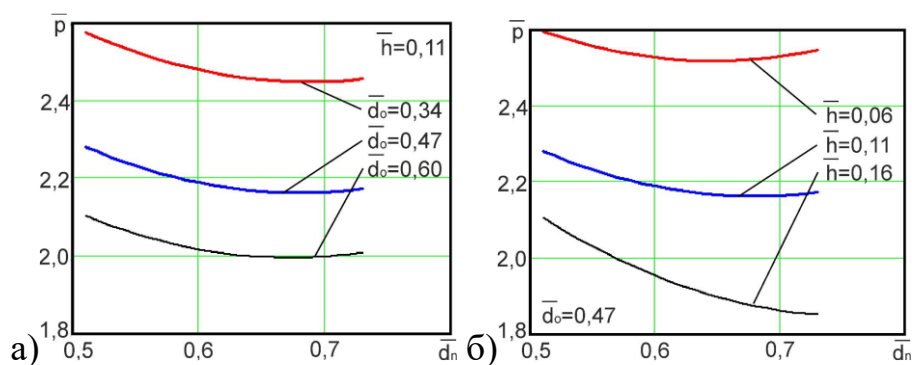


Рисунок 2.10 - Графік залежності приведенного тиску від діаметра пуансона при різних значеннях діаметра відростка (а) та висоти фланця (б)

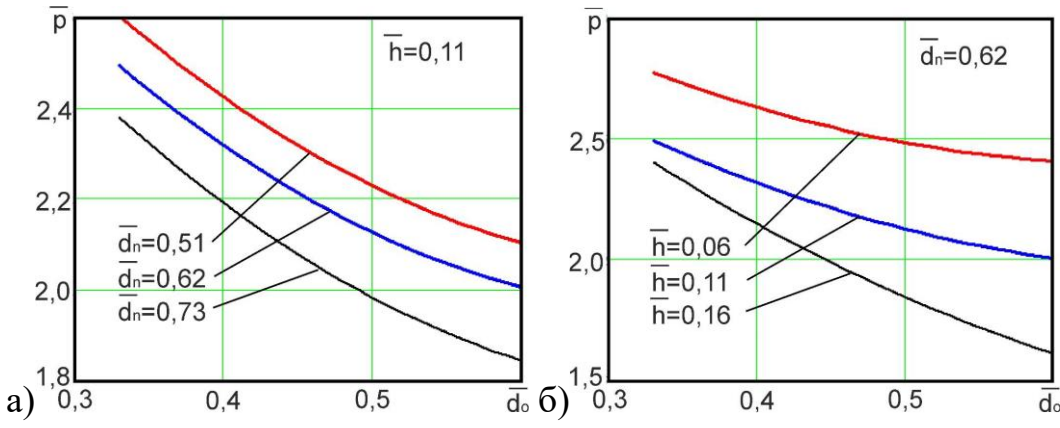


Рисунок 2.11 - Графік залежності приведенного тиску від діаметра відростка при різних значеннях діаметра пуансона (а) та висоти фланця (б)

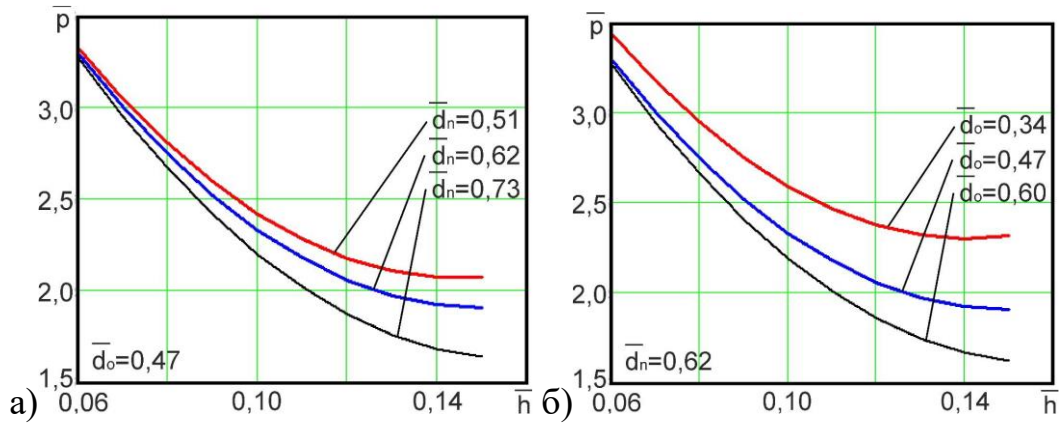


Рисунок 2.12 - Графік залежності приведенного тиску від висоти фланця при різних значеннях діаметра пуансона (а) та діаметра відростка (б)

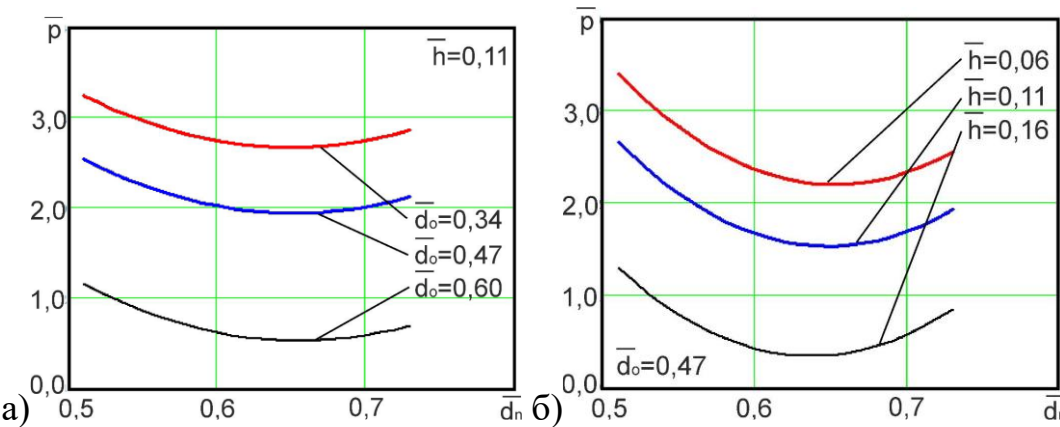


Рисунок 2.13 - Графік залежності приведенного тиску розкриття матриці від діаметра пуансона при різних значеннях діаметра відростка (а) та висоти фланця (б)

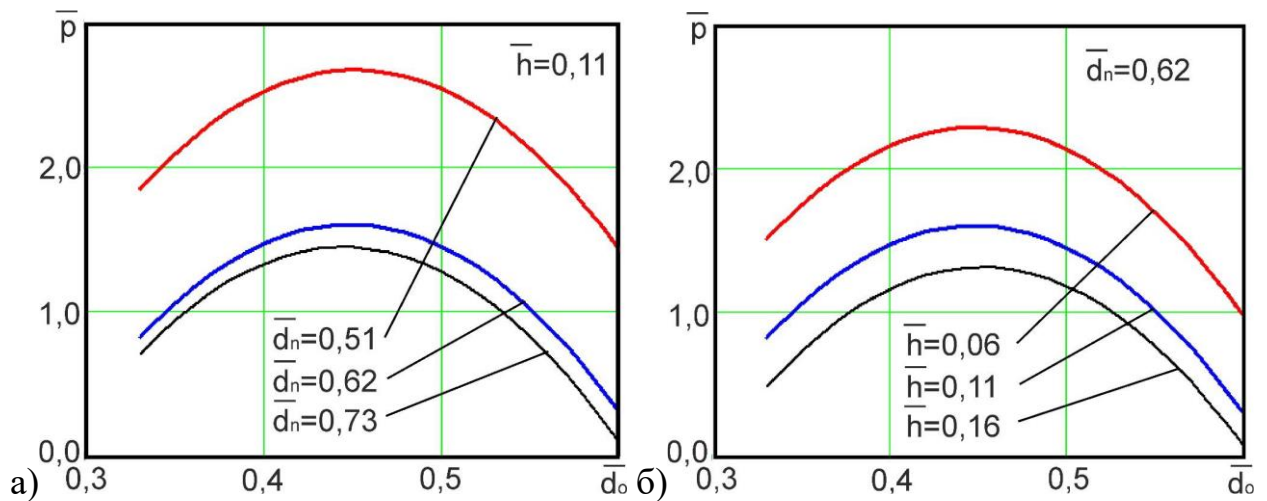


Рисунок 2.14 - Графік залежності приведенного тиску розкриття матриці від діаметра відростка при різних значеннях діаметра пуансона (а) та висоти фланця (б)

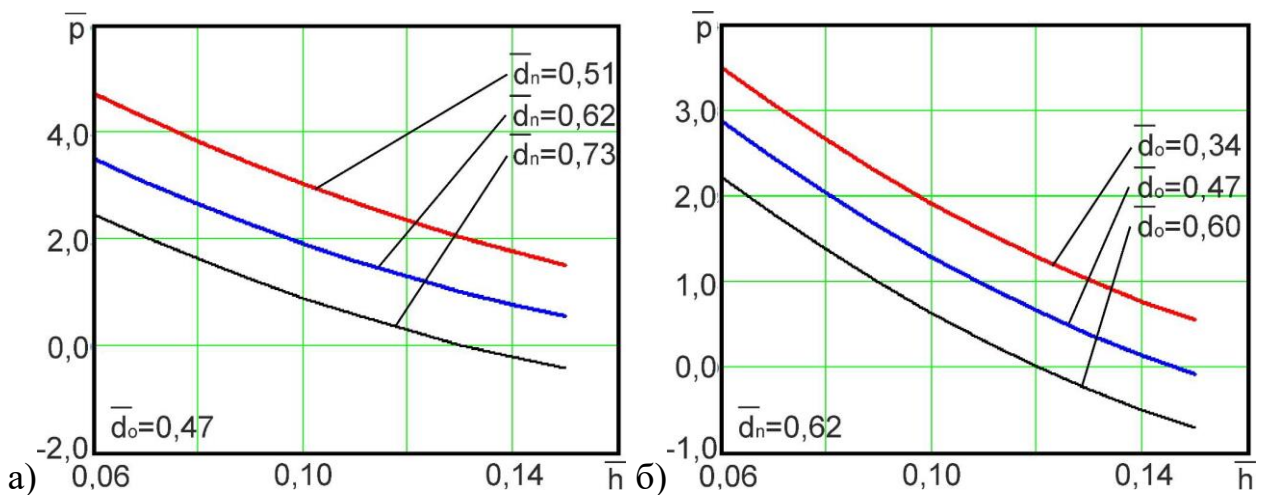


Рисунок 2.15 - Графік залежності приведенного тиску розкриття матриці від висоти фланця за різних значень діаметра пуансона (а) та діаметра відростка (б)

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. 2.16), 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.

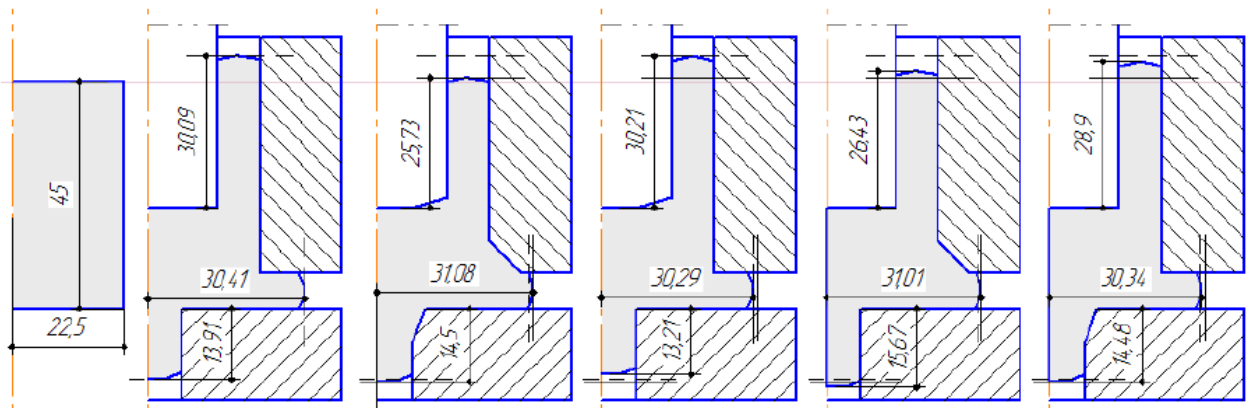


Рисунок 2.16 - Вплив фасок інструменту на формозміну заготовки

Проведено порівняння кінцевої формозміни заготовки по ходу процесу, отримані методом кінцевих елементів та енергетичним шляхом балансу потужностей. Порівняння проведено для схеми, що не враховує фаски на інструменті та для схеми з урахуванням фасок на інструменті. Зіставлення отриманих результатів показує розбіжність прирощень деталі трохи більше 7%. Більш завищені результати отримано енергетичним методом балансу потужностей, що пов'язано з великою кількістю припущень під час розрахунку.

### 3 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ТА ШТАМПОВЕ ОСНАЩЕННЯ

#### 3.1 Методика проектування процесів видавлювання

Сучасні методики проектування технологічних процесів засновані на системному підході до вирішення поставлених завдань та на концепції групового методу організації виробництва деталей [21]. При цьому глобальною метою проектування технології є розробка найбільш ефективного (переважного) процесу. Під час розробки технологічного процесу видавлювання, у тому числі комбінованого тристороннього деформування, доцільно використовувати методику, представлену на рис. 5.1.

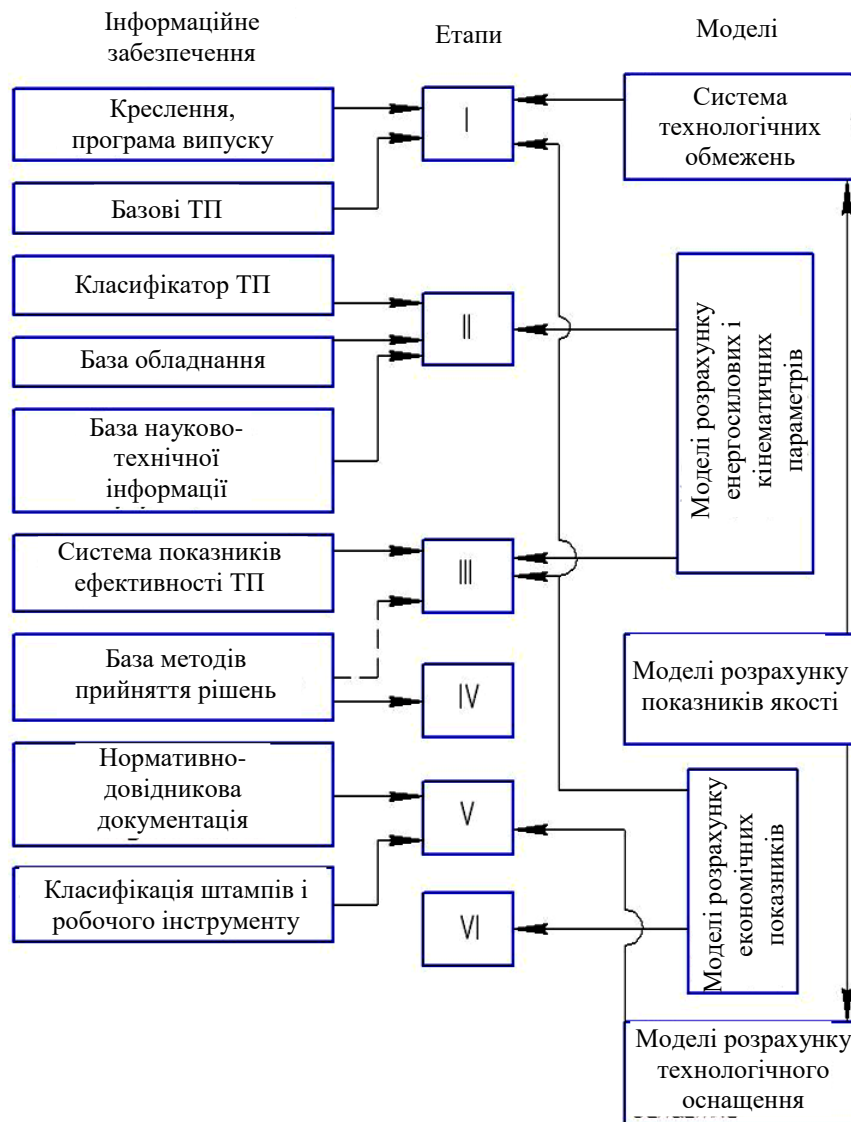


Рисунок 3.1 - Схема проектування технологічних процесів



Науково-методичні засади сучасних методик проектування технологічних процесів базуються на концепції групового методу організації виробництва деталей та системний підхід до розв'язку поставлених задач. Сутність методики стосовно розробки технологічних процесів виготовлення точних об'ємних заготовок видавлюванням пояснюється удосконаленою схемою проектування процесів, в основу якої лягли відомі алгоритми розробки технологій штампування. Запропонована методика проектування технологічних процесів передбачає шість основних етапів проектування технологій.

Перший етап проектування технологічного процесу – конструкторсько-технологічна класифікація деталей. До складу вихідної інформації, необхідної для цієї класифікації, входять креслення деталей та відомості про програми випуску, базові процеси та складі технологічного обладнання. На цьому етапі необхідно: визначити з урахуванням специфіки підприємства найбільш значущі критерії класифікації; згрупувати деталі в окремі групи, які мають наявність класифікаційних ознак: оцінити можливість виготовлення кожної деталі видавлюванням; видалити ті деталі, які неможливо виготовити штампуванням видавлюванням. Найбільший габаритний розмір деталей, мінімальна товщина характерних елементів деталі (стінки, фланця або відростка) та річна програма випуску деталей найбільшою мірою визначають можливість штампування, обладнання та показники ефективності освоєння нової технології. Керуючись цими ознаками необхідно віднести деталь, що розробляється, до однієї з підгруп. Можливість виготовлення деталей різними технологічними способами штампування оцінюється в першому наближенні за допомогою баз обмежень, що містять спрощені розрахункові співвідношення чи рекомендації для встановлення значень ознак, якими обмежено впровадження технологічних процесів видавлювання [22].

Вирішення поставлених задач дозволяє виділити основні типи деталей, які можна перевести на штампування видавлюванням. Подальше проектування

процесів проводиться не для кожної деталі окремо, а для деталей - характерних представників групи.

Задачами другого етапу є розробка можливо повнішого набору варіантів альтернативних технологічних процесів при цьому попередньо проаналізувавши їх та виключивши свідомо неефективні варіанти. У результаті виконання другого етапу повинні бути розроблені набори варіантів послідовних технологічних переходів видавлювання, відповідні ескізи оснастки та склад обладнання.

У разі необхідності аналізу складних схем формоутворення з неоднозначною кінематикою течії металу використовуються розрахункові програми, засновані на енергетичному підході та аналізі кінематично можливих полів пластичної течії [23].

Третій етап – визначення системи оцінки ефективності альтернативних процесів. Вихідною інформацією для цього етапу є узагальнена система показників ефективності технологій та сукупність методів ухвалення рішень. Для оцінки ефективності процесів видавлювання система містить п'ять узагальнених критеріїв: завершеність формоутворення деталей, тиск деформування, технічний рівень процесу, економічна та організаційна ефективність [24].

Для визначення завершеності формоутворення та розрахунку енергосилових характеристик рекомендується застосувати розроблене програмне забезпечення. Програма «Energy Model» призначена для побудови розрахункової схеми процесу, вибору полів швидкостей та розрахунку енергетичним методом силового режиму комбінованого процесу видавлювання (рис. 5.2) [25]. Мова розробки – Object Pascal, засіб розробки – програмне середовище Turbo Delphi Explorer.

Основними операціями, що виконуються за програмою, є:

- вибір одного з можливих типів кінематичних модулів, що задовольняють поведінку течії металу у певній зоні деформації;

- визначення геометричних параметрів та меж кінематичного модуля в системі координат модельованого процесу, а також напрямків течії та розривів швидкостей;
- розрахунок потужностей сил деформування, зрізу та тертя;
- варіювання параметрів процесу у певному діапазоні та дослідження їхнього впливу на тиск деформування (з побудовою графіків).



Рисунок 3.2 - Послідовність дій під час роботи програми

Введення вихідних параметрів, відбір та коригування кінематичних модулів та розгляд результатів роботи програми можливий у діалоговому режимі. В якості вихідних даних, і даних якими можна варіювати, вибрані радіус і висота заготовки, радіус відростка, радіус пуансона, висота фланця, коефіцієнт тертя за законом Зібеля та хід активного пуансону. Також можна вибрати бажану кількість кроків розрахунку, які будуть відповідати числу точок, відображених на отриманих графіках. За підсумками розрахунку програма будує графік приведенного тиску деформування (рис. 3.3) та графік збільшення розміру за трьома напрямками течії матеріалу (рис. 3.4).

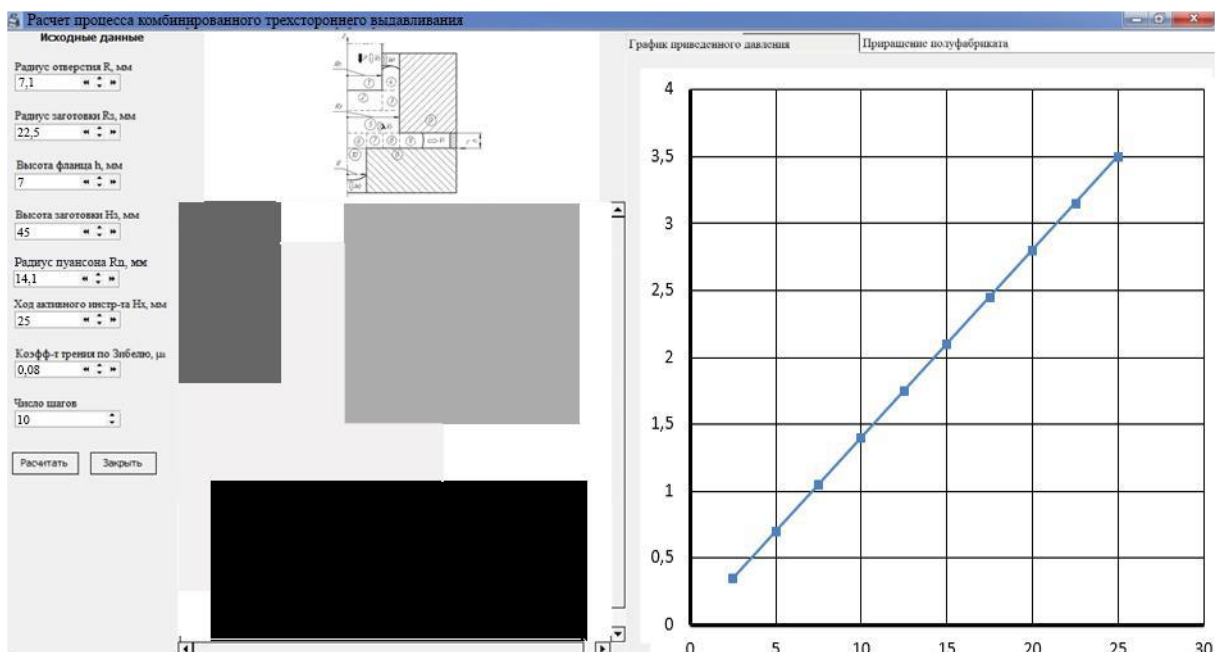


Рисунок 3.3 - Головне вікно програми із введенням вихідних даних та перегляд результатів розрахунку приведенного тиску деформування

В якості бази даних для процесів видавлювання рекомендується застосовувати карти маршрутних технологій та альтернативних технологічних варіантів виготовлення деталей типових конструкцій [26].

Крім того, проведені теоретичні розрахунки дозволяють оцінити також приведений тиск комбінованого тристороннього видавлювання на основі традиційних методів. Рекомендується використовувати розрахункову залежність (3.5), та залежність (3.6), яка враховує наявність фасок на інструменті.

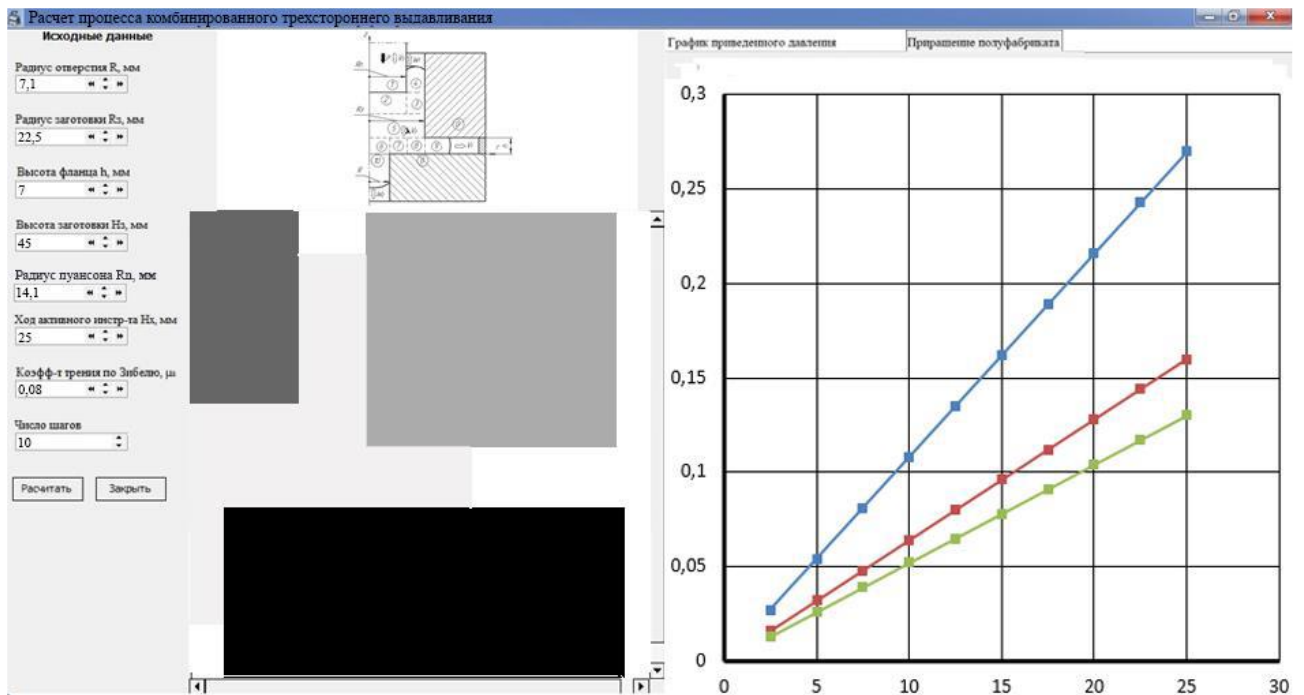


Рисунок 3.4 - Головне вікно програми із введенням вихідних даних та перегляд результатів розрахунку збільшення розмірів за трьома напрямками

Четвертий етап проектування – вибір найбільш ефективного варіанта технологічного процесу - реалізується з використанням запропонованих критеріїв оцінки. Остаточне рішення щодо вибору прийняттого варіанту залишається за технологом за умови отримання кількісної оцінки всіх альтернатив [27].

Застосування одного формотворчого переходу дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу, зменшити кількість оснастки та підготовлених операцій.

П'ятий етап - розробка технологічного процесу та оснащення. У якості вихідної інформації використовують класифікатори штамів і змінних інструментів, з роз'ємними матрицями, а також нормативну та методичну документацію.

Шостим заключним етапом розробки технологічного процесу холодного об'ємного штампування видавлюванням, є розрахунок економічної ефективності від запровадження нового процесу видавлювання натомість базового варіанту.

### 3.2 Технологія та штампове оснащення для процесу радіально-прямозворотного видавлювання

Деталь типу стакан з фланцем та відростком є достатньо поширеною у машинобудуванні. До подібних деталей відносяться заготовки типу фітингів, штуцерів, корпусів, втулок, пробок та інші деталі з фланцями та відростками різних конфігурацій.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень видавлювання порожнистих деталей з фланцем була розроблена технологія штампування деталі (рис. 3.5). Вимоги щодо точності відповідають 14 кваліфікації. Деталь виготовляється із алюмінієвого сплаву АД31м.

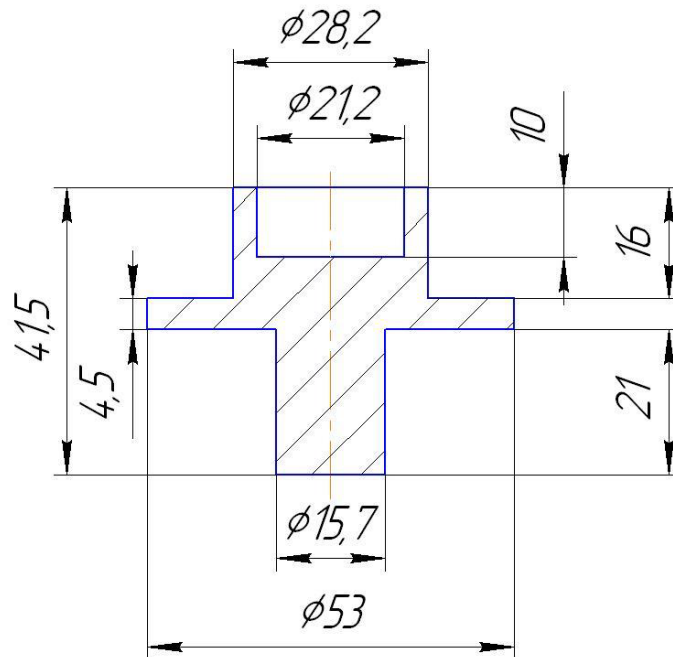
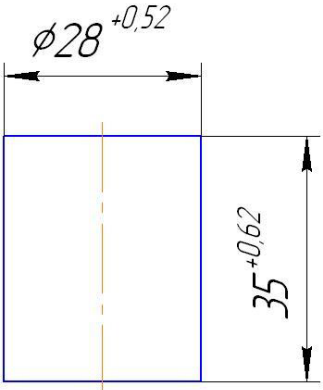
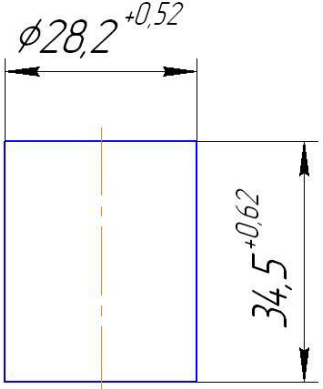
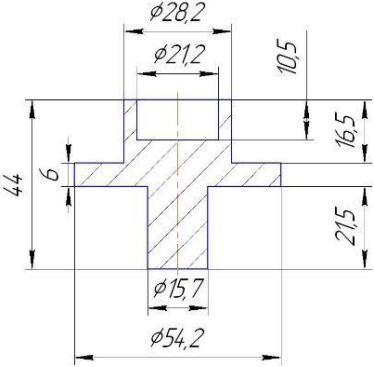
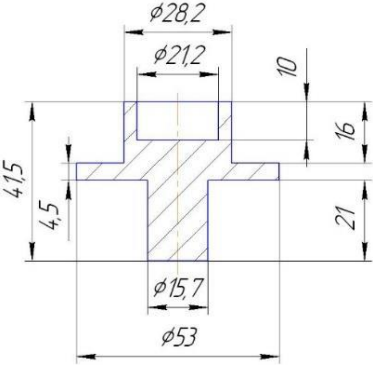


Рисунок 3.5 - Креслення деталі

Етапи виготовлення деталі за ресурсозберігаючою технологією, яка передбачає один формоутворюючий перехід – тристороннє видавлювання, представлені у табл. 5.1.

Нанесення мастила та підмастильного шару рекомендовано виконати згідно з технологією показаною в табл. 5.2.

Таблиця 3.1 - Технологія виготовлення деталі "втулка з фланцем"

Операційний ескіз	Найменування операції
	<p>Відрізка заготовки (матеріал АД1) зміщенням у відрізнному штампі з диференційним затискачем.</p> <p>Обладнання: автоматичний комплекс для різання прутків зусиллям 1600 кН.</p> <p>Зусилля різання 443 кН.</p>
Термообробка	Нагрів до 400 0С, витримка 1,5 год і охолодження на повітрі.
Підготовка поверхні	Анодування
Змащування	Нанесення мастила (технічний жир)
	Калібрування. Зусилля 150 кН
	<p>Комбіноване видавлювання заготовки.</p> <p>Заготовка: пруток <math>d_{\text{зовн}} = 28,2</math> мм;</p> <p>обладнання: кривошипний прес подвійної дії зусиллям 1600 кН.</p>
	Механічне доведення торців та фланця

Таблиця 3.2 - Схема підготовки підмастильного шару та нанесення мастила на заготовках

Операція	Компоненти	Масова концентрація, г/л	Режим обробки	
			Температура, °С	Час обробки, хВ
Промивання в холодній проточній воді				0,5-1
Обезжирення хімічне	Тринатрійфосфат (рідке скло)	50-60	80-100	0,083-0,1
		5-10	-	-
Промивання в гарячій проточній воді	<b>Вода</b>	-	80-100	1
Травлення	Сірчана кислота	110-160	50-70	15-20
	Натрієва селітра	20-30		
Промивання в холодній проточній воді	<b>Вода</b>	-	-	0,2-0,3
Промивання в гарячій проточній воді	<b>Вода</b>	-	80-100	1
Анодування	Сірчана кислота	190-200	20-25	15-25
Промивання в холодній проточній воді	<b>Вода</b>	-	-	0,2-0,3
Обробка в розчині хромпіка	Хромпик калієвий технічний	100-120	80-100	15-20
Промивання в холодній проточній воді	<b>Вода</b>	-	-	0,2-0,3
Промивання в гарячій проточній воді	<b>Вода</b>	-	60-100	0,2-0,3
Сушіння	-	-	80-120	15-20

На рис. 3.6 показаний штамп для комбінованого тристороннього видавлювання. Штамп складається з верхньої плити 1 і нижньої плити 18, до



яких прикріплено весь робочий інструмент. Між собою плити направляються за допомогою пари колонка 19 та втулка 20. На нижній плиті розташований контейнер 10, який прикріплений до плити по ковзній посадці і болтами 24. У контейнері розташовується складова матриця 10, підкладка 11, в яку вкручуються напрямні для тарілчастих пружин 12, пуансотримач 14, гартована прокладка 15 призначена для запобігання продавлюванню нижньої плити 18 пуансоном 16. В пуансотримачі є отвори під штовхачі, які впливають на виштовхувач 17. Пружини тарілчасті 13 призначені для знімання деталі з пуансона 16. До контейнера 10 за допомогою гвинтів 22 прикріплено кільце 9, яке запобігає виштовхуванню матриці 11 при дії на неї пружин 13.

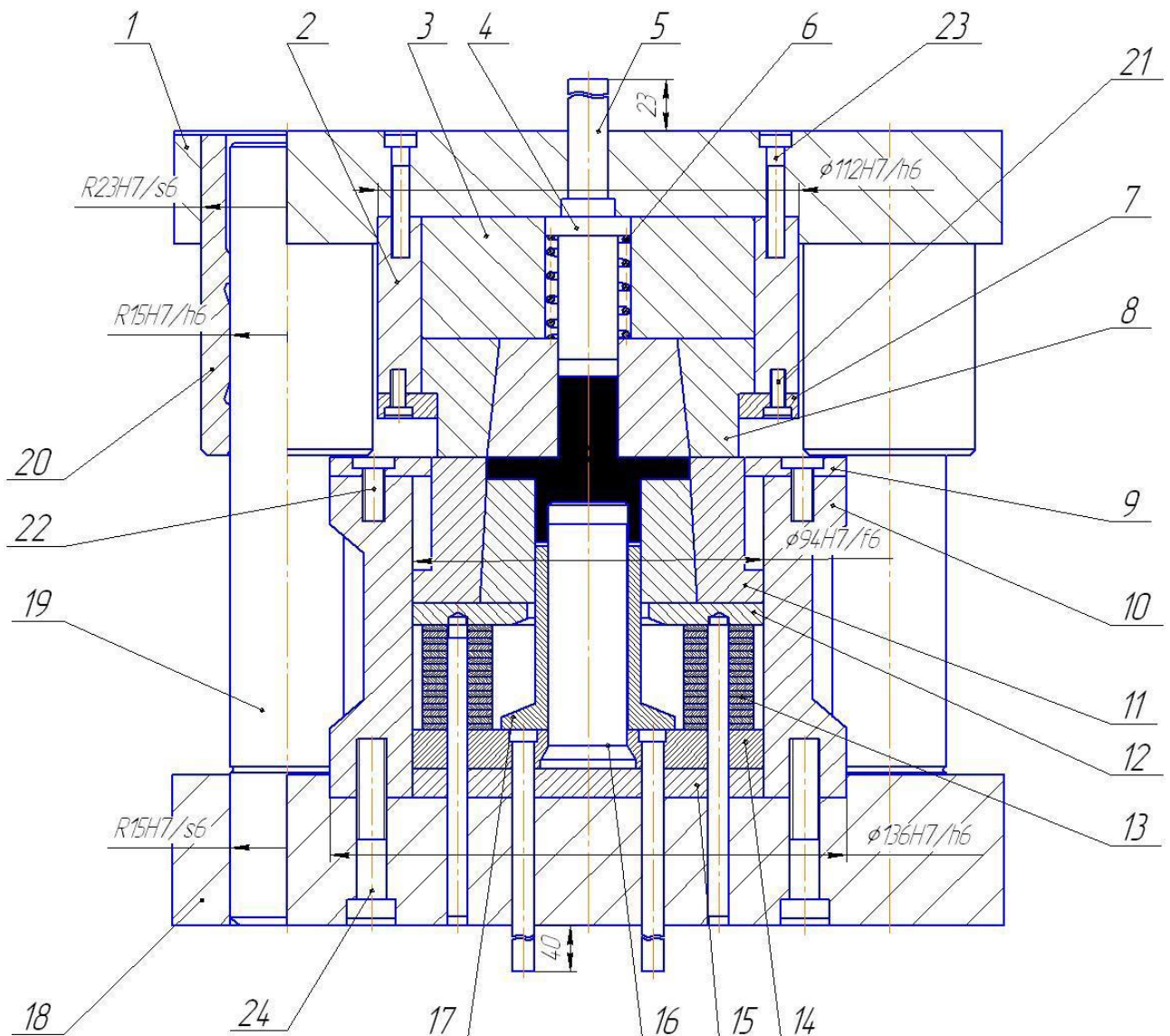


Рисунок 3.6 - Схема штампу для комбінованого видавлювання

До верхньої плити прикріплено контейнер 2 за допомогою посадки і гвинта 23, в якій розташовується кільце 3, на яке спирається складова матриця 8. Вміст контейнера 2 кріпиться за допомогою кільця 7 і гвинтів 21. Пружина 6 запобігає падінню виштовхувача 4. Товкач 5 призначений для виштовхування деталі з матриці 8, впливаючи через виштовхувач 4.

Штамп працює в такий спосіб. Заготовку встановлюють на протипуансон 16. Верхня плита штампа 1, закріплена в повзуні преса, при опусканні вниз утворює замкнуту порожнину для радіальної течії матеріалу у фланцеву зону матрицями 8 і 11. Тарілчасті пружини 13 забезпечують постійну висоту радіальної порожнини протягом видавлювання. Обмеження течії матеріалу в стінку склянки забезпечується наявністю виштовхувача 17. При робочому ході преса заготовка деформується протипуансоном 11 за схемою тристороннього видавлювання. Після закінчення деформування верхня плита повертається у вихідне положення. Знімання деталі, у разі її залипання на інструментах, здійснюється пружиною 6 та виштовхувачем 17 за рахунок штовхачів.

Загальним недоліком штампу є наявність тарілчастих пружин, які викликають складність у створенні необхідного зусилля для запобігання розкриття напівматриці. У свою чергу розкриття напівматриці може призвести до появи такого дефекту як задирок і збільшення необхідної висоти фланця, що може спричинити неправильне розподілення об'ємів металу в конфігураційних частинах деталей.

Оптимальним обладнанням для процесів видавлювання є спеціалізовані преси подвійної дії, які забезпечують необхідний хід та зусилля.

### **3.3 Розширення технологічних можливостей комбінованого видавлювання**

Найважливішою проблемою сучасного виробництва є отримання заготовок із заданими механічними властивостями, що може бути досягнуто такими видами обробки: видавлюванням з кількома ступенями свободи

витікання металу, видавлюванням з натягом, осадкою з крученням, гвинтовою екструзією, деформуванням з макрозсувами, протяжкою із зсувом тощо.

Встановлено ефективність комбінованих схем деформування з макрозсувами в задачах зниження сил деформування та підвищення рівномірності розподілу деформації [28]. Крім того, встановлено, що при комбінованому деформуванні (протяжка із макрозсувами) заготовки суттєво знижуються необхідні сили деформування. Також, встановлено позитивний вплив макрозсувів на перетворення кристалічної структури металу (рис. 3.7).

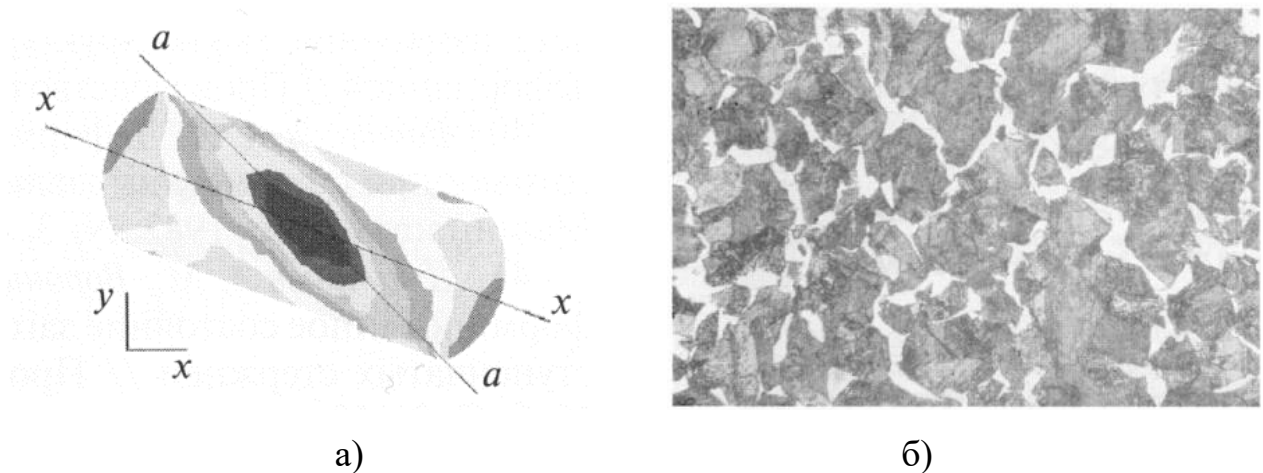


Рисунок 3.7 - Поперечний переріз заготовки (а) та мікроструктура заготовки із сталі 40Х(б) після комбінованого деформування протяжкою

Недоліком видавлювання порожнистих виробів, зокрема деталей типу стакан є неоднорідність механічних властивостей металу виробу. У той час, коли стінки склянки мають пропрацьований метал, у центральній зоні донної частини метал отримує лише незначні деформації. Особливо цей недолік проявляється у стаканах з великою товщиною дна, коли товщина дна дорівнює радіусу пуансона або більше за нього. Це і зумовлює неоднорідність механічних властивостей виробів.

В основу поставлена задача: розширення технологічних можливостей способу та покращення якості виробу за рахунок забезпечення опрацювання металу в його донній частині [29].

Поставлена мета досягається тим, що згідно з способом виготовлення виробів типу стакан деформуванням заготовки видавлюванням у матриці за допомогою пуансона, деформування відбувається у два етапи таким чином, що на першому етапі одночасно виконують зворотне видавлювання стінки стакану та пряме видавлювання з утворенням технологічного відростка в донній частині стакану, а на другому етапі відбувається витіснення металу з технологічного відростка назад у донну частину стакану.

Знакозмінна деформація, якій піддається метал у донній частині напівфабрикату - стакану за рахунок спочатку прямого, а потім зворотного видавлювання металу в донну частину, забезпечує гарне опрацювання цієї донної зони.

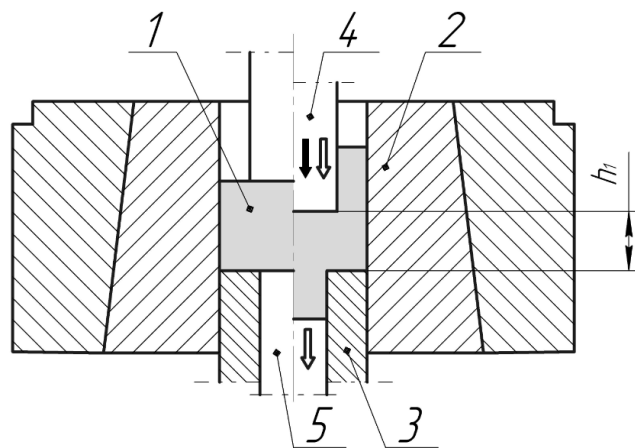
Особливо це доцільно для деталей із відносно товстим дном, товщина якого дорівнює або перевищує радіус пуансону (або товщини осередку інтенсивної деформації).

Забезпечення гарного опрацювання та зміцнення металу по всьому об'єму стакану, зниження нерівномірності деформації, забезпечує рівномірність і гарну якість виробів та їх експлуатаційну надійність і розширює можливості процесів видавлювання.

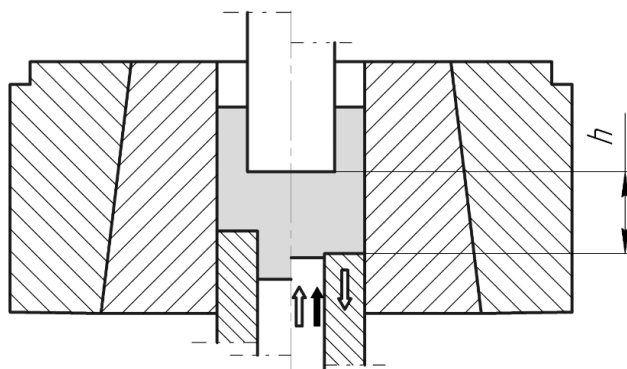
Вихідну заготовку 1 (відпалену та з підготовленою поверхнею) розміщують у матрицю 2 на торець контрпуансону 3. На першому етапі процесу деформування під впливом деформуючого рухомого пуансону 4 метал заготовки 1 видавлюється у зворотному напрямку з утворенням стінки та порожнистої частини виробу. Одночасно з цим у нижній частині заготовки метал видавлюється у прямому напрямку в порожнину, яка передбачена в контрпуансоні 3, що призводить до утворення в донній частині стакану технологічного відростка (рис. 3.8, а).

Перший етап деформування закінчується при досягненні розрахункової товщини напівфабрикату  $h_1$ , величина якої менша за задану товщину дна стакану  $h$  переважно у 1,5 - 2,0 раз.

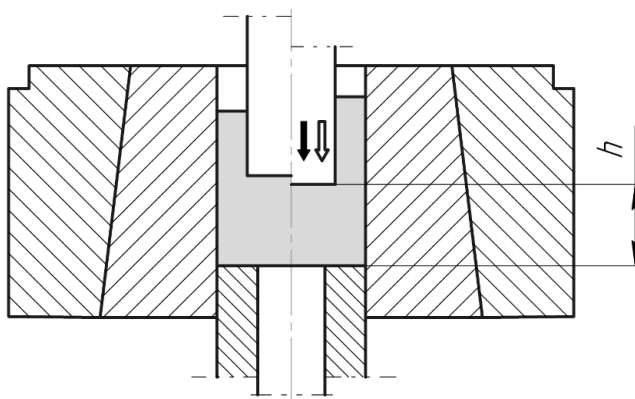
Далі здійснюється другий етап деформування, на якому з формованого технологічного відростка метал витісняється (видавлюється або прямує) назад у донну частину, що призводить до збільшення товщини дна стакану, що штампується, до величини  $h$ , тобто до заданого за кресленням значення. Для виконання цієї стадії процесу і силового впливу приводять в рух пуансон-штовхач 5, розміщений у порожнині контрпуансона 3 (див. рис. 3.8 б).



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 - Спосіб виготовлення деталі типу стакан

Після завершення двох етапів деформування рухомий пуансон 4 відводиться вгору, у вихідне положення, а деталь виштовхується з матриці рухом контрпуансона 3 або пуансона-штовхача 5 (див. рис. 3.8 в).

Потім цикл штампування продовжується.

Досягнення необхідної донної висоти стакану другого етапу деформування може бути забезпечене також додатковим синхронним опусканням контрпуансону. При цьому процес деформування схожий з методом радіального видавлювання.

Комбіноване зворотно-пряме видавлювання для першого етапу сприяє зниженню зусилля штампування.

На заключному етапі за необхідності здійснюють калібрування зворотним видавлюванням металу додатковим рухом пуансону.

Істотною перевагою запропонованого способу є можливість отримання тонкостінних виробів з більшою товщиною дна виробів типу стаканів з однорідністю механічних властивостей по перерізу стакану.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 4.1 Моделювання поетапного видавлювання порожнистих деталей з фланцем

Поетапна зміна деформованого стану при видавлюванні порожнистих деталей з фланцем та осьовим відростком у пакеті QForm наведено на рис. 4.1. З рисунка видно, що найбільша деформація виникає у кромки нижньої напівматриці при отриманні відростка.

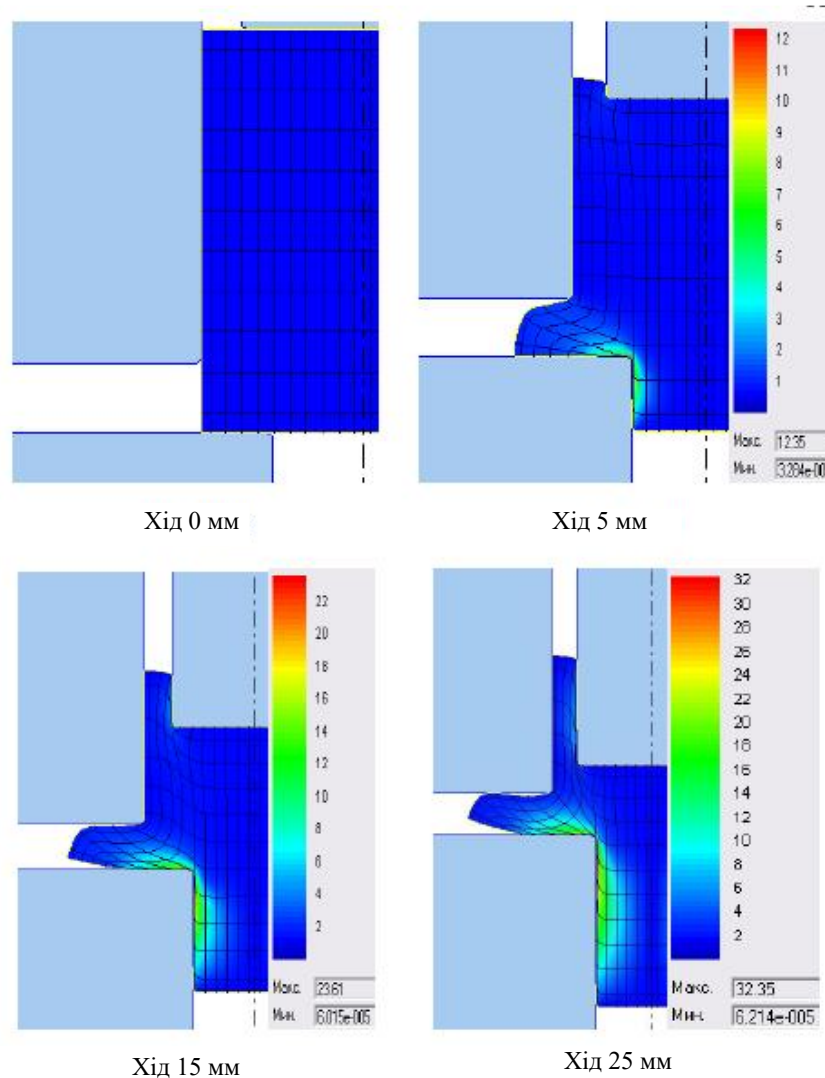


Рисунок 4.1 - Поетапна зміна деформованого стану при комбіноване  
тристороннє видавлювання деталей з фланцем і осьовим відростком у пакеті  
QForm

На рис. 4.2 показана залежність зусилля деформування залежно від ходу пуансона. Зниження зусилля пов'язане із зменшенням поверхні тертя при течії металу в радіальному напрямку, а також із розшаруванням металу на периферійних ділянках фланця. На рис. 4.3. показано зменшення поверхні тертя. Можна відзначити, що в міру руху пуансона, поверхня контакту між заготовкою, що видавлюється, та нижньою напівматрицею зменшується.

В результаті математичного моделювання в пакеті QForm також отримані графіки залежності приведенного тиску, тиску та зусилля деформування в залежності від геометричних параметрів деталі при коефіцієнтах тертя 0,14; 0,2 та 0,4, які наведені на рис. 4.2. – 4.6.

На рис 4.4 показано залежність зусилля деформування від радіусу заокруглення кромки отвору нижньої напівматриці при різних коефіцієнти тертя. З графіка можна побачити, що зі збільшенням радіуса заокруглення, зусилля деформування збільшується. Оскільки більший об'єм металу виявляється залученим до пластичної зони.

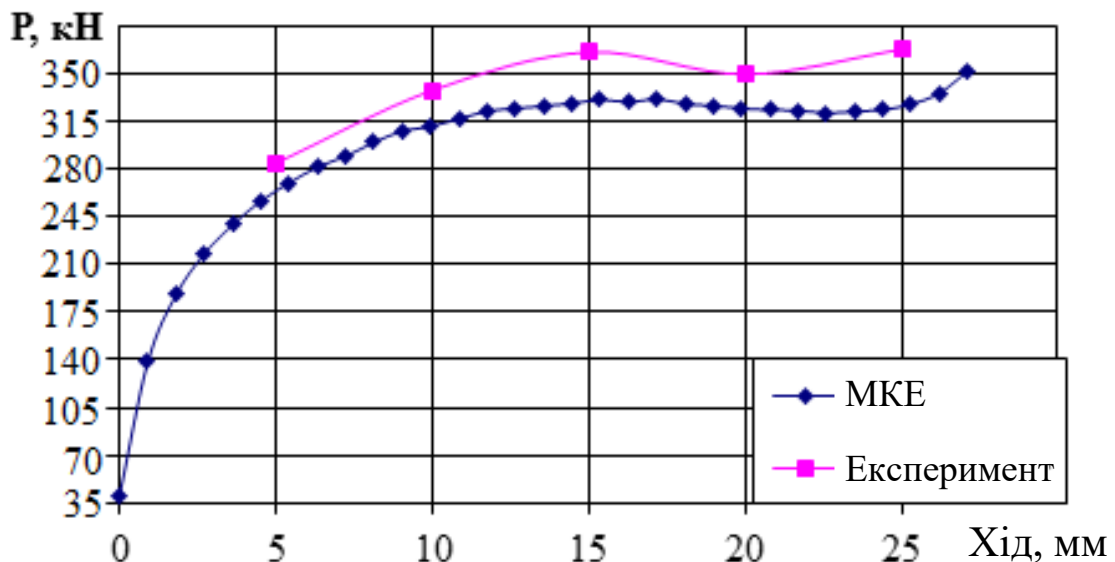


Рисунок 4.2 - Графік залежності зусилля деформування від ходу пуансона



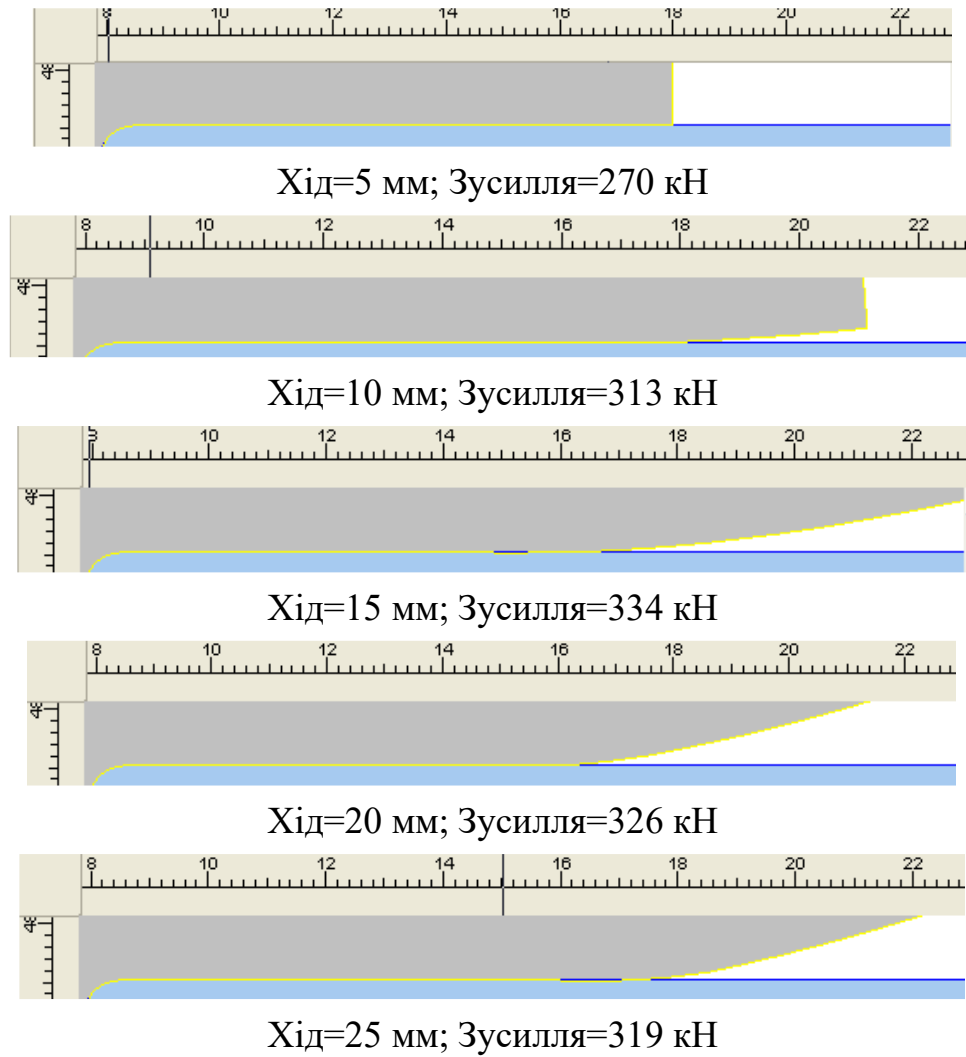


Рисунок 4.3 - Відхилення форми фланця в процесі деформування

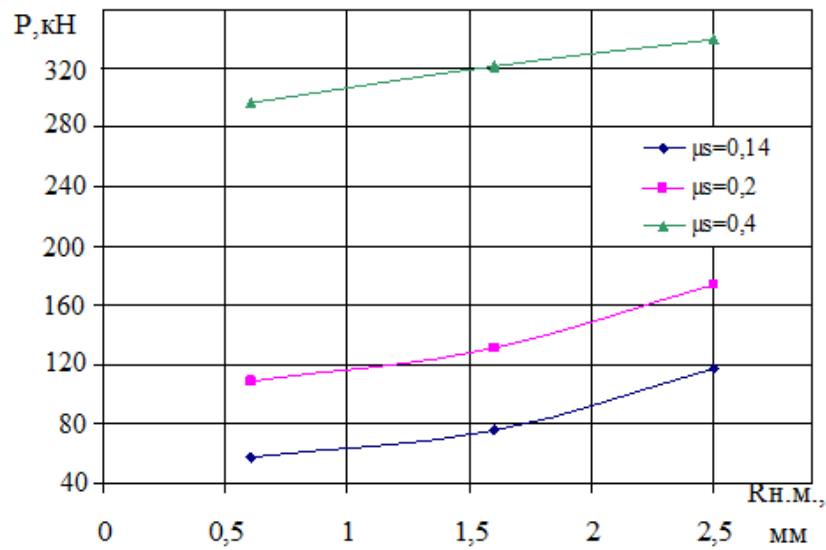


Рисунок 4.4 - Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення кромки отвору нижньої напівматриці при різних коефіцієнтах тертя

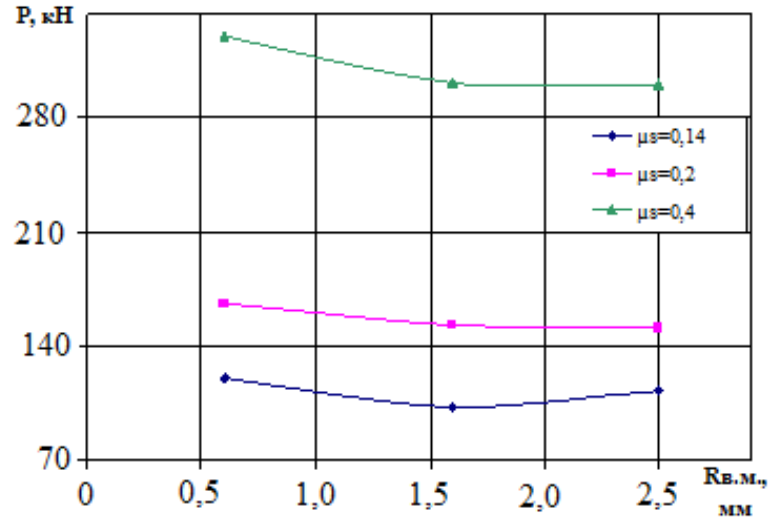


Рисунок 4.5 - Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення кромки отвору верхньої напівматриці при різних коефіцієнтах тертя

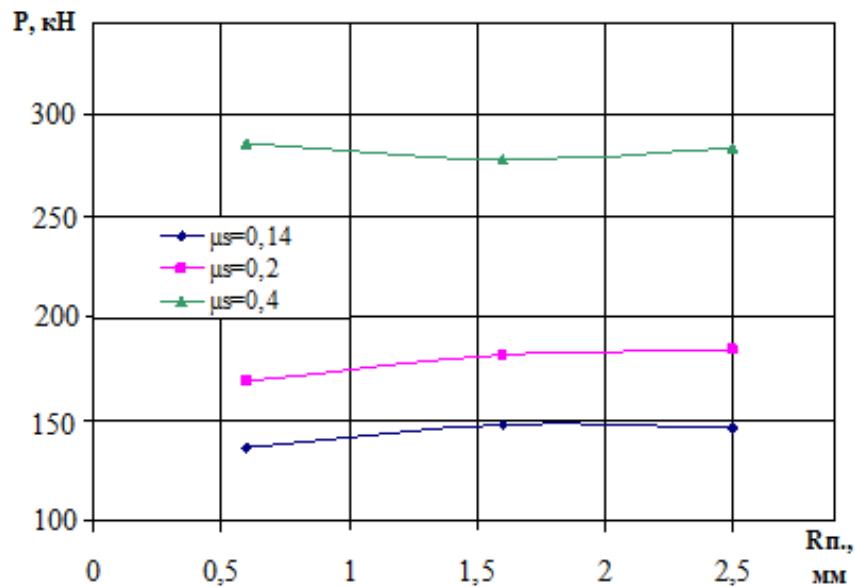


Рисунок 4.6 - Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення пуансону при різних коефіцієнтах тертя

Графік залежності зусилля деформування від радіусу заокруглення верхній напівматриці при переході до фланця (рис. 4.7) показує, що із збільшенням радіуса заокруглення кромки верхньої напівматриці зусилля деформування зменшується на початковій стадії, оскільки при цьому

видавлюється як би більш «товстий» фланець, тобто з меншим ступенем деформації.

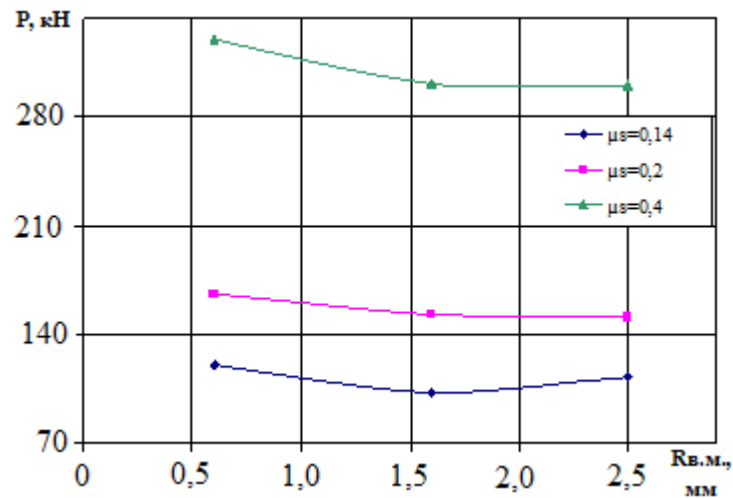


Рисунок 4.7 - Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення кромки отвору верхньої напівматриці при різних коефіцієнтах тертя

Графік залежності зусилля деформування від радіусу заокруглення пуансона (рис. 4.8) показує збільшення зусилля зі збільшенням радіусу заокруглення пуансону. Оскільки більш закруглений фланець легше впроваджується в заготовку та більшу кількість металу залучено до пластичної деформації.

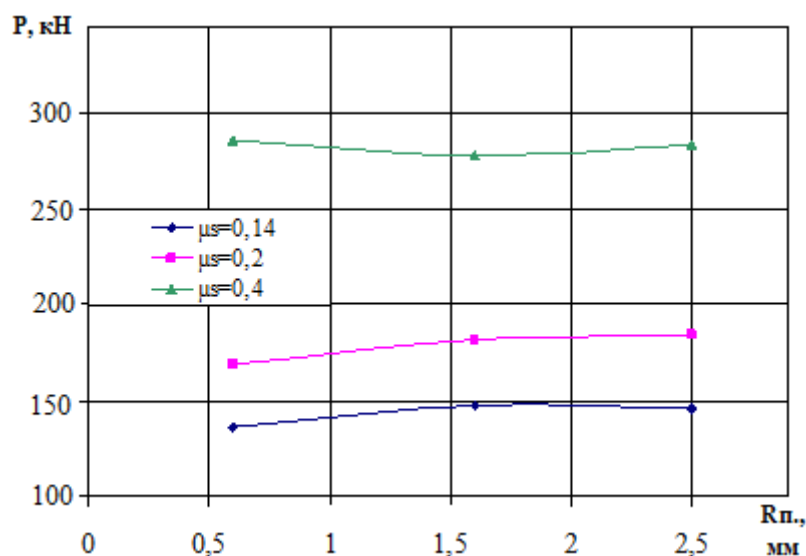
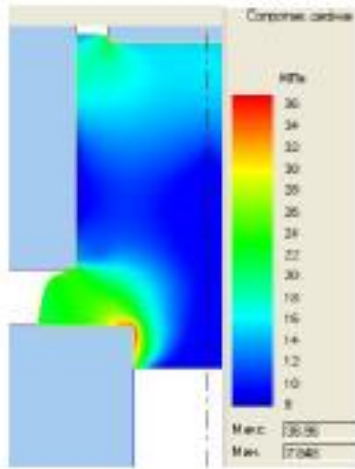
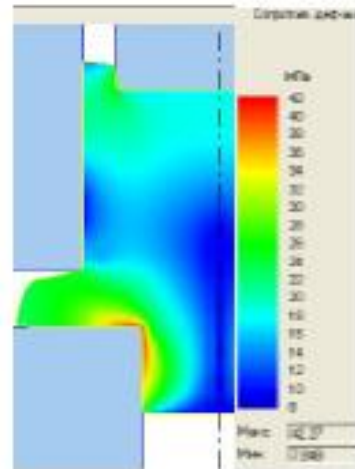


Рисунок 4.8 - Графік залежності зусилля деформування від радіуса заокруглення пуансону при різних коефіцієнтах тертя

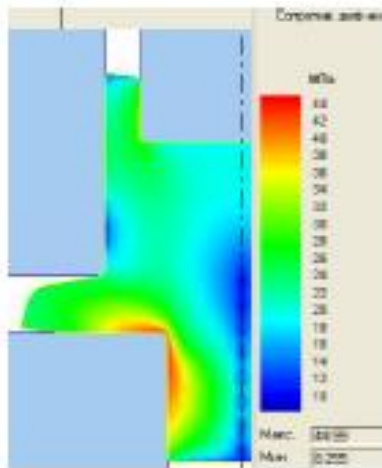
На рис. 4.9, 4.10 показано розподіл опору деформуванню на різних етапах процесу по мірі руху пуансону для матеріалів С1 та АД1.



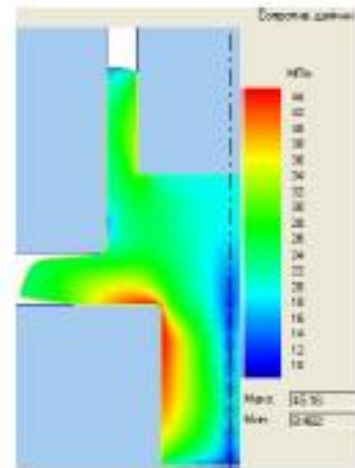
хід 5 мм



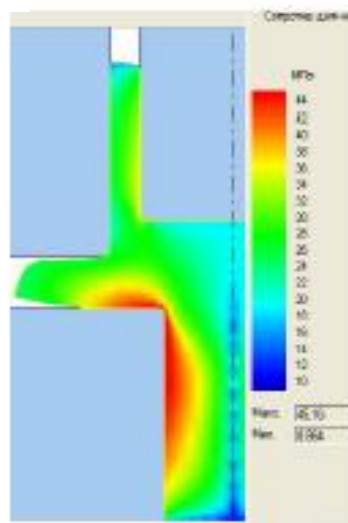
хід 10 мм



хід 15 мм



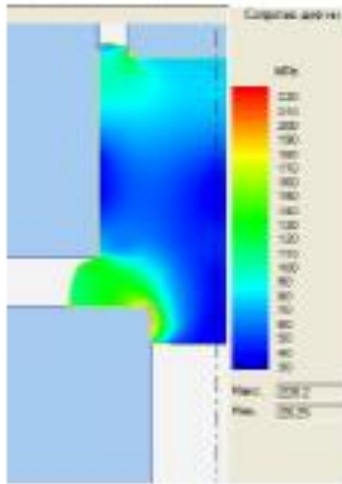
хід 20 мм



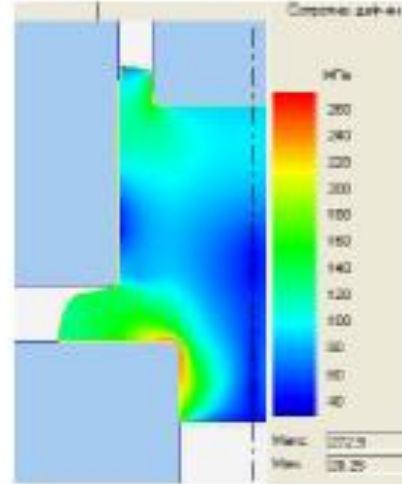
хід 25 мм

Рисунок 4.9 - Розподіл опору деформації на різних етапах процесу для свинцю

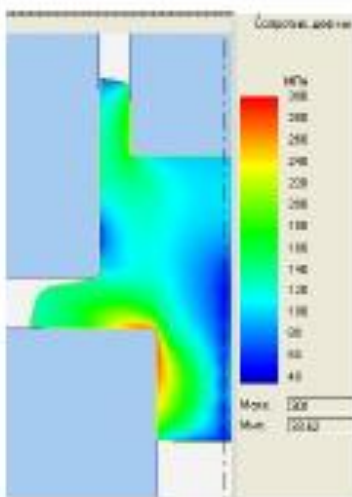
C1



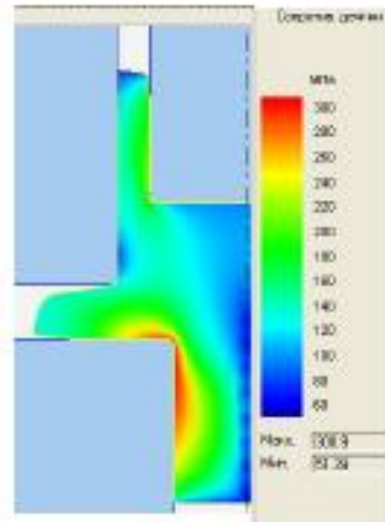
хід 5 мм



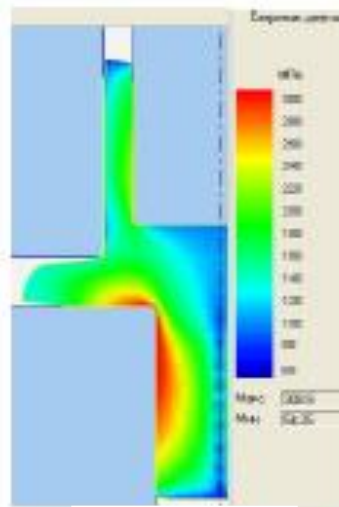
хід 10 мм



хід 15 мм



хід 20 мм



хід 25 мм

Рисунок 4.10 - Розподіл опору деформації на різних етапах процесу для алюмінієвого сплаву АД1

З рисунків можна побачити, що найбільший опір деформації виникає у кромки отвору нижньої напівматриці та при ході 5 мм становить 36 МПа для С1 та 220 МПа для АД1. По ходу процесу опір деформації збільшується і наприкінці процесу становить С1 - 44 МПа, для АД1 – 300 МПа. Найменший опір деформації в кінцевій стадії спостерігається вздовж осі деформування та на торцях при прямому та зворотному видавлюванні.

#### 4.2 Оцінка величини використаного ресурсу пластичності

Оцінка величини використаного ресурсу пластичності проводилась за критерієм [30]

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (4.1)$$

Для розрахунку використаного ресурсу пластичності в кінцево елементній моделі, задавалося поле трасувальних точок на заготовці (по висоті - 20 точок, по діаметру - 50 точок). Розглядалися криві побудовані по трасованих точках (рис. 4.11), розташованих по контуру зовнішнього фланця (лінія I), і за межами зрізу при радіально-прямій (лінія II) та зворотній (лінія III) течії матеріалу. Компоненти тензора головних напружень, отримані рішенням характеристичного рівняння, використовувалися для розрахунку параметру Надаї-Лоді та показника напружено-деформованого стану. Поверхня граничних деформацій для матеріалу АД1 задавалася як  $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,1 \cdot e^{(0,42 \cdot \mu_\sigma - 0,51 \cdot \eta)}$  [13, 14].

Інтенсивність деформації на лініях, розташованих у нижньому осередку деформації, монотонно зменшується (лінія I, II), а для лінії III, розташованої від кромки нижньої матриці до кромки пуансона спостерігається стрибок деформацій у зоні верхнього осередку деформації (рис. 4.12).

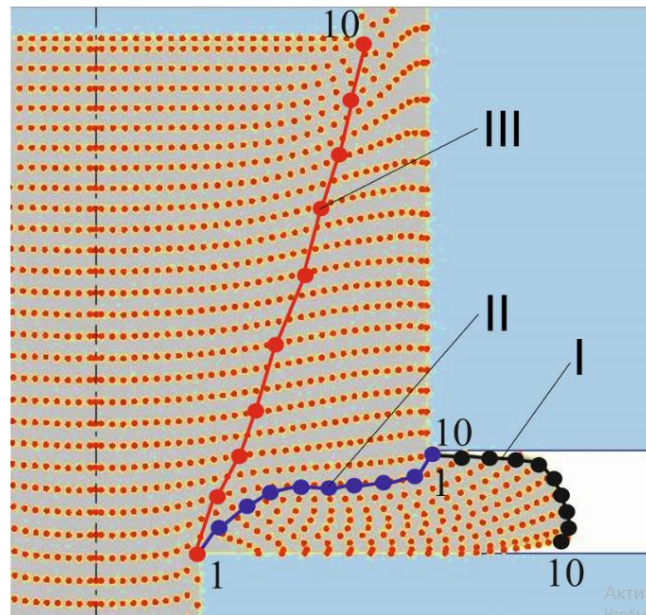


Рисунок 4.11 - Схема із прийнятими кривими для дослідження вичерпання ресурсу пластичності

Розподіл значень опору деформування (рис. 4.13) відповідає розподілу значень інтенсивності деформацій.

Значення середнього (гідростатичного) напруження (рис. 4.14) збільшуються. Для лінії I розташованої на периферії фланця зміна напруження незначна, близько 5%. Зростання значення напруження, на лініях I і II можна пояснити впливом контактного тиску у кромки інструменту.

З розв'язання характеристичного рівняння

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0, \quad (4.2)$$

отримано розподіл основних напружень.

Максимальні значення параметра Надаї-Лоді спостерігаються на лінії II, яка розташована між кромки двох напівматриць, мінімальні у зоні периферії фланця (рис. 4.15).

Показник жорсткості напруженого стану має максимальні значення на зовнішній поверхні фланця (рис. 4.16). Наявність великих за модулем негативних значень показника говорить про сприятливий напружений стан, але при цьому розрахунок використаного ресурсу пластичності доводиться

виконувати в екстрапольованій області поверхні граничних деформацій (границі побудови поверхні граничних деформацій за  $\eta \in -6..1$ ,  $\mu_\sigma = -1..1$ ).

Проведена оцінка вичерпання ресурсу пластичності показала, що найбільш небезпечною зоною є периферія фланця. Відповідно до аналізу найбільш небезпечною з погляду руйнування є точка 1 розташована на лінії I, що відповідає фланцю (рис. 4.17).

Подальший аналіз показав, що при досягненні у процесі деформування значення максимальної інтенсивності деформації  $\epsilon_{\max} = 0,75$  настає розвиток тріщин (рис. 4.18).

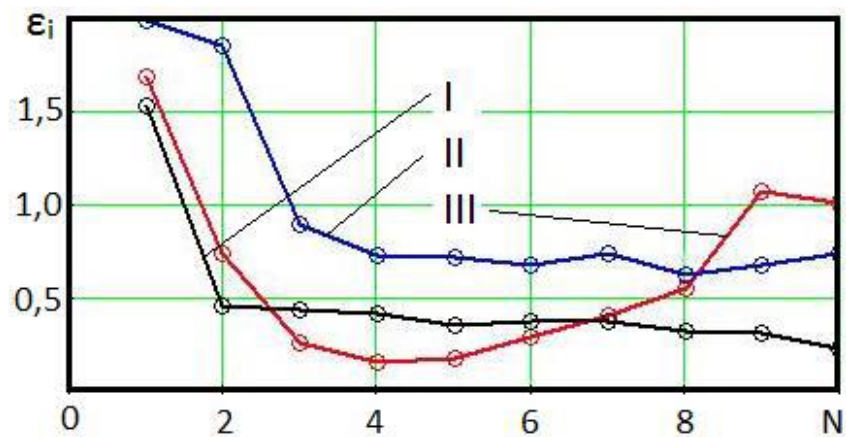


Рисунок 4.12 - Графік розподілу інтенсивності деформації залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

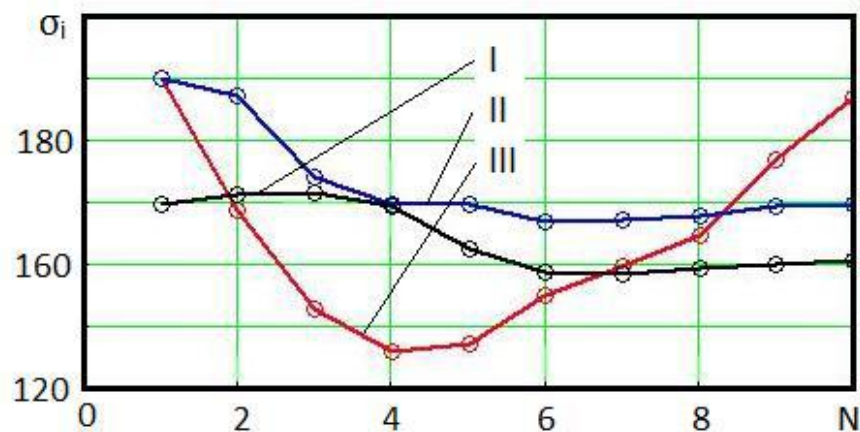


Рисунок 4.13 - Графік розподілу опору деформування залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки



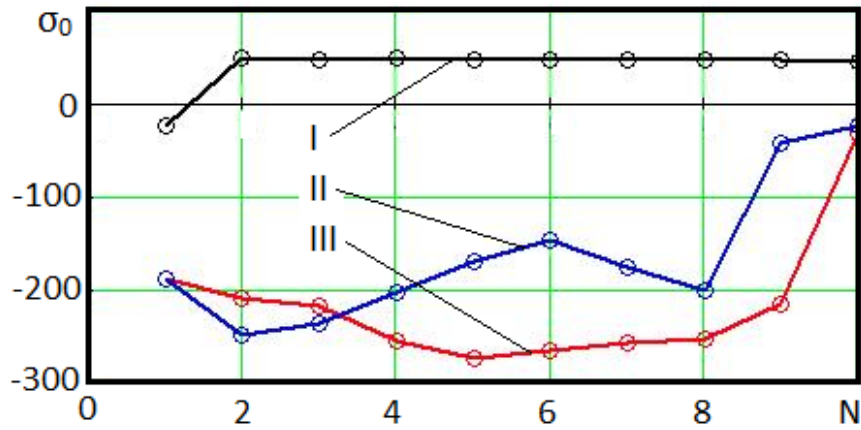


Рисунок 4.14 - Графік розподілу гідростатичного тиску залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

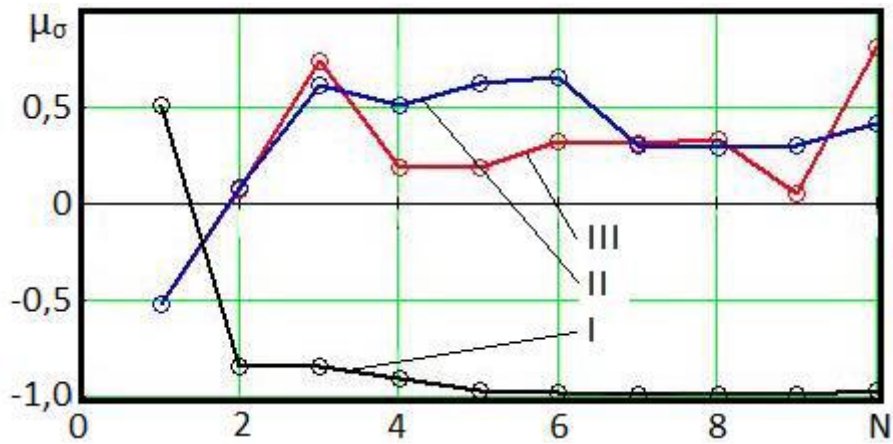


Рисунок 4.15 - Графік розподілу параметра Надаї-Лоде залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

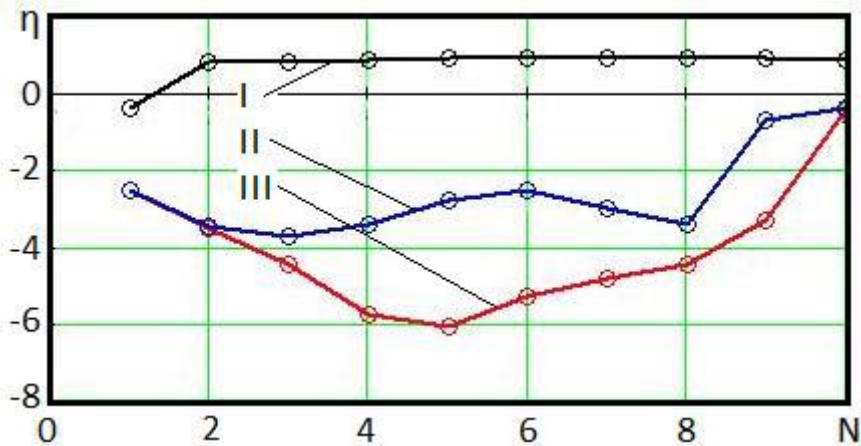


Рисунок 4.16 - Графік розподілу показника жорсткості напруженого стану в залежності від номера трасованої точки по перерізу заготовки

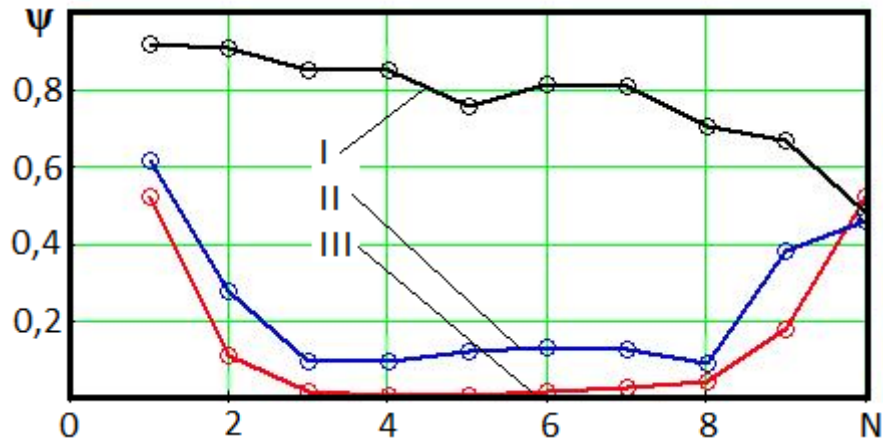


Рисунок 4.17 - Графік розподілу ресурсу пластичності залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

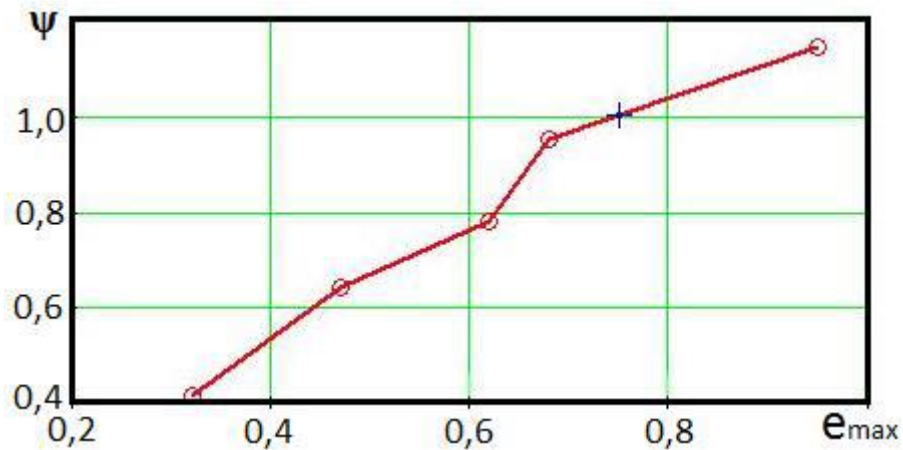
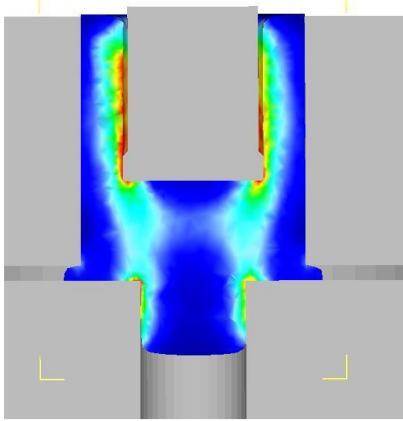
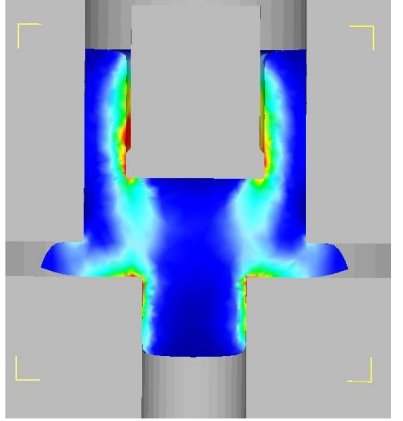
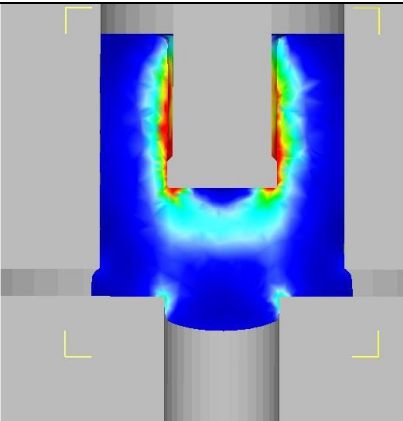
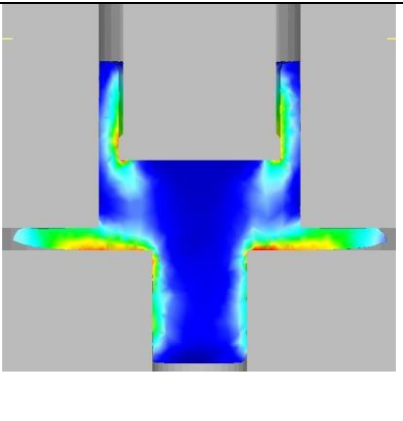
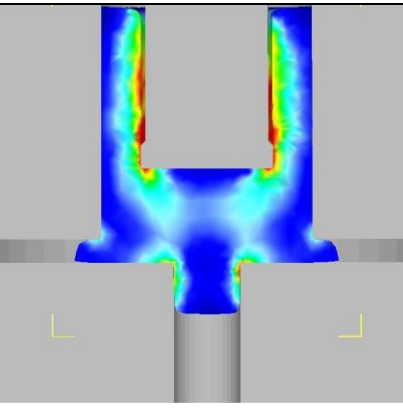
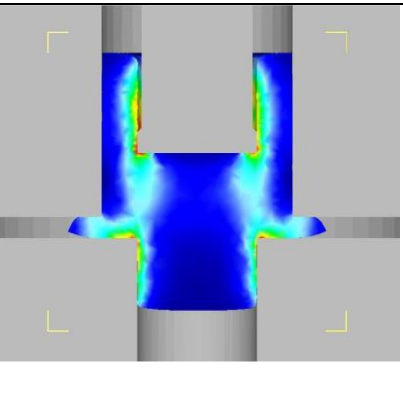


Рисунок 4.18 - Графік розподілу ресурсу пластичності залежно від максимальної інтенсивності деформації

### 4.3 Дослідження формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні

На основі набору даних у програмі можна простежити формозміну у процесі тристороннього комбінованого видавлювання за різних геометричних параметрів (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Формозміна у процесі комбінованого видавлювання

	$h=0.06$	$h=0.16$
$d_n=0.62$ $d_0=0.47$		
	$d_n=0.51$	$d_n=0.73$
$h_\phi=0.11$ $d_0=0.47$		
	$d_0=0.33$	$d_0=0.60$
$h_\phi=0.11$ $d_n=0.62$		

З табл. 4.1 видно, що при зміні відносної висоти фланцю від  $h = 0,06$  до  $h = 0,16$  довжина відростка не змінюється. А ось кількість металу, що витікає в зону фланця і зону стакану змінилась. Зі збільшенням відносної висоти фланця діаметр сформованого фланця збільшився, а висота стакану зменшилась. Це можна пояснити тим, що із збільшенням висоти фланця, збільшилась і ступінь

деформації у цій зоні, що спричинило можливість більш вільної течії металу в зону фланця.

При збільшенні відносного діаметра пунсона з  $d_n=0,51$  до  $d_n=0,73$  об'єм металу, що витікає в зону стакану, значно зменшився, разом із висотою стакану. А об'єм металу в зоні відростка та фланця різко збільшився. Це пов'язано з тим, що із збільшенням відносного діаметра пуансона осередок деформації в зоні стакану зменшилося, що спричинило ускладнення течії металу в цю зону та розподіл не витісненого об'єму металу в зону фланця та відростка.

Збільшення відносного діаметра відростка з  $d_o=0,33$  до  $d_o=0,60$  сприяло збільшенню об'єму металу в зоні відростка та незначне збільшення об'єму металу в зоні фланця, а також зменшення об'єму у зоні стакану.

Для дослідження формозміни у процесі комбінованого тристороннього видавлювання було обрано схему з відносною висотою фланця  $h=0,11$ , з відносним діаметром відростка  $d_o=0,47$  та відносним діаметром пуансону  $d_o=0,73$  (рис. 4.19). Проведено дослідження формозміни при тристоронньому видавлюванні по ходу процесу (рис. 4.20, 4.21).

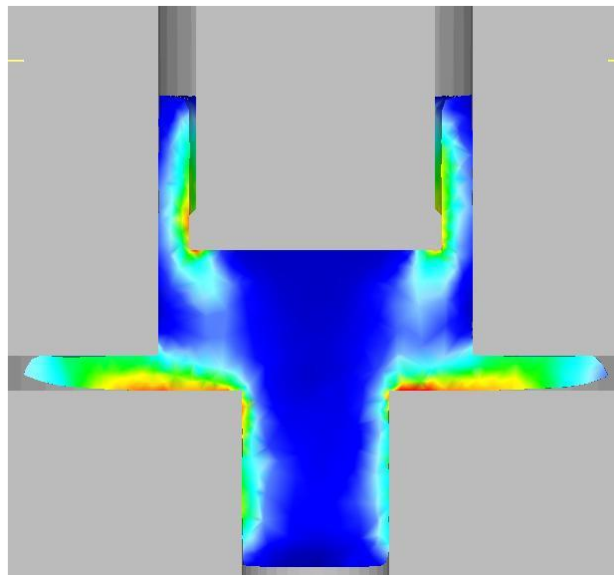


Рисунок 4.19 - Схема для дослідження формозміни при комбінованому тристоронньому видавлюванні

З рис. 4.20 видно, що до величини ходу пуансона 15 мм, найбільш швидко відбувається збільшення розміру фланця, а менш активно формується стакан. При досягненні ходу пуансона 16 мм, більш активно починає формуватися відросток та стакан, а формування фланця зупиняється. Наприкінці процесу видно, що найбільшого розміру набрав відросток, а найменший фланець.

Проте на рис. 4.21 показано, що найбільший об'єм металу був витіснений у зону фланця, а найменший у зону відростка.

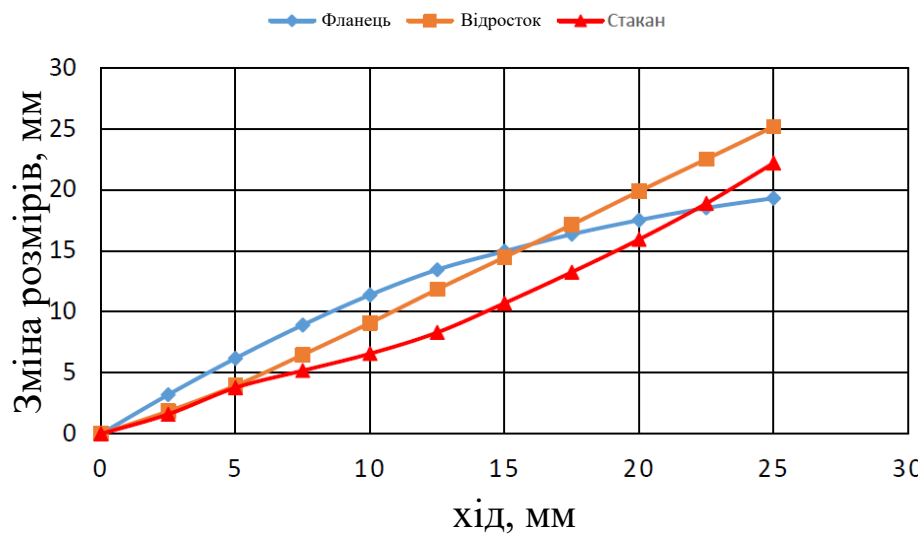


Рисунок 4.20 - Формозміна у процесі тристороннього видавлювання по ходу процесу

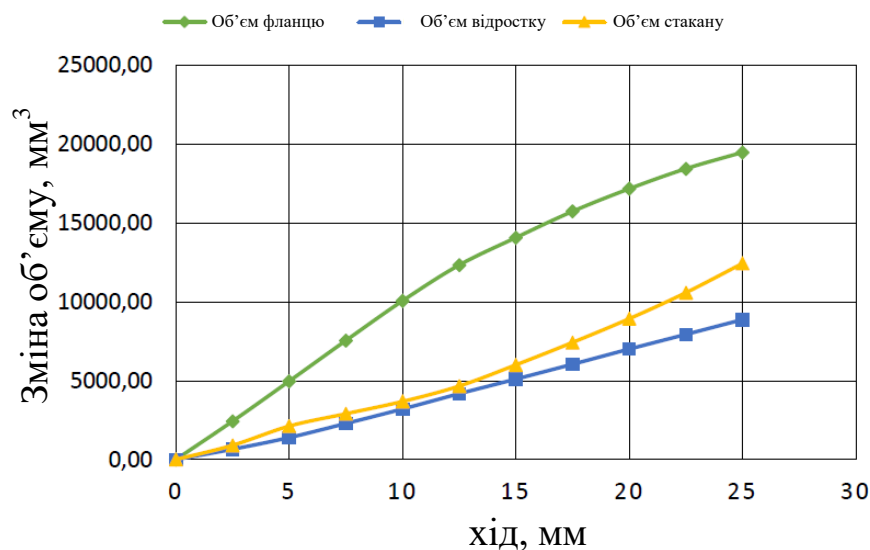


Рисунок 4.21 - Зміна об'єму металу, що витісняється, залежно від ходу пуансону

Теоретичний аналіз даних дозволив оцінити формозміну напівфабрикату при комбінованому тристоронньому видавлюванні у внаслідок чого, отримано діаграму приросту лінійних розмірів за трьома напрямками, при різних співвідношеннях розмірів інструменту (рис. 4.22).

У ході досліджень напружено-деформованого стану в процесі комбінованого тристороннього видавлювання було визначено, що найбільші деформації розташовані у кромки нижньої матриці та у кромки пуансону. У схемах, які мають хорошу заповнюваність у зоні фланця також спостерігаються високі деформації.

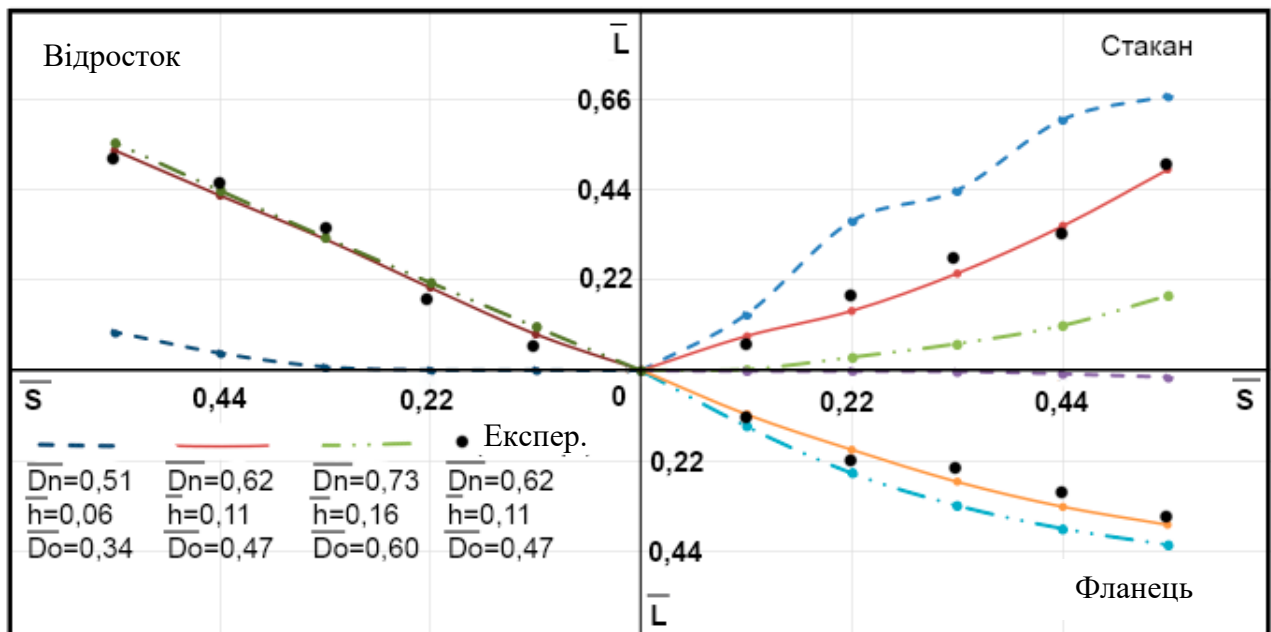


Рисунок 4.22 - Аналіз формозміни заготовки при комбінованому

тристоронньому видавлюванні ( $\bar{L} = \frac{L}{d_m}$  – відносний лінійний приріст

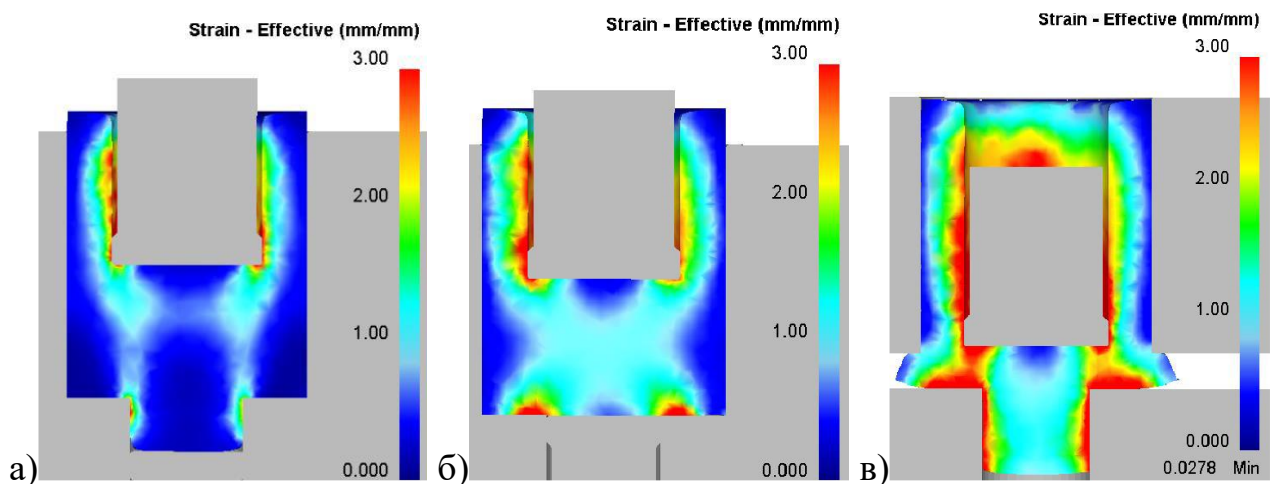
розмірів;  $\bar{S} = \frac{S}{d_m}$  – відносний хід пуансону)

Провівши низку моделювань, було виявлено, що зоною з найменшою деформацією є зона торця відростка, яка у всіх схемах моделювання не піддається деформації (див. табл. 4.1).

Для вирішення цієї проблеми було застосовано деформування із зворотно-поступальною течією матеріалу до зони відростка.

Для підтвердження, було проведено аналіз методом кінцевих елементів, що якісно підтвердив припущення (рис. 4.23).

Було проведено порівняльний аналіз процесів комбінованого двостороннього та тристороннього видавлювання. Для дослідження використовувалося програмне забезпечення. Були розглянуті наступні схеми двостороннього видавлювання – зворотно-пряме, зворотно-радіальне, радіально-пряме та схема тристороннього видавлювання (рис. 4.24). Вихідні розміри заготовок приймалися: діаметр 45 мм, висота 45 мм. Геометричні розміри інструменту для всіх схем деформування приймалися рівними: діаметр відростка 21 мм, висота фланця 5 мм та товщина стінки склянки 4,5 мм.

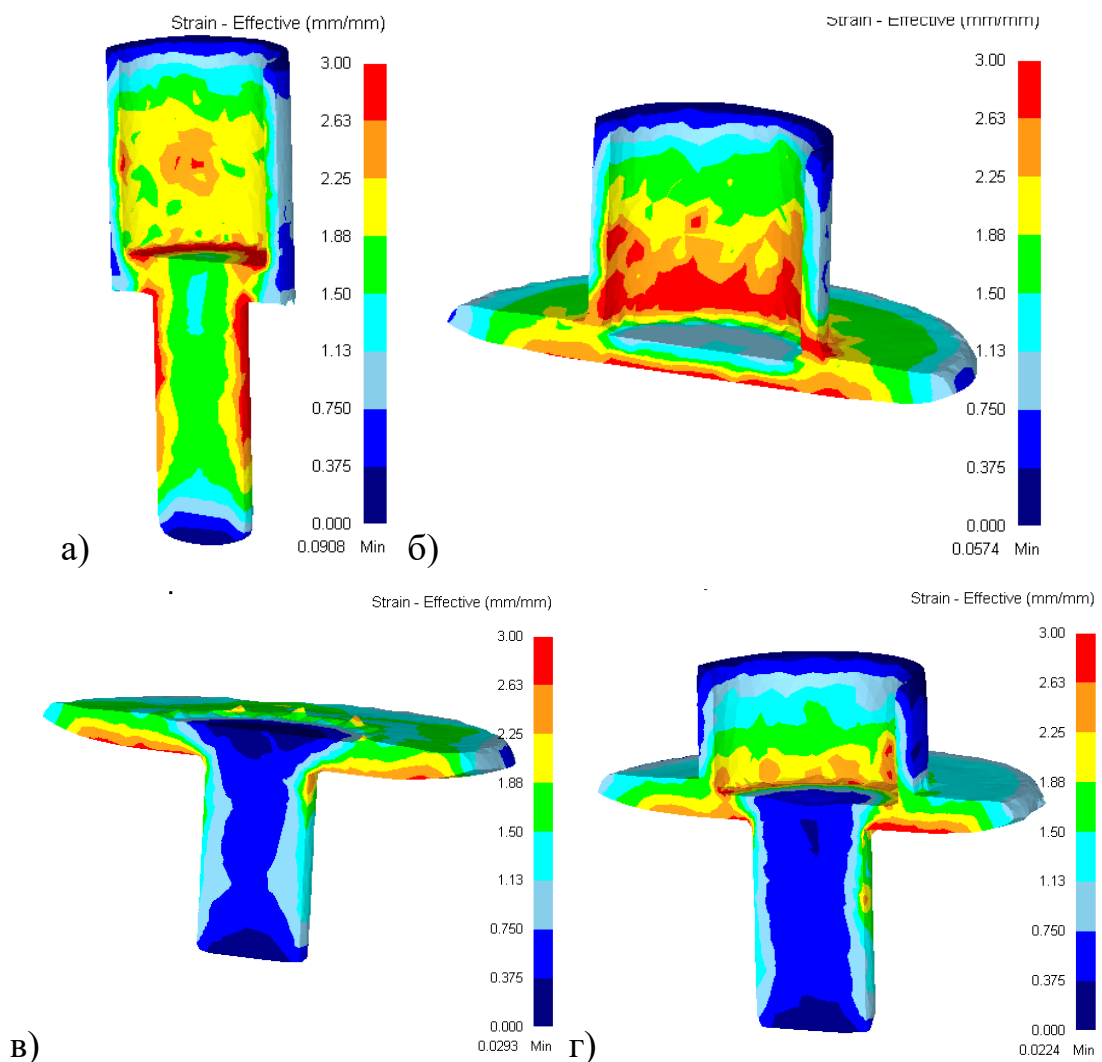


а – перший етап; б – другий етап; в – тристороннє видавлювання

Рисунок 4.23 - Якісне опрацювання структури на основі запропонованого способу

На рис. 4.24 показано розподіл ступеня деформації за перерізом напівфабрикату. Більш однорідне опрацювання матеріалу спостерігається при зворотно-прямому і радіально-зворотному видавлюванні. При застосуванні комбінованого тристороннього способу деформування спостерігається більш якісне опрацювання фланцевої частини заготовки.

На рис. 4.25 представлений суміщений графік зусиль комбінованого видавлювання. Зміна зусиль для радіально-прямого та тристороннього видавлювання на першому етапі (основне формування фланця та склянки) має схожий характер. На другому етапі, коли метал при тристоронньому видавлюванні починає інтенсивно текти у відросток, зусилля знижується. Це можна пояснити великою кількістю ступенів свободи течії матеріалу. А зростання зусилля при радіально-прямому деформування на другому етапі пов'язане зі значним зменшенням осередку деформації, відповідно зменшенням ступеня деформації.



а – зворотно-пряме видавлювання; б – зворотно-радіальне видавлювання; в – радіально-пряме видавлювання; г – тристороннє видавлювання

Рисунок 4.24 - Ступінь деформації при комбінованому видавлюванні



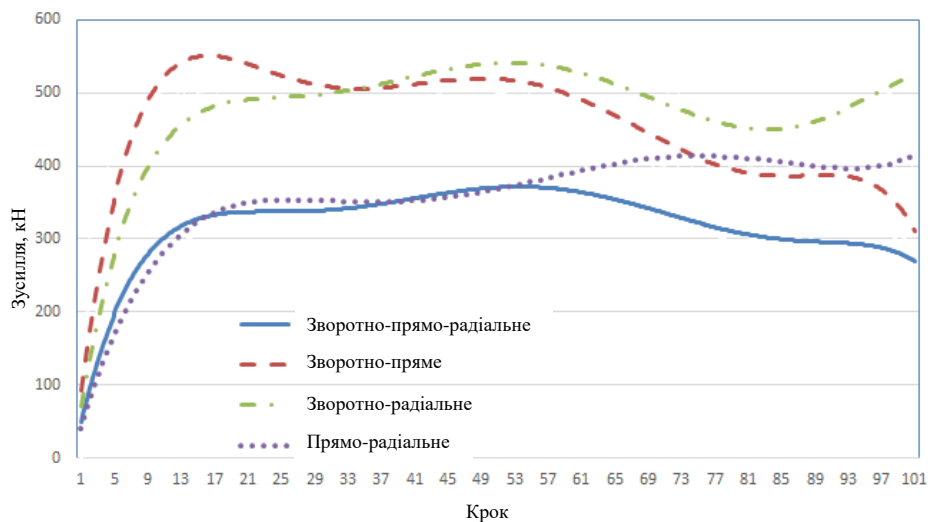


Рисунок 4.25 - Поєднаний графік зусилля комбінованого видавлювання

Таким чином, можна відзначити доцільність використання тристороннього комбінованого видавлювання та перевагу даного виду над процесами з двома ступенями течії матеріалу.

## 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 <sup>3</sup>		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 <sup>3</sup>	
	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, ультразвуку та інфразвуку 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

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

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

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 <sub>1</sub> =39	СБ <sub>2</sub> =40	СБ <sub>3</sub> =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{39 + 40 + 38}{3} = 39$		

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:

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

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

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. Налагоджувальні	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.

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

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

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

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

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.;

$\beta$  – 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
Тринатрійфосфат	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;

$\text{Ц}_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

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

$V_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$\text{Ц}_{вj}$  – 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:

$$K = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \text{Ц}_i \cdot K_i, \quad (6.12)$$

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

$\text{Ц}_i$  – покупна ціна комплектуючих  $i$ -го найменування, грн.;

$K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат ( $1,1 \dots 1,15$ ).

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.

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

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

$T_{кор}$  – 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				<b>3906,25</b>

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.

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

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

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;



$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

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

$\eta_i$  – 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:

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

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:

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

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  $\eta$  – 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;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

$\Pi_o$  – 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:

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

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

$x$  – 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.

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot 800] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 280181,08 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_2 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot (800 + 750)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 542951,2 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_3 &= [150 \cdot 1 + (1900 + 150) \cdot (800 + 750 + 600)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 753067,8 \text{ грн.} \end{aligned}$$

#### **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.

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

$k_{інв}$  – 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 ( $k_{інв} = 2 \dots 5$ ).

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

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

$$E_{абс} = (ПП - PV) \quad (6.21)$$

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;

$\tau$  – 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).

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

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

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

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій  $E_{в}$ . Для цього користуються формулою:

$$E_{в} = T_{жс} \sqrt{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (6.23)$$

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

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{736504,70}{311859,09}} - 1 = 0,79 = 79\%$$

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

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

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

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

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

## ВИСНОВКИ

1. Процеси точного об'ємного штампування є ресурсозберігаючими технологіями, які забезпечують мінімальні витрати та високу точність готових виробів. Для дослідження процесів видавлювання використовується велика кількість методів. Для виготовлення деталей складної форми з високим ступенем точності і з меншими робочими навантаженнями перспективним є використання процесів, заснованих на нових способах комбінованого видавлювання в роз'ємних та рухомих матрицях. Незважаючи на наявність рішень щодо визначення силового режиму та напружено-деформованого стану заготовки у процесах видавлювання деталей складної конфігурації залишається актуальним питання уточнення цих рішень стосовно процесів комбінованої течії. Відсутні практичні рекомендації щодо проектування технологічного процесу комбінованого тристороннього видавлювання та ефективного штампового оснащення для реалізації процесу.
2. Енергетичним методом балансу потужностей отримано аналітичні залежності приведенного тиску деформування від геометричних параметрів процесу для схеми з прямокутними модулями та схеми, що враховує наявність фасок на інструмент (з трапецеїдальними модулями). Встановлено, що значення приведенного тиску деформування та розкриття матриць при деформуванні в інструменті з фасками вище на 7-10% порівняно з використанням інструменту без фасок.
3. З використанням методу кінцевих елементів проведено оцінку вичерпання ресурсу пластичності заготовок. Визначено небезпечні зони з погляду руйнування, що знаходяться між перехідними кромками інструменту та на периферії фланця. Встановлено, що найбільш небезпечною з точки зору руйнування є периферія фланця і при досягненні ступеня деформації  $\epsilon_{\max}=0,75$  настає руйнування фланця.

4. Розроблено технологічні рекомендації та методику проектування процесів та штамів комбінованого тристороннього видавлювання деталей типу «стакан з фланцем та відростком» на основі створеної бази розрахункових схем та програмних продуктів, що забезпечує зниження витрат та часу на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва.
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](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](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 ПОЛІЩУК,

\_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання  
енергетичним методом

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве  
машинобудування»

Дмитро БАЗАЛІВСЬКИЙ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 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 <sup>3</sup>	2800
4	Густина свинцю С1, кг/м <sup>3</sup>	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 – 350-430<sup>0</sup>С
- 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» Дмитро БАЗАЛІВСЬКИЙ

#### **8 Етапи НДР і терміни їх виконання:**

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом;
- 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**

# Способи холодного видавлювання

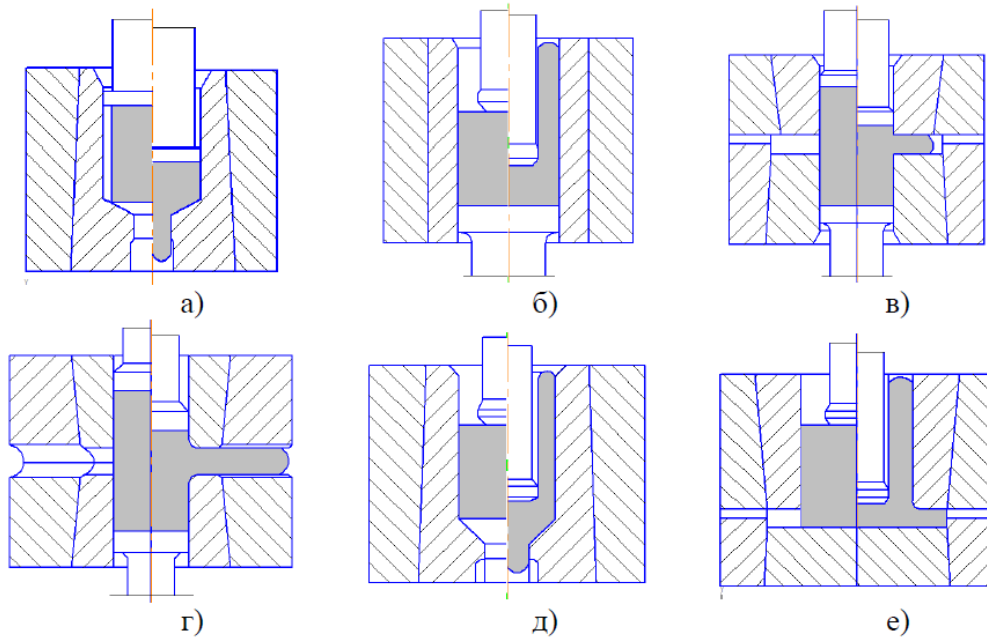


Рис. 1. Способи холодного видавлювання: а – пряме; б – зворотне; в – поперечне (радіальне); г – поперечне (бічне); д - комбіноване (зворотно-пряме); е – комбіноване (радіально-зворотне)

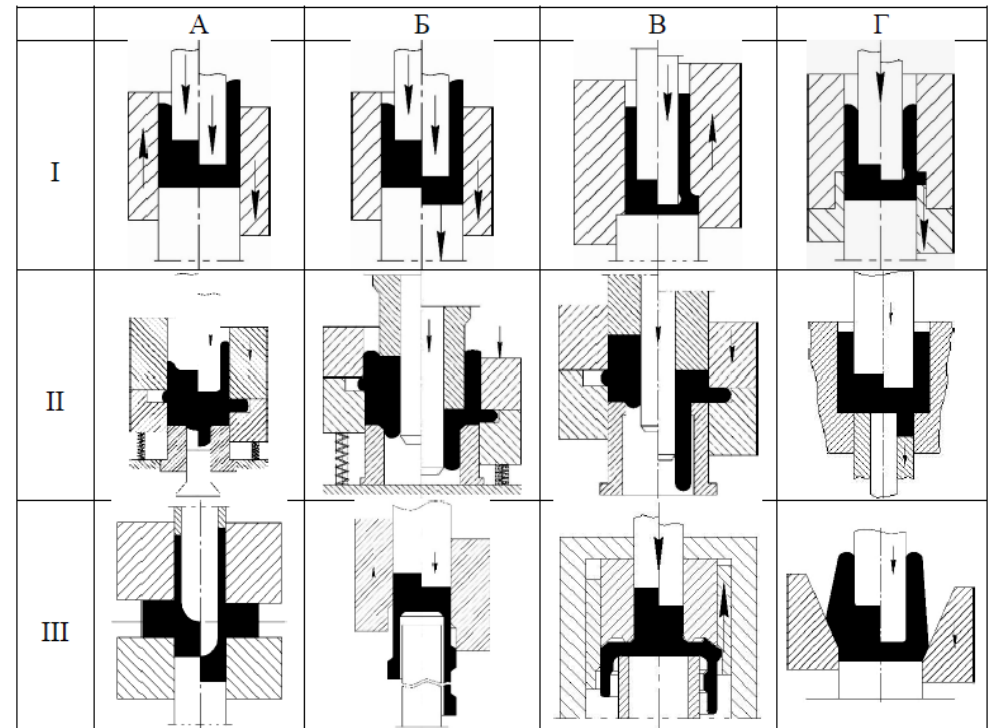


Рис. 2. Способи видавлювання порожнистих деталей

# Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з прямолінійними модулями

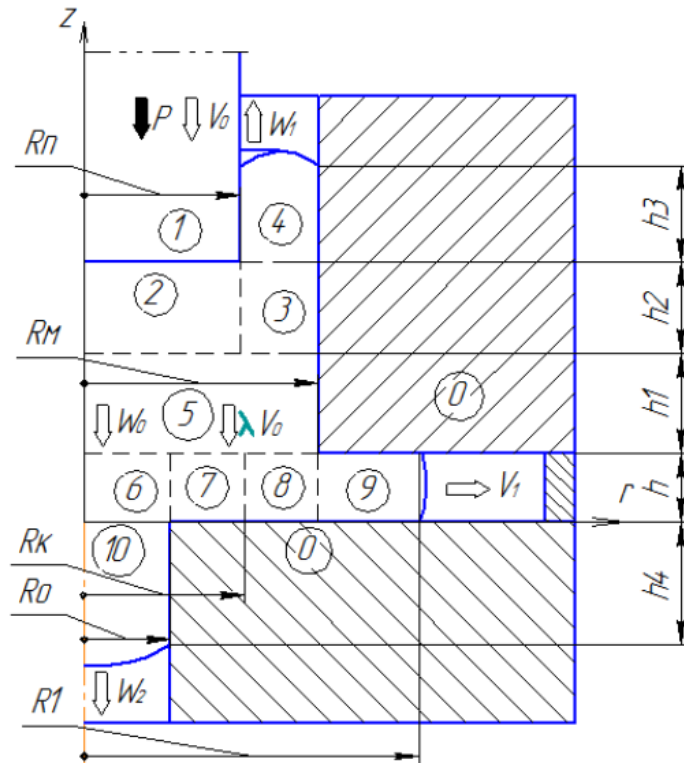


Рис. 3. Розрахункова схема комбінованого тристороннього видавлювання з прямолінійними модулями

Загальний вигляд рівняння енергетичного балансу для тристороннього комбінованого видавлювання з прямолінійними модулями

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_1 - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \bar{p}_2 \cdot \frac{R_M}{R_n} \quad (1)$$

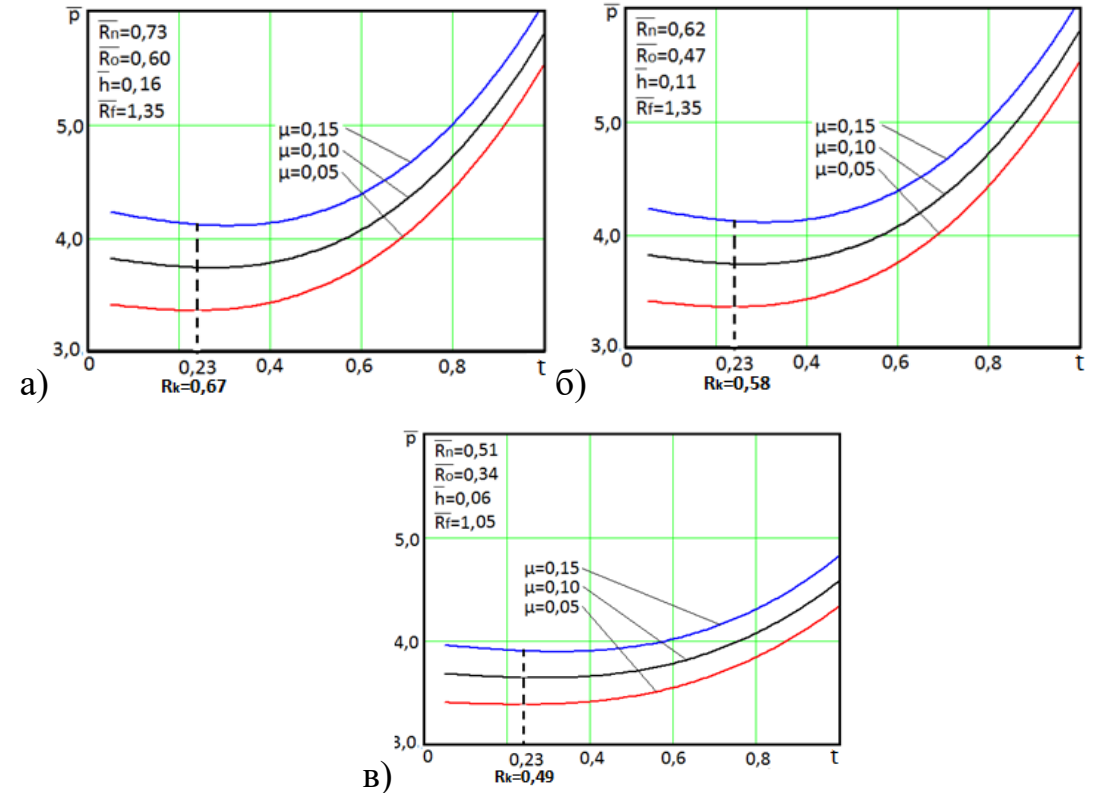


Рис. 4. Графіки залежності приведенного тиску від відносного критичного радіусу при різних значеннях тертя  $\mu$  і відносних геометричних параметрів

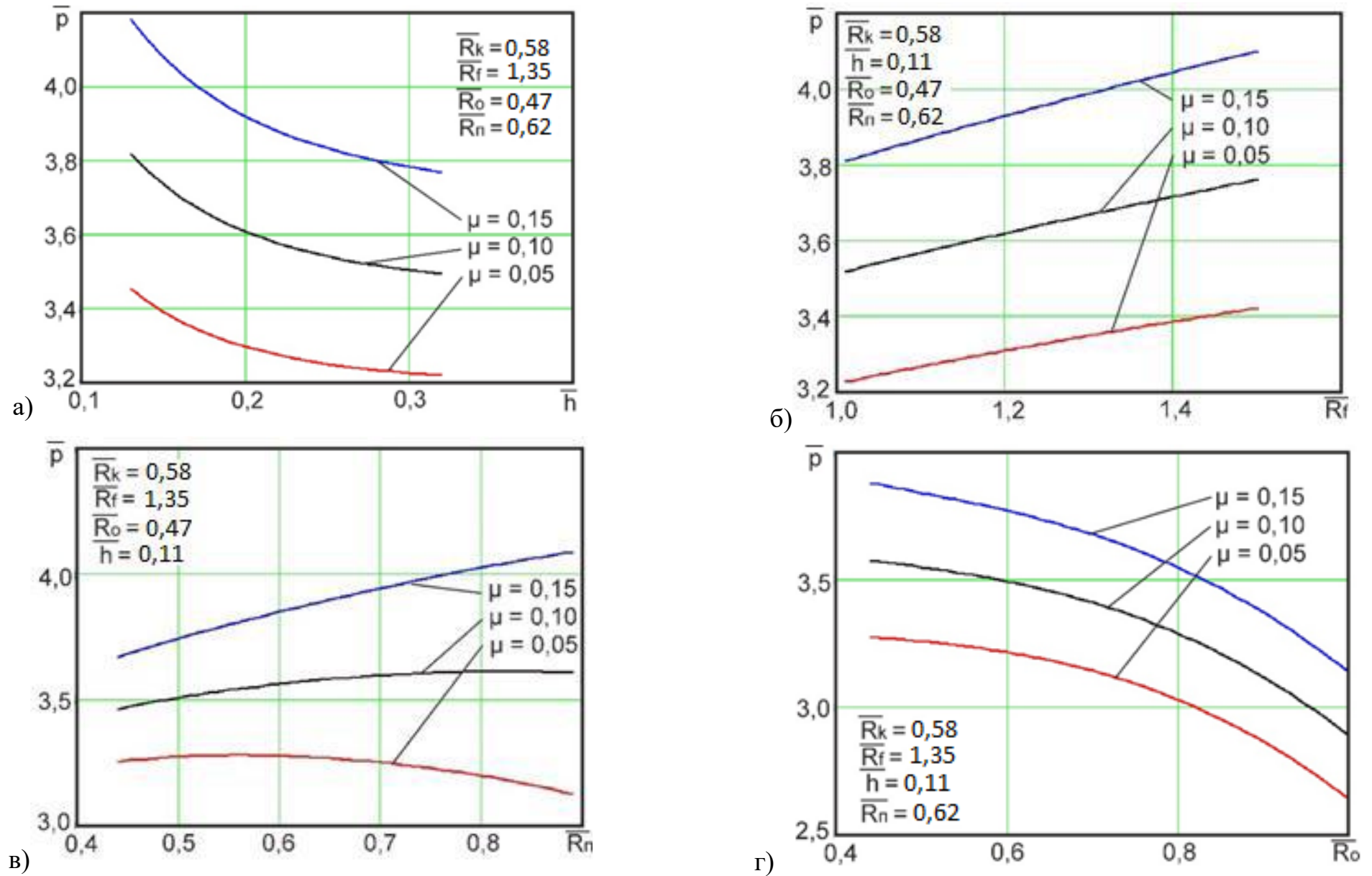


Рис. 5. Графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця (а), від відносного радіуса фланця (б), від відносного радіуса пуансону (в) та від відносного радіуса відростка (г) при різних значеннях тертя  $\mu$

# Дослідження силового режиму процесу комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями

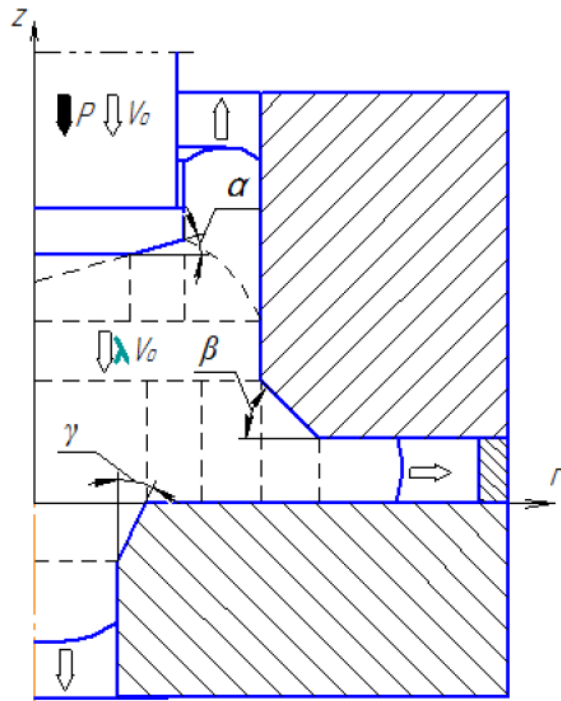


Рис. 6. Розрахункова схема комбінованого тристороннього видавлювання енергетичним методом з трапецеїдальними модулями

Загальний вид рівняння енергетичного балансу потужностей для тристороннього комбінованого видавлювання з трапецеїдальними модулями

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_{обр.в.} - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot (\bar{p}_2 + \bar{p}_{2.1} + \bar{p}_{2.2}), \quad (2)$$

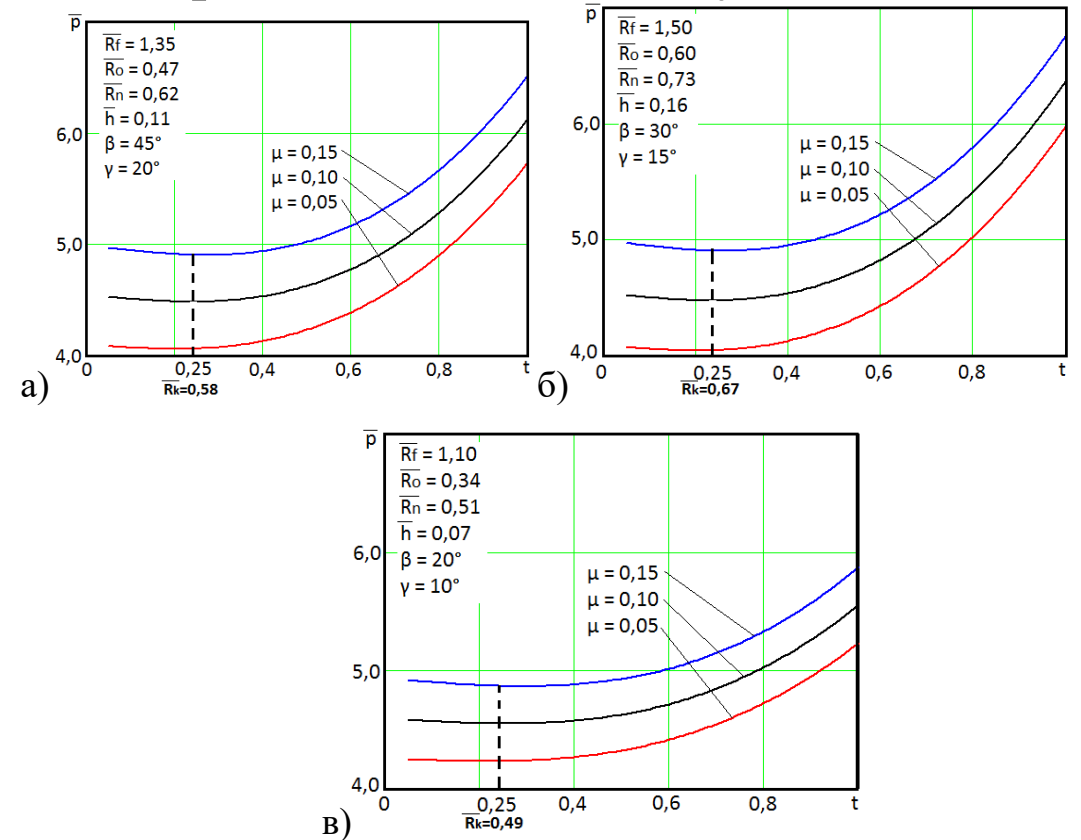


Рис. 7. Графіки залежності приведенного тиску від відносного критичного радіусу при різних значеннях тертя  $\mu$  і відносних геометричних параметрах для комбінованого видавлювання схеми з фасками на інструменті

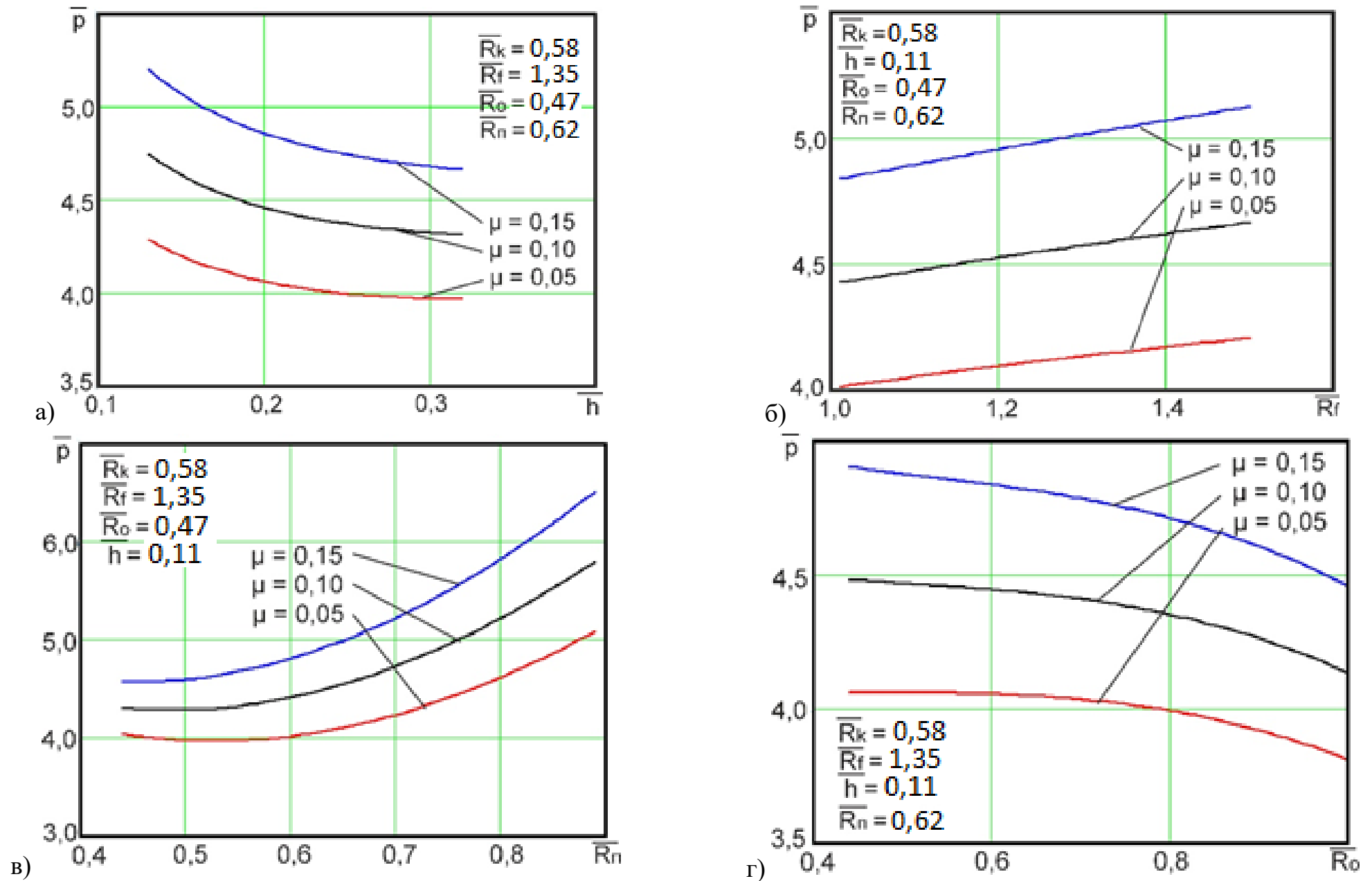


Рис. 8. Графіки залежності приведенного тиску від відносної висоти фланця (а), від відносного радіуса фланця (б), від відносного радіуса пуансону (в) та від відносного радіуса відростка (г) при різних значеннях тертя  $\mu$  схеми з трапецеїдальними модулями

## Технологія та штампове оснащення для процесу радіально-прямо-зворотного видавлювання

Табл. 1. Технологія виготовлення деталі "втулка з фланцем"

Операційний ескіз	Найменування операції
	<p>Відрізка заготовки (матеріал АД1) зміщенням у відрізнаму штампі з диференційним затискачем.</p> <p>Обладнання: автоматичний комплекс для різання прутків зусиллям 1600 кН. Зусилля різання 443 кН.</p>
Термообробка	Нагрів до 400 0С, витримка 1,5 год і охолодження на повітрі.
Підготовка поверхні	Анодування
Змащування	Нанесення мастила (технічний жир)
	Калібрування. Зусилля 150 кН
	Комбіноване видавлювання заготовки. Заготовка: пруток $d_{\text{зовн}} = 28,2$ мм; обладнання: кривошипний прес подвійної дії зусиллям 1600 кН.
	Механічне доведення торців та фланця

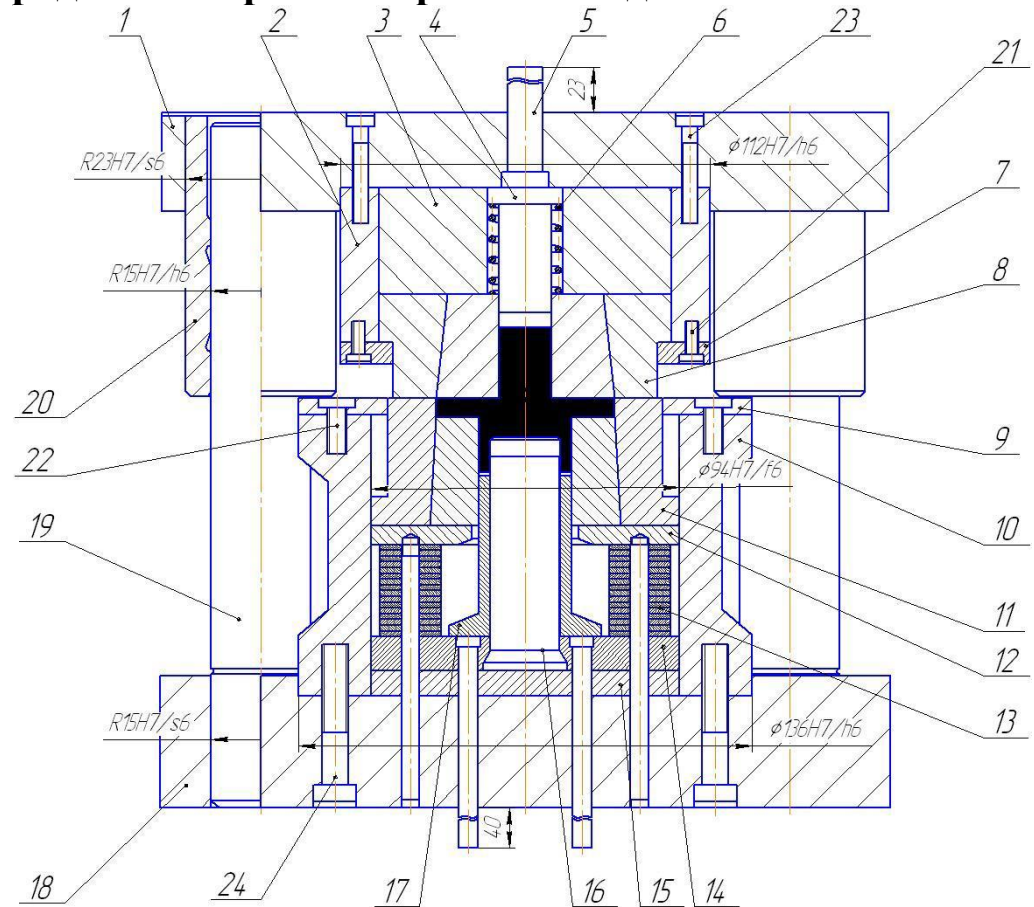


Рис. 9. Схема штампі для комбінованого видавлювання: 1 – плита; 2, 10 – контейнер; 3, 7, 9 – кільце; 4, 17 – виштовхувач; 5 – товчач; 6 – пружина; 8 – матриця; 11 – підкладка; 12, 13 – пружина тарільчаста; 14 – пуансонотримач; 15 – прокладка гартована; 16 – пуансон; 18 – нижньої плити; 19 – колонка; 20 – втулка; 21, 22, 23 – гвинти; 24 – болти



# Оцінка величини використаного ресурсу пластичності

Оцінка величини використаного ресурсу пластичності проводилась за критерієм

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

(3)

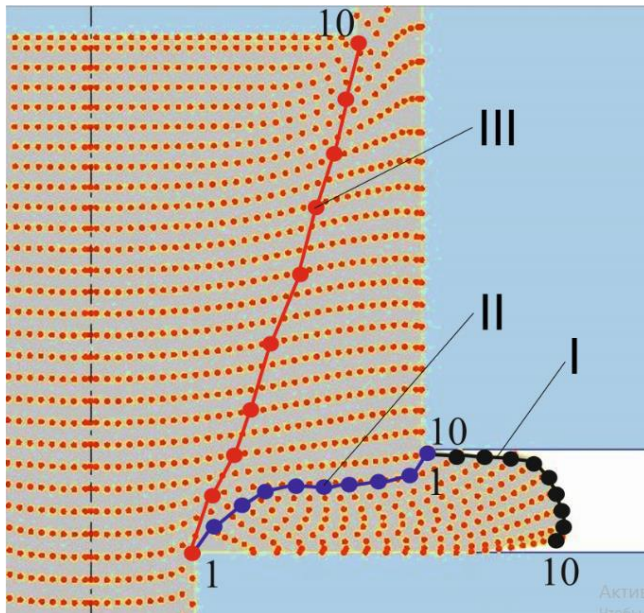


Рис. 10. Схема із прийнятими кривими для дослідження вичерпання ресурсу пластичності

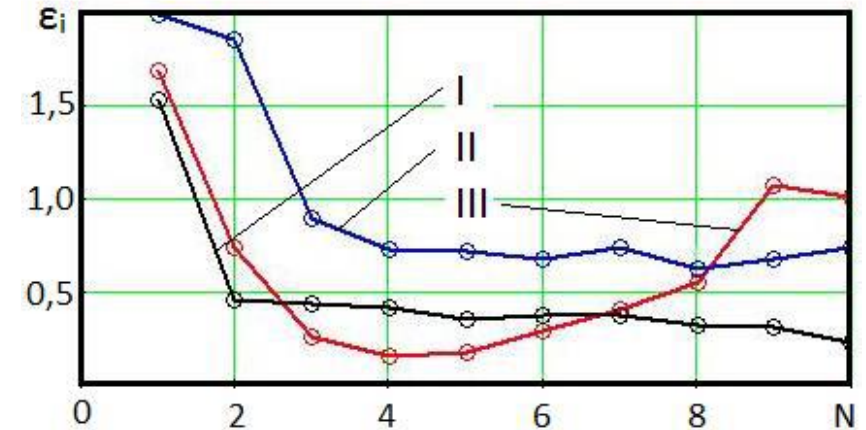


Рис. 11. Графік розподілу інтенсивності деформації залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

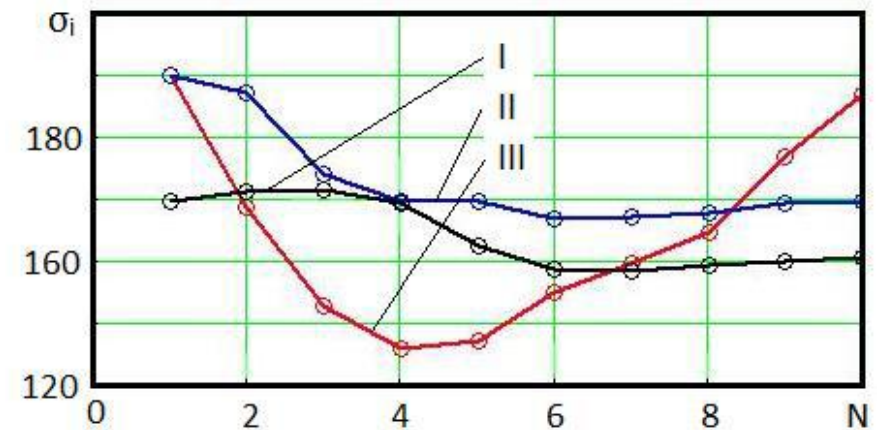


Рис. 12. Графік розподілу опору деформування залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

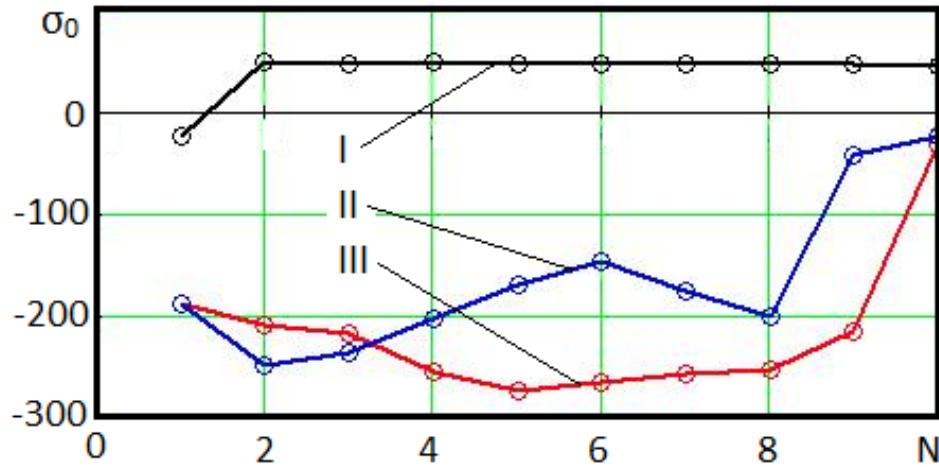


Рис. 13. Графік розподілу гідростатичного тиску залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

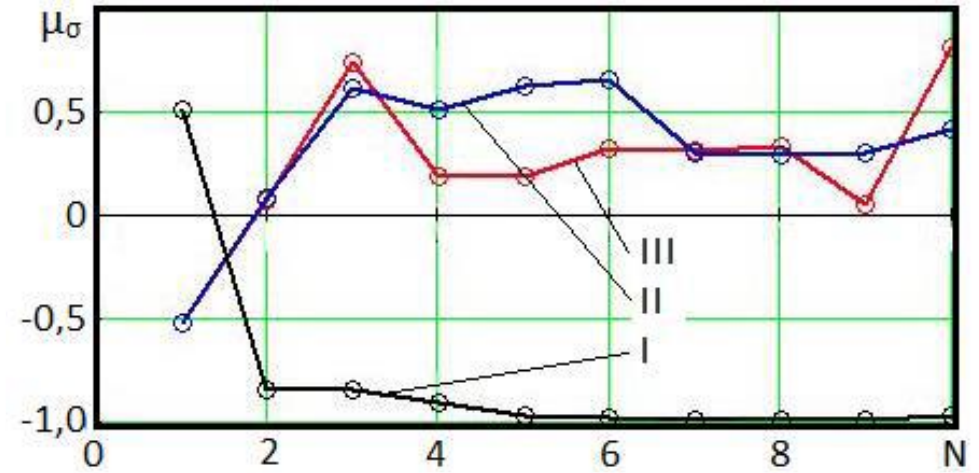


Рис. 14. Графік розподілу параметра Надаї-Лоде залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

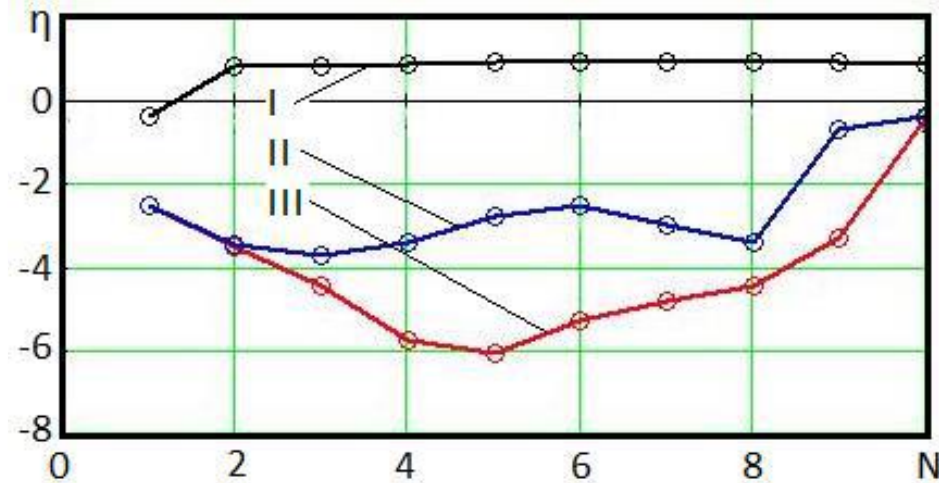


Рис. 15. Графік розподілу показника жорсткості напруженого стану в залежності від номера трасованої точки по перерізу заготовки

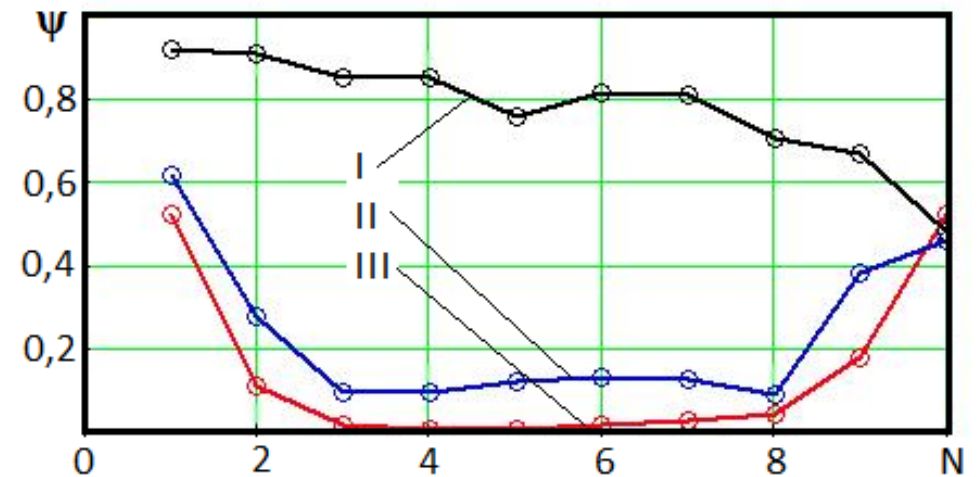


Рис. 16. Графік розподілу ресурсу пластичності залежно від номера трасованої точки по перерізу заготовки

## ВИСНОВКИ

1. Процеси точного об'ємного штампування є ресурсозберігаючими технологіями, які забезпечують мінімальні витрати та високу точність готових виробів. Для дослідження процесів видавлювання використовується велика кількість методів. Для виготовлення деталей складної форми з високим ступенем точності і з меншими робочими навантаженнями перспективним є використання процесів, заснованих на нових способах комбінованого видавлювання в роз'ємних та рухомих матрицях. Незважаючи на наявність рішень щодо визначення силового режиму та напружено-деформованого стану заготовки у процесах видавлювання деталей складної конфігурації залишається актуальним питання уточнення цих рішень стосовно процесів комбінованої течії.
2. Енергетичним методом балансу потужностей отримано аналітичні залежності приведенного тиску деформування від геометричних параметрів процесу для схеми з прямокутними модулями та схеми, що враховує наявність фасок на інструмент (з трапецеїдальними модулями). Встановлено, що значення приведенного тиску деформування та розкриття матриць при деформуванні в інструменті з фасками вище на 7-10% порівняно з використанням інструменту без фасок.
3. З використанням методу кінцевих елементів проведено оцінку вичерпання ресурсу пластичності заготовок. Визначено небезпечні зони з погляду руйнування, що знаходяться між перехідними кромками інструменту та на периферії фланця. Встановлено, що найбільш небезпечною з точки зору руйнування є периферія фланця і при досягненні ступеня деформації  $\epsilon_{\max}=0,75$  настає руйнування фланця.
4. Розроблено технологічні рекомендації та методику проектування процесів та штампів комбінованого тристороннього видавлювання деталей типу «стакан з фланцем та відростком» на основі створеної бази розрахункових схем та програмних продуктів, що забезпечує зниження витрат та часу на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва.
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: «Моделювання силового режиму процесу комбінованого видавлювання енергетичним методом»**

**Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота**

(БДР, МКР)

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

Показники звіту подібності Unischek

**Оригінальність 88,3% Схожість 11,7%**

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 Unischek щодо роботи.

Автор роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Базалівський Д. І.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Сивак Р. І.  
(прізвище, ініціали)