

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*  
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Удосконалення технологічного процесу виготовлення глибоких  
порожнистих циліндрів з листових заготовок»

Виконав: студент групи ТМ-16дм

Ситнік Б.В.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник Сергієнко О.В.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент Шевченко О.В.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет *Інженерії*  
Кафедра *Машинознавства та обладнання промислових підприємств*  
Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*  
Спеціальність *131 Прикладна механіка*  
Спеціалізація *Технології машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри МОПП

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. *Архипов О.Г.*  
16 березня 2018 р.

ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

*Ситнік Богдан Вікторович*  
виконавець

1. Тема проекту ***Удосконалення технологічного процесу виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових заготовок.***

Керівник проекту (роботи) *к.т.н., доц. Сергієнко О.В.*  
затверджені наказом вищого навчального закладу від *13 березня 2018 року № 62/78-02*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *01.06.2018 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *у відповідності до наукового напрямку роботи кафедри МОПП «Ресурсозберігаючі технології обробки металів»*

---

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
*Вступ. Аналітичний огляд. Мета та задачі досліджень. Математичне моделювання процесу обробки. Експериментальна частина. Обробка результатів експериментів. Охорона праці та техніка безпеки при проведенні науково-дослідних робіт. Висновки та рекомендації.*

---

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

*5.1. Схема технологічного процесу обробки – 1 аркуш формату А1.*

*5.2. Математична модель процесу обробки - 1÷2 аркуша формату А1.*

*5.3. Графіки (або інший ілюстраційний матеріал) за результатами досліджень - 1÷4 аркуша формату А1.*

*5.4. Схема експериментальної установки – 1 аркуша формату А1.*

---

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

7. Дата видачі завдання 16.03.2018 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання етапів	Примітка
	<i>Аналітичний огляд</i>	<i>18.03.2018 р.</i>	
	<i>Мета та задачі досліджень</i>	<i>22.03.2018 р.</i>	
	<i>Математичне моделювання процесу обробки</i>	<i>15.04.2018 р.</i>	
	<i>Експериментальна частина</i>	<i>10.05.2018 р.</i>	
	<i>Обробка результатів експериментів</i>	<i>18.05.2018 р.</i>	
	<i>Охорона праці та техніка безпеки при проведенні науково-дослідних робіт</i>	<i>22.05.2018 р.</i>	
	<i>Висновки та рекомендації</i>	<i>25.05.2018 р.</i>	
	<i>Графічний матеріал:</i>	<i>29.05.2018 р.</i>	<i>Графічний матеріал виконується поетапно під час проробки розділів поз.3÷7</i>
	<i>Схема технологічного процесу обробки</i>		
	<i>Математична модель процесу обробки</i>		
	<i>Графіки ( або інший ілюстраційний матеріал)</i>		
	<i>Схема експериментальної установки</i>		

Студент \_\_\_\_\_ *Ситнік Б.В.*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ *Сергієнко О.В.*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему:

Удосконалення технологічного процесу виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових заготовок

Пояснювальна записка містить: сторінок – 110, ілюстрацій – 21, таблиць – 9, посилань – 39, графічного матеріалу – 17 аркушів формату А4.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових заготовок.

Метою даної магістерської роботи є підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів виготовлення глибоких порожнистих циліндрів на основі розвитку математичних моделей для їх багатоваріантного автоматизованого проектування.

У першому розділі показано, що найбільш ефективним технологічним процесом виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових матеріалів є комбіноване витягування, яке представляє собою одночасну зміну діаметра заготовки і її товщини та дозволяє виготовляти вироби з підвищеною точністю діаметральних розмірів і більш зміцненою стінкою, що призводить до значної економії енергетичних і трудових ресурсів.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямку та методів дослідження.

У третьому розділі розроблено математичну модель розрахунку напружено-деформованого стану металу при комбінованому витягуванні порожнистих циліндрів з листового матеріалу для першої і наступних операцій витягування з урахуванням зміни товщини і зміцнення металу в елементах заготовки на етапах деформування.

У четвертому розділі виконано зіставлення результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень зусиль, деформацій та механічних властивостей виробів, що підтвердило достовірність отриманих математичних моделей.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт процесів холодного штампування.

Методи дослідження – аналітично-чисельний метод, метод спільного рішення рівнянь рівноваги і пластичності, метод балансу робіт, методи математичної статистики.

**Ключові слова:** комбіноване витягування, напружено-деформований стан (НДС), математичне моделювання, апроксимація, експериментальне дослідження.

## **Зміст пояснювальної записки магістерської роботи**

**Тема:** Удосконалення технологічного процесу виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових заготовок.

**Виконавець роботи:** Ситнік Б. В.

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГЛИБОКИХ ПОРОЖНИСТИХ ЦИЛІНДРІВ.....	8
1.1 Застосування витягування для виготовлення порожнистих циліндрів з листових матеріалів.....	8
1.2 Витягування без потоншення стінки.....	11
1.3 Витягування з потоншенням стінки.....	17
1.4 Комбіноване витягування.....	21
1.5 Мета та задачі дослідження.....	27
2 ВИБІР НАПРЯМКУ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
2.1 Застосування багатоваріантного проектування - основний напрямок підвищення якості проектних робіт.....	29
2.2 Вибір методів теоретичного дослідження.....	31
2.3 Вибір методів експериментального дослідження.....	32
2.4 Методика обробки результатів експериментальних досліджень...	38
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ВИТЯГУВАННІ.....	40
3.1 Перший перехід комбінованого витягування.....	40
3.2 Наступні переходи комбінованого витягування.....	60
3.3 Алгоритм чисельного математичного моделювання напружено-деформованого стану металу на етапах комбінованого витягування...	67
3.4 Застосування математичного моделювання для дослідження комбінованого витягування.....	73
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	

МЕТАЛУ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ....	81
4.1 Умови проведення експериментів.....	81
4.2 Результати експериментальних досліджень.....	82
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....	95
5.1 Загальні вимоги охорони праці.....	98
5.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи.....	99
5.3 Вимоги охорони праці під час роботи.....	101
5.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи.....	103
5.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях.....	103
ВИСНОВКИ.....	105
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	107

## ВСТУП

Найважливішим завданням машинобудування в сучасних умовах є забезпечення конкурентоспроможності продукції, що випускається, що обумовлює різке підвищення вимог до якості і експлуатаційних властивостей виробів при зниженні собівартості їх виробництва. Успішному вирішенню цього питання в значній мірі сприяє застосування високоефективних технологій і підвищення якості їх проектування, що реалізовує економію матеріальних, трудових ресурсів та енергозбереження.

У різних галузях промисловості таких як машинобудування, приладобудування, точна індустрія, виробництво деталей боєприпасів стрілецької та артилерійської зброї та ін. знаходять широке поширення глибокі порожнисті циліндричні деталі, що виготовляються з листового матеріалу різними способами витягування: витягування без потоншення, витягування з потоншенням стінки і комбіноване витягування. Останнє є найбільш ефективним для виготовлення деталей з глибокою порожниною. Вона являє собою формозміну з одночасним зменшенням діаметра заготовки і товщини стінки. Комбіноване витягування дозволяє виготовляти вироби з підвищеною точністю діаметральних розмірів, більш зміцненою стінкою, досягати високих ступенів деформації в порівнянні з витягуванням без потоншення і з потоншенням стінки, що дає можливість інтенсифікувати процес за рахунок скорочення числа штампувальних операцій.

Проектування технологічних процесів витягування порожнистих деталей в більшості своїй засноване на застосуванні емпіричних граничних коефіцієнтів формозміни з довідкових матеріалів, а також результатів теоретичних досліджень, в яких не в повній мірі враховують ряд практично важливих параметрів процесу. Це породжує помилки при проектуванні технологічних процесів, а в ряді випадків призводить до необхідності експериментального доопрацювання технологій, що подовжує терміни підготовки виробництва.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ГЛИБОКИХ ПОРОЖНИСТИХ ЦИЛІНДРІВ

## 1.1 Застосування витягування для виготовлення порожнистих циліндрів з листових матеріалів

Витягування є однією з поширених операцій листового штампування. У машинобудуванні, приладобудуванні, точній індустрії, виробництві деталей боєприпасів стрілецької та артилерійської зброї, літакобудуванні, ракетобудуванні та в інших галузях знаходять широке поширення і масовий випуск циліндричні вироби, що виготовляються з листового матеріалу з використанням різних процесів витягування [1]: витягування без потоншення стінки, витягування з потоншенням стінки, комбіноване витягування. До них часто пред'являються підвищені вимоги щодо механічних властивостей, розмірної точності та якості поверхні.

Найбільшого поширення у виготовленні порожнистих виробів для різних галузей промисловості й у виробництві товарів побутового призначення має витягування без потоншення. До недоліків цього способу витягування відносяться низька продуктивність (велике число операцій) при виготовленні глибоких виробів і невисока точність по діаметральним розмірам і по товщині стінки.

Витягування з потоншенням стінки є основним технологічним методом виготовлення циліндричних деталей глибиною до 10 діаметрів (гільзи, тонкостінні труби, балони і т. п.). Цей спосіб дозволяє отримати деталі, які мають більш високу точність діаметральних розмірів (10 - 11 квалітет) і малу шорсткість поверхні, ніж попередній, однак число операцій в технологічному процесі, заснованому на витягуванні з потоншенням, залишається значним.

При виготовленні деталей з глибокої порожниною істотно інтенсифікувати процес можна комбінованим витягуванням, яке характеризується одночасною зміною діаметра заготовки, що витягається, і товщини стінки. Цей спосіб дозволяє виготовляти вироби з підвищеною точністю діаметральних розмірів, більш зміцненої стінкою, досягати високих ступенів деформації в порівнянні з



двома іншими способами витягування, що призводить до значного скорочення числа операцій технології [2].

Застосовуючи комбіноване витягування, за одну (першу) операцію отримують деталь висотою до 1,5 її діаметра, в той час як висота деталей, одержуваних одноопераційним витягуванням без потоншення, не перевищує 0,7 ... 0,8 їх діаметра. А для витягування без потоншення деталі висотою, що дорівнює 1,5 її діаметра, потрібно дві або три операції. Це пояснюється тим, що при комбінованому витягуванні має місце ефект підвищення несучої здатності небезпечного перетину у дна в зв'язку з додатковим зміцненням його за рахунок обтиску в зазорі між матрицею і пуансоном на етапі витягування з потоншенням, і розвантажує вплив тертя по пуансону.

Комбіноване витягування дозволяє не тільки скоротити число операцій, а й отримувати точність і шорсткість поверхні як при витягуванні з потоншенням. Воно застосовується для отримання деталей, у яких товщина стінки менше товщини дна. Це - корпуси гідро- і пневмоциліндрів, амортизаторів, акумуляторів, шахтних стійок, фільтрів високого тиску, гільзи та ін.

Однак, незважаючи на зазначені переваги, комбіноване витягування поки ще не має достатньо широкого використання у виробництві. Причини полягають як у недостатній вивченості процесу, так і в не виправдано традиційно негативному ставленні фахівців до поєднання в одній операції витягування без потоншення і витягування з потоншенням. До початку 70-х років минулого століття в літературі по листовому штампуванню для витягування без потоншення зазвичай рекомендувалося прагнути до «чистого» витягування, тобто уникати навіть потоншення потовщеного краю стінки [1, 3]. При витягуванні з потоншенням було помітне прагнення до «чистого» протягування, тобто до зменшення внутрішнього діаметру заготовки-циліндра лише в межах десятих часток міліметра, достатніх для введення пуансона в заготовку [3, 4].

Комбіноване витягування на наступних переходах було застосоване вперше С.А. Валієвим в 1954 р. [2]. При виготовленні циліндричних порожнистих виробів з тонколистової низьковуглецевої сталі з коефіцієнтами

деформації  $m_{d_i} = \frac{d_i}{d_{i-1}} = 0,77$  і  $m_{s_i} = \frac{s_i}{s_{i-1}} = 0,8$  нова технологія забезпечила скорочення числа операцій удвічі в порівнянні з витягуванням з потоншенням.

Починаючи з 1957 р. С.А. Валієвим виконувалися експериментальні і теоретичні дослідження та впровадження у виробництво технологічних процесів комбінованого витягування. У 1973 р. С.А. Валієвим опубліковано монографію [2], в якій викладені основи комбінованого витягування з ізотропних листових матеріалів, дана методика розрахунку оптимальних параметрів технології і штампового інструменту, наведені нові технологічні рішення і конструкції штампів, що забезпечують інтенсифікацію процесів витягування.

При комбінованому витягуванні найбільш раціональним з точки зору продуктивності, є технологічний процес, в основі якого лежать максимальні деформації зменшення діаметра заготовки на кожному переході, а деформації потоншення відіграють допоміжну роль. Цей висновок автор робить на підставі більшої складності здійснення процесу потоншення стінки, маючи на увазі великі напруги в осередку деформації, проблеми зі змащенням, міцністю деформуєчого інструменту, різностінність та ін. Без пояснень Валієв С.А. [2] зазначає, що існує певне значення коефіцієнта потоншення, при якому ступінь деформації зменшення діаметра заготовки в комбінованому процесі має найбільшу величину. При цьому, розглядаючи граничне формозмінення, автор вважає, що руйнування заготовки при комбінованому витягуванні можливо в один з двох критичних моментів деформації. Перший - в момент початку потоншення стінки. Другий критичний момент виникає незадовго до кінця операції, коли спільний вплив напружень від деформації металу, що знаходиться вище верхньої межі осередку деформації потоншення, і потоншення найбільш потовщеного краю заготовки може викликати відрив її верхнього краю.

Рекомендації по вибору коефіцієнтів деформації при комбінованому витягуванні на першому і наступних переходах представлені такими принциповими положеннями [2].

1. Коефіцієнти деформації зменшення діаметра (коефіцієнти витягування) повинні бути ближче до граничних зі звичайним коефіцієнтом запасу, так як схема комбінованого процесу не погіршує коефіцієнти витягування.

2. Коефіцієнти потоншення необхідно вибирати в оптимальних діапазонах на основі граничного коефіцієнта для даного матеріалу з урахуванням істинних коефіцієнтів потоншення найбільш товстих ділянок заготовки.

Розрахунок дійсних коефіцієнтів деформації потоншення Валієв С.А. рекомендує вести за отриманими ним аналітичними формулами з коригуванням значень коефіцієнтів запасу.

Аналіз досвіду застосування комбінованого витягування показав важливу особливість цієї операції в частині досяжної точності геометричних розмірів виробів і впливу анізотропії листового матеріалу на розмірну точність і весь процес цього методу листового штампування.

Для комбінованого витягування циліндрів з маловуглецевої сталі, алюмінієвих і мідних сплавів загальними є такі залежності [2]:

- в порівнянні з витягуванням без потоншення стінки при комбінованому витягуванні ступінь фестоноутворення значно нижче, в 1,6 ... 2,7 рази, що дозволяє істотно скоротити витрати матеріалу при обрізанні краю циліндра;

- ступінь фестоноутворення зростає, а інтенсивність росту убиває із зменшенням коефіцієнта витягування;

- ступінь фестоноутворення тим менше, чим менше вихідна анізотропія матеріалу.

У зв'язку з таким впливом анізотропії на фестоноутворення при комбінованому витягуванні коливання товщини стінки деталі відповідають допускам 7 - 10 квалітетів. Відхилення по зовнішньому діаметру у латунних циліндрів укладаються в поле допусків 7 квалітету, у сталевих - в поле допусків 7 - 9 квалітетів.

## **1.2 Витягування без потоншення стінки**

Розвиток теорії процесу витягування без потоншення стінки пов'язано з роботами вітчизняних і зарубіжних вчених: Ю.А.Аверкієва, А.Ю.Аверкієва,

С.І.Вдовіна, С.І.Губкіна, В.Д.Головльова, В.А.Євстратова, В.А.Жаркова, Г.Закса, А.Н.Малова, І.А.Норіцина, А.Г.Овчіннікова, Е.А.Попова, В.П.Романовського, В.І.Стеблюка, Р.Хіллу, Л.А.Шофмана, С.П.Яковлева та ін. Ними проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесів витягування, вивчено вплив параметрів обладнання, оснащення та технології, накопичений і систематизований великий виробничий досвід.

У роботах Е.А.Попова, А.Д.Томльонова, Л.А.Шофмана та ін. розвинена інженерна теорія витягування [6, 7]. При цьому використовувалася умова пластичності Сен-Венана, зміна товщини матеріалу і його зміцнення враховуються приблизно. Товщина заготовки приймається незмінною або її зміна враховується наближено [7].

Зміцнення матеріалу грає істотну роль в різних процесах холодного штампування. Необхідність отримання порівняно простих аналітичних рішень призвела до вишукування простих способів врахування впливу зміцнення. Залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій апроксимується різного роду аналітичними виразами: лінійною функцією [4], статечною [5]. Криві зміцнення різних матеріалів при холодній деформації наводяться в різних довідниках [1, 3]. Наближено враховуються сили тертя, що діють на фланець заготовки. Вони умовно прикладаються до зовнішнього краю заготовки, в деяких роботах [7, 9] ними взагалі нехтують.

У різний час пропонувалися різні феноменологічні залежності сил тертя від нормального тиску, що використовуються в теорії листового штампування [7]. Найбільш часто в розрахунках тертя використовується закон Кулона з експериментальним визначенням коефіцієнта пропорційності сил тертя по відношенню до сил тиску. При витяжці сталевих заготовок приймають  $\mu = 0,05 \dots 0,1$ , з алюмінієвих сплавів  $\mu = 0,1 \dots 0,15$ .

В роботі [8] вперше зроблена спроба в розробці математичної моделі напружено-деформованого стану (НДС) металу при витягуванні пласкої вісесиметричної заготовки з урахуванням розподілу на поверхні фланця напруги тертя і нормальних контактних напружень від дії сил притиску згідно

статечного закону, в якій показано, що це уточнює значення радіальних напружень у фланці на 15...30%.

Отримана в роботі [7] залежність дозволяє приблизно встановити значення радіального напруження в пласкій частині заготовки:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} + \frac{\mu Q}{\pi R S}, \quad (1.1)$$

де  $\sigma_s$  - напруга плинності;

$R$  - радіус по контуру заготовки;

$\rho$  - поточне значення радіуса;

$Q$  - зусилля притиску;

$S$  - товщина заготовки.

Перший доданок у виразі (2.1) являє складову радіального напруження, необхідного для пластичної деформації фланця, яке отримано спільним рішенням рівняння рівноваги і пластичності Сен-Венана.

Вплив вигину і випрямлення заготовки на кромці матриці на величину радіального напруження оцінено поправкою на вигин  $\Delta\sigma_{\rho}$ , на яку поступово збільшується радіальне напруження:

$$\Delta\sigma_{\rho} = \frac{1}{4} \sigma_s \frac{S}{2r_m + S}. \quad (1.2)$$

Вплив тертя на кромці матриці враховано множником  $e^{\mu\alpha}$ , де  $\alpha$  - кут охоплення заготівлею закругленої кромки матриці.

При сталому характері витягування, коли заготовка повністю охоплює закруглені кромки матриці і пуансона ( $\alpha = \pi/2$ ), є одна ділянка радіального вигину і одна ділянка випрямлення заготовки, тому повний приріст радіальної напруги визначається як подвоєна сума  $\Delta\sigma_{\rho}$ . Тоді максимальна величина розтягуючої напруги, що діє на кордоні пластично деформуємої частини заготовки ( $\rho = r$ ) визначається за формулою:

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_s \left( \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S \sigma_s} + \frac{S}{2r_m + S} \right) e^{\mu \frac{\pi}{2}}. \quad (1.3)$$

У початковій стадії витягування випрямлення заготовки не відбувається, тому враховується тільки вигин матеріалу по пуансону і матриці.

Аналітична інтерпретація вигину і випрямлення заготовки, що міститься в роботі [7], однакова при витягуванні і згинанні, що на думку ряду авторів є спірним. Однак дослідження стану заготовки на ділянці переходу через закруглену кромку матриці, виконане методом кінцевих елементів [9], показало, що для рекомендованих оптимальних значень радіусів заокруглень матриць  $r_m = (5...15)S$  величина приросту радіальної напруги  $\Delta\sigma_\rho$  згідно (1.2) виявляється завищеною приблизно на 10% в порівнянні з рішенням задачі методом кінцевих елементів, і мало позначається на розрахунковій граничній глибині витягування.

Граничний коефіцієнт початковій стадії витягування без урахування тертя, зміцнення і анізотропії матеріалу виявляється рівним  $K = 2,72$ . При використанні умови пластичності Мізеса отримано інше значення цього коефіцієнта - 2,48 [8]. У цій же роботі уточнено положення шару, що розмежовує зони потовщення і потоншення фланця заготовки:  $r_n = 0,59R$ , замість  $r_n = 0,61R$  [7].

Для реальних умов витягування аналітичні вирази граничного коефіцієнта витягування часто не вдається отримати в явному вигляді, незважаючи на використання серйозних припущень.

З кінця 80-х років минулого століття слід розглядати новий етап розвитку теорії витягування листового матеріалу. Це пов'язано, перш за все, з тим, що аналітичні методи аналізу напружено-деформованого стану металу навіть для осесиметричного витягування повністю вичерпали себе. Всілякі прийоми в аналітичному визначенні напружень, деформацій, швидкостей деформацій не дозволяли отримати рішення без серйозних припущень. Для вирішення назрілої проблеми на допомогу дослідникам прийшла обчислювальна техніка, яка дозволила аналіз напружено-деформованого стану заготовки в процесах штампування повністю або частково здійснювати чисельно різними методами.

Дослідження напружено-деформованого стану при витягуванні з використанням ЕОМ проводилися як в Україні [4, 5], так і за її межами [8, 9].

У роботі С.І. Вдовіна [10] використаний метод переміщень, відповідно до якого утворення заготовки розбивається на елементи і задається радіальне переміщення крайнього елемента; по ньому послідовно обчислюються збільшення деформацій і напружень з використанням рівнянь рівноваги, умови сталості обсягу, рівнянь зв'язку напружень і збільшень деформацій по теорії течії, переміщення і параметри напружено-деформованого стану інших елементів. Процес розрахунку має ітераційний характер; суттєво, що на кожному етапі враховується зміна товщини заготовки.

В аналізі переміщення елементів на кромці матриці використовується метод кінцевих елементів. При цьому для визначення приросту меридіональних напружень  $\Delta\sigma_\rho$ , обумовлених вигином (випрямленням), використовується традиційний метод балансу робіт.

В роботах В.А.Жаркова [11, 22, 23] вдало поєднуються традиційні інженерні методи розрахунку з методом кінцевих елементів і, тим самим, автор вніс значний внесок в автоматизацію розрахунків процесу витягування з використанням ЕОМ. У цих роботах враховується зміна товщини заготовки в процесі деформування, а також зміцнення і анізотропія матеріалу. Аналіз напружено-деформованого стану витягування осесиметричних деталей ведеться на основі математичного моделювання, яке полягає в тому, що весь процес формозміни розбивається на велику кількість етапів і задають малий приріст ходу пуансона. Для кожного етапу деформування розраховують обсяг матеріалу, який на даному етапі повинен бути втягнутий з фланця та, тим самим, визначають приріст переміщення частинок заготовки на внутрішньому контурі фланця. За величиною обчисленого переміщення визначають компоненти ПДВ заготовки і практично важливі параметри процесу. Для етапів деформування, коли пластичні деформації охоплюють весь фланець, прийнята розрахункова модель плоского напруженого стану ізотропного зміцнюваного тіла з використанням умови пластичності Мізеса.

Для обліку анізотропії властивостей листового матеріалу автор застосовує математичне моделювання за допомогою методу кінцевих елементів.

Розроблена методика аналізу процесу витягування на основі математичного моделювання дозволяє вести різноманітне проектування і вибрати найкращий варіант для конкретних умов здійснення витягування.

Прикладом використання гібридного аналітично-чисельного підходу для математичного моделювання процесу витягування є роботи В.М.Левченка, виконані під керівництвом професора В.А.Євстратова [6]. Автори використовували енергетичний метод для отримання математичних моделей процесів витягування, а також методи чисельного інтегрування і мінімізації функцій для виконання математичних експериментів, і визначення практично важливих параметрів процесу витягування. Моделювання процесу витягування ведеться з урахуванням зміни товщини заготовки, впливу вигину металу на кромці матриці, притиску і зміцнення матеріалу.

Іншим прикладом чисельного підходу до моделювання напружено-деформованого стану при осесиметричному витягуванні з листового матеріалу є дослідження, виконані в Донбаській державній машинобудівній академії Аль-Хурані Мохаммад Камал Мохаммад під керівництвом д.т.н. Тарасова А.Ф. [12]. Математичне моделювання операцій витягування осесиметричних деталей здійснювалося на основі чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму в осередку деформації. Математична модель напружено-деформованого стану металу заготовки складена з урахуванням зміцнення, зміни товщини заготовки і розподілу напружень тертя і нормальних контактних напружень по фланцю заготовки від дії сили притиску. Математична модель витягування та складений на її основі алгоритм використаний в якості компонента САПР технологічних процесів листового штампування, що забезпечує різноманітне комп'ютерне проектування осесиметричних порожнистих деталей з листових матеріалів.

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок про те, що в даний час для витягування без потоншення стінки порожнистих циліндрів з листових матеріалів є досить досконалий математичний апарат для



аналізу процесу і автоматизованого проектування. Для САПР технологічних процесів малого і середнього рівнів найбільш ефективними є математичні моделі, засновані на інженерних аналітичних рішеннях для напружено-деформованого стану елементів деформуємої заготовки, що забезпечують різноманітне проектування операцій на базі чисельної реалізації поетапного послідовного розрахунку напружень, граничних деформацій і зусиль з урахуванням зміцнення, зміни товщини заготовки, сил тертя і інших чинників.

### **1.3 Витягування з потоншенням стінки**

Теорії процесу витягування циліндричних заготовок зі стоншенням стінок і аналогічному з ним процесу волочіння на рухомій оправці присвячена велика кількість робіт, заснованих на методах спільного рішення наближених рівнянь рівноваги і умови пластичності [7], методі ліній ковзання [13], методі верхньої оцінки [5], методі балансу робіт [6].

Характерною особливістю процесу витягування зі стоншенням стінки є той факт, що сили тертя на контактних поверхнях матриці і пуансона мають різні напрямки, і сили тертя матеріалу по пуансону здійснюють корисну роботу. Тому зусилля витягування (по пуансону), більше зусилля, яке сприймають стінки заготовки на виході з матриці, тобто тертя пуансона по заготівці сприяє передачі їй деформуючого зусилля і, тим самим, забезпечує деяке розвантаження небезпечного перетину, зменшуючи розтягуючі напруги в стінках протягнутої частини заготівлі.

У зв'язку з цим при витяжці з потоншенням стінки гранична ступінь деформації тим більше, чим більше значення коефіцієнта тертя на пуансоні і чим більше поверхня силового контакту пуансона з заготовкою. З цієї ж причини максимальна сумарна ступінь деформації при здійсненні витягування одночасно або послідовно через дві або більше матриць, розташованих одна над іншою, більше, ніж при витягуванні через одну матрицю. Певною мірою розвантаження небезпечного перетину відбувається і за рахунок конусності пуансона при витяжці деталей з конічною порожниною.

В роботі [13] автори виконали детальний аналіз стану теорії процесу витягування з потоншенням стінки на той час, в якому показали, що більшість формул, запропонованих авторами для визначення зусилля витягування виявляються непридатними, так як вони не відображають дійсного характеру впливу різних чинників на зусилля витягування. Причинами цього є: ототожнення тягнучого зусилля і зусилля витягування; зневага впливом кута ската матриці при визначенні тягнучого зусилля; відсутність обліку роботи зсуву на кордонах осередку деформації та ін.

У згаданій вище роботі [13] запропоновано формули для визначення зусилля витягування через одну матрицю циліндричним і конічним пуансоном і через дві матриці при послідовному витягуванні циліндричним пуансоном, отримані на основі методу ліній ковзання з урахуванням «додаткових» ефектів деформації. При виведенні формул для зусилля витягування прийнято допущення, що робота, яка витрачається на деформацію форми, в реальних умовах мало відрізняється від роботи деформації при відсутності тертя. Складову зусилля тертя, що витрачається на деформацію форми, автори визначають через питому роботу формозміни з використанням рішення Р. Хілла для зусилля плоского витягування без урахування тертя. Втрати на тертя об матрицю і пуансон приблизно враховані додатковими складовими зусилля витягування. Поправочними коефіцієнтами враховується вплив тангенціальної деформації на зміну зусилля в залежності від відносної товщини стінки напівфабрикату.

Розглядаючи зазначені публікації раннього періоду, присвячені аналізу процесу витягування з потоншенням стінки, можна відзначити недостатню увагу в них ряду суттєвих моментів. Так, в більшості робіт не ставиться питання про вплив величини співвідношення коефіцієнтів тертя на поверхнях пуансона і матриці на напруги, зусилля і граничну ступінь деформації. У ряді з них при виведенні формул з метою спрощення їх в кінцевому вигляді, значення коефіцієнтів тертя на поверхнях матриці і пуансона приймаються однаковими [3, 4, 7, 13]

Такий підхід не робить істотного впливу на характер зміни зусилля витяжки в залежності від кута ската матриці і ступеня деформації, але може істотно спотворити характер залежностей напружень на виході з матриці і граничної ступеня деформації від параметрів процесу.

У деяких публікаціях даються формули для визначення напруг і зусиль, які містять різні значення коефіцієнтів тертя на поверхнях матриці і пуансона. Однак автори в більшості своїй не роблять глибокого аналізу їх з точки зору впливу коефіцієнта тертя на напруги і граничні ступеня деформації при витягуванні. Прагнення отримати формулу для визначення оптимального значення кута ската матриці, що забезпечує мінімальну напругу на виході з матриці, призводять до спрощення формул шляхом прийняття рівних значень коефіцієнтів тертя на поверхнях матриці і пуансона. В результаті чого будуються неправильні судження про існування у всіх випадках витягування оптимального кута ската матриці і даються формули для його визначення. Отримані таким чином спрощені формули не відображають дійсної картини, так як у зв'язку з протилежною дією тертя на поверхнях матриці і пуансона мінімум на кривих залежностей напружень від кута ската матриці може бути не у всіх випадках витягування.

Хибність існуючого судження в оцінці впливу співвідношення коефіцієнтів тертя на поверхні пуансона і матриці було показано в дослідженні процесу витягування з потоншенням стінки, виконаному в роботі [14]. На основі методу спільного рішення рівнянь рівноваги і умови пластичності, а також методу балансу робіт отримані формули для визначення напруг, зусиль деформування і гранично допустимого ступеня деформації по міцності стінки для витягування циліндричним і конічним пуансоном через одну і кілька матриць послідовно і одночасно.

Для витягування через одну матрицю циліндричним пуансоном отримані формули мають вигляд:

- розтягувальна напруга на виході з матриці:

$$\sigma_{\rho} = 2k \left\{ \frac{b+1}{b} \left[ 1 - \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^b \right] + \frac{\alpha}{2} + \frac{\sigma_{\rho_0}}{2k} \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^b \right\}, \quad (1.4)$$

де  $k = 0,577\sigma_s$  - постійна пластичності;

$\sigma_s$  - середнє значення напруги плинності в осередку деформації;

$$b = \frac{\mu_m - \mu_n}{\alpha};$$

$\mu_m, \mu_n$  - коефіцієнти тертя на контактних поверхнях матриці і пуансона;

$\alpha$  - кут ската матриці;

$S_0, S_1$  - товщини стінки до і після витягування;

$\sigma_{\rho_0}$  - нормальне напруження, що діє на верхній межі осередку деформації з боку металу, що знаходиться вище матриці.

- Зусилля витягування

$$P = \pi D_1 S_1 2k \left\{ \frac{b+1+C}{b} \left[ 1 - \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^b \right] + \frac{\alpha}{2} + \frac{\sigma_{\rho_0}}{2k} \cdot \frac{1}{b+1} \left[ (b+1+C) \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^b - C \frac{S_0}{S_1} \right] \right\}, \quad (1.5)$$

де  $D_1$  - діаметр пуансона;

$$C = \frac{\mu_n}{\sin \alpha}.$$

- Гранично допустима ступінь деформації по міцності стінки на виході з матриці:

$$\varepsilon_{max} \leq 1 - \left[ \frac{\frac{1,15}{1+n} \left( \frac{b+1}{b} + \frac{\alpha}{2} \right) - 1}{\frac{1,15}{1+n} \frac{b+1}{b} - \frac{\sigma_{\rho_1}}{\sigma_{s_1}}} \right]^{\frac{1}{b}}, \quad (1.6)$$

де  $n$  - показник деформаційного зміцнення;

$\sigma_{s_1}$  - напруження плинності матеріалу на виході з матриці.

Порівняння результатів розрахунку зусиль по отриманій формулі (1.5) з даними експерименту показало, що розбіжність їх не перевищує 15%.

Наведені описи рішень для напружено-деформованого стану металу заготовки при витягуванні з потоншенням стінки свідчать про те, що в них ряд аспектів деформування розглядається з певною схематизацією дійсної картини пластичної течії. Це, перш за все, відноситься до обліку деформаційного зміцнення матеріалу. Так, в найбільш досконалих рішеннях [13, 14] зміцнення матеріалу враховується шляхом прийняття до уваги середнього значення напруги плинності матеріалу в осередку деформації, що може привести до істотних погрешностей в обчисленні напруг, зусиль і граничних деформацій, особливо, при деформації заготовок зі змінною товщиною стінки.

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, необхідно удосконалити методику розрахунку параметрів напружено-деформованого стану заготовки при витягуванні з потоншенням стінки в напрямку створення математичної моделі операції, що дозволяє врахувати деформаційне зміцнення матеріалу в осередку деформації пропорційно зміні товщини стінки, і вести моделювання процесу витягування з заготовки зі змінною товщиною стінки.

#### **1.4 Комбіноване витягування**

Теорія комбінованого витягування вперше докладно розроблялася в роботах С.А. Валієва [2]. Розглядаючи послідовність формозміни при комбінованому витягуванні, автор виділяє дві стадії.

Перша стадія характеризується просторовим вигином з розтягуванням заготовки навколо крайок матриці і пуансона, поступовим збільшенням поверхонь контакту і наростанням деформуючого зусилля (рис. 1.1). У момент наближення центру заокруглення пуансона до рівня верхньої кромки робочого паска матриці заготовка охоплює робочу тороїдальну поверхню матриці; при цьому контури вогнища пластичної деформації на даній стадії повністю визначаються (див. рис. 1.1, а).

Момент збігу центру заокруглення пуансона з рівнем верхньої кромки робочого паска матриці є початком другої стадії (рис. 1.1, в). Друга стадія при

витягуванні, як пише С.А. Валієв, характеризується випрямленням в меридіональному перерізі елементів фланця вигнутих в першій стадії, зменшенням поверхні контакту заготовки з матрицею.

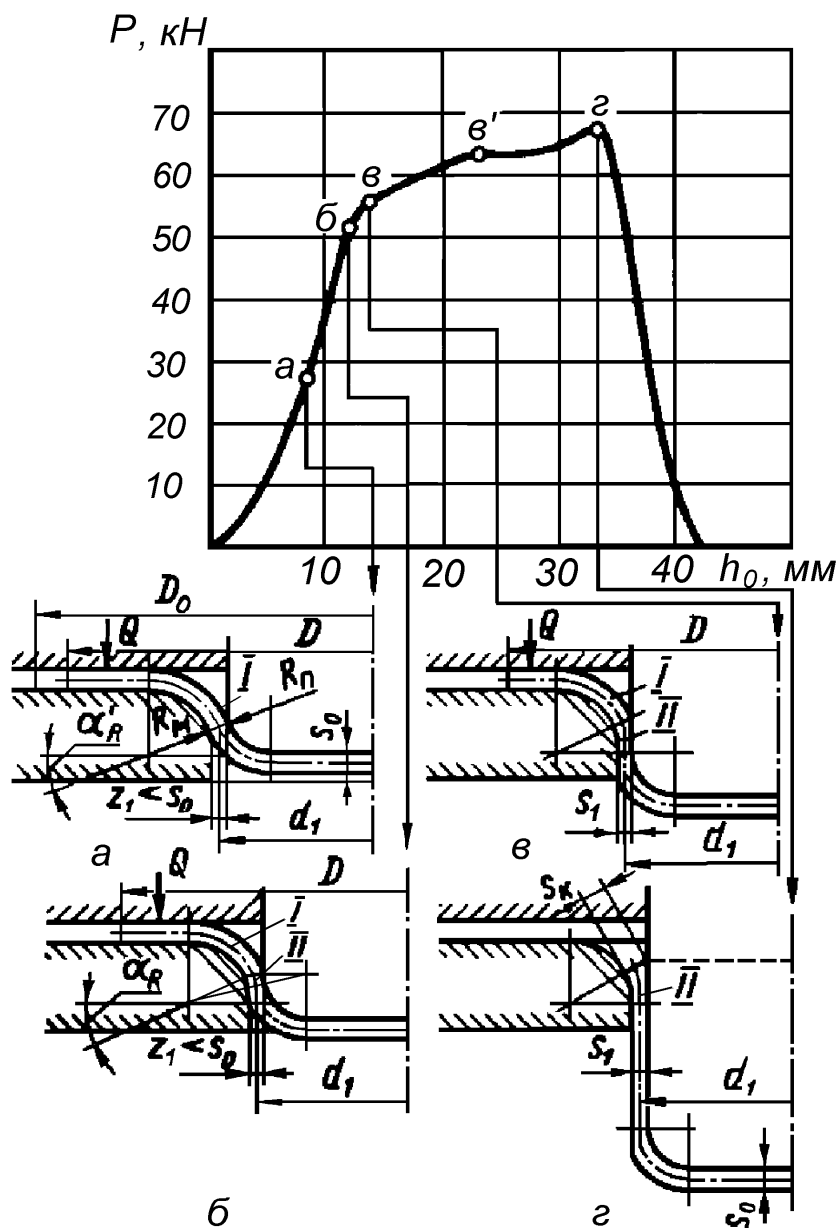


Рисунок 1.1 – Послідовність деформування заготовки при комбінованому витягуванні на радіальній матриці зі складкотримачем

Насправді при комбінованому витягуванні випрямлення відсутнє, так як початок формування осередку деформації потоншення відбувається на деякій відстані від кінця заокруглення кромки матриці. Ймовірно, тут можна погодитися з С.А.Валієвим, що випрямлення при комбінованому витягуванні замінюється зрушенням, пов'язаним з направленням течії металу на кордоні

осередку деформації потоншення. Далі, описуючи механізм формозміни, автор зазначає, що між першою і другою стадіями є перехідний етап, коли встановлюються контури зони вогнища деформації потоншення (рис. 1.1, б) на графіках зусилля-шлях це проявляється в різкому підйомі кривої (ділянка а - в на рис. 1.1).

Як показала практика, пише С.А.Валієв, руйнування заготовки зазвичай відбувається на етапі переходу першої стадії в другу, тобто зміна стадій відповідає критичному моменту деформації.

Після досягнення центром радіуса заокруглення пуансона рівня верхньої кромки робочого паска матриці починається власне комбінований процес (II-а стадія), що характеризується наявністю в осередку пластичної деформації двох зон: зони витягування без потоншення I і зони витягування з потоншенням II (див. рис. 1.1).

Згідно С.А.Валієву, на цьому етапі процес деформації на першому переході комбінованого витягування можна вважати квазістаціонарним процесом, так як, нехтуючи потовщенням фланця, зона II і за формою і за розмірами на деякій ділянці шляху пуансона залишається постійною, а обсяг зони I безперервно зменшується.

Фактично ж обсяг зони потоншення збільшується за рахунок потовщення заготовки в зоні I. Він досягає найбільшої величини на завершальному етапі другої стадії, коли зона I зникає і в зоні II відбувається витягування з потоншенням найбільш потовщеного краю заготовки. Незадовго до кінця операції виникає другий критичний момент, коли спільний вплив напружень від зони I і від потоншення потовщеного краю заготовки в зоні II може викликати відрив її верхнього краю. Кінець другої стадії є нестаціонарний процес витягування з потоншенням з осередком деформації, що зменшується.

На графіку зусилля-шлях етап власне комбінованого витягування виражається в підйомі кривої від місця відповідного переходу до комбінованого процесу (див. рис. 1.1, точка в), до максимуму, відповідного закінчення комбінованого деформування (див. рис. 1.1, точка г), а кінцевий етап витягування з потоншенням - крутим спадом зусилля до нуля.

Теоретичний аналіз напруженого стану при комбінованому витягуванні виконаний С.А.Валієвим [2] для ізотропного зміцнюваного матеріалу. При цьому для зони I витягування без потоншення використано рішення Е.А.Попова [7] у вигляді виразу для напруги на виході з матриці (1.3), яке після підстановки співвідношень, що описують комбіноване витягування, має вигляд формули для максимальної напруги в зоні I в критичний момент [2]

$$\sigma_{\rho_1 max} = 1,1\sigma_{sI} \frac{\left( \ln \frac{d_1}{D_0} + \frac{S_0}{4R_M} \right) (1 + 1,5\mu_M)}{1 - \frac{0,2\mu_M(1 + 1,5\mu_M)D_0}{d_1} \left( 1 - \frac{18(S_0/D_0)}{1 - d_1/D_0} \right)}, \quad (1.7)$$

$$\text{де } \sigma_{sI} = \frac{\sigma_\epsilon}{1 - \psi_p} \left( 1 - \frac{d_1/D_0}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}, \quad (2.8)$$

$\psi_p$  - рівномірне відносне поперечне звуження зразка при розтягуванні.

Наближений аналіз розподілу напружень в зоні II виконаний зі спрощенням конфігурації тороидальної контактної поверхні матриці в межах зони II у вигляді конічної, твірна якої нахилена до осі витягування під кутом

$$\alpha = \arccos \frac{r_m + S_I}{r_m + S_0}. \quad (1.8)$$

Напругу на виході з матриці деформації в зоні II визначено методом балансу робіт. Вираз для осьової розтягуючої напруги у вихідному перерізі на початку другої стадії має вигляд [2]

$$\sigma_{zI} = 1,15\sigma_{sII} \left\{ \left[ 1 + \frac{\mu_M}{\sin \alpha} \left( 1 - \frac{\sigma_{\rho_1 max}}{1,15\sigma_{sII}} \right) - \frac{\mu_M + \mu_M}{2 \sin \alpha} \ln \frac{S_0}{S_I} \right] \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{S_0}{S_I} + \frac{\sigma_{\rho_1 max}}{1,15\sigma_{sII}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right\}, \quad (1.9)$$



$$\text{де } \sigma_{sII} = \sigma_{\epsilon} \left( \frac{1 - \frac{d}{D_0} \frac{S_1}{S_0}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}}. \quad (1.10)$$

Для кінцевого етапу потоншення потовщеного краю стінки ( $\sigma_{\rho I} = 0$ ).

$$\sigma_{zk} = 1,15\sigma_{sk} \left\{ \left[ 1 + 2\mu_m - (\mu_n + \mu_m) \ln \frac{S_k}{S_1} \right] \ln \frac{S_k}{S_1} + \sin \frac{\alpha}{2} \right\}, \quad (1.11)$$

$$\text{де } S_k \approx S_0 \sqrt{\frac{D_0}{d_1}};$$

$$\sigma_{sk} = \sigma_{\epsilon} \left( \frac{1 - \frac{d_1}{D_0} \frac{S_1}{S_n}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}}. \quad (1.12)$$

Формули (1.7) і (1.9) призначені для визначення осьових розтягуючих напружень на виході з матриці відповідно в першій і другий критичні моменти. За ними дуже наближено можна оцінити величину напружень, оскільки, по-перше, вони не враховують дійсного значення товщини стінки на вході у вогнище деформації потоншення, як в першому, так і в другому випадку і, по-друге, значення напруг плинності, обчислені за формулами (1.8) і (1.10) представляють максимально можливі величини відповідно в I-й і II-й зонах деформації.

Таким чином, зазначені допущення дають підстави вважати, що наведене рішення для напруженого стану при комбінованому витягуванні не може дати точне рішення щодо граничної формозміни комбінованого витягування, для якого характерною є наявність змінної товщини і властивостей металу заготовки перед потоншенням, які формувались на етапі деформації плоского фланця.

У своїх роботах С.А.Валієв [2] на основі теоретичних і експериментальних досліджень наводить ряд рекомендацій по інтенсифікації процесів комбінованого витягування та раціональної побудови технологічних процесів

глибокого витягування порожнистих виробів. Більшість з них становлять значний інтерес як для науки, так і для виробництва.

Однак, на підставі викладеного вище, зауважимо, в тих випадках, де питання стосується рекомендацій чисельних значень граничного формозмінення, отриманих на основі розрахунків за його методикою, рішення слід піддавати перевірці.

Розглянемо деякі рекомендації С.А.Валієва щодо інтенсифікації комбінованого витягування.

1. Оптимальне розчленування процесу витягування на стадії призначається для зменшення максимальних деформуючих зусиль по ході витягування. Пропонується розчленувати процес формозміни заготовки в одному штампі на стадії з урахуванням характеру зміни складових опорів деформації витягування по шляху пуансона таким чином, щоб їх максимуми не збігалися за часом з максимумами розтягуючої напруги у фланці заготовки.

Оптимальне розчленування процесу полягає в тому, що на кожній операції заготовці повідомляється ступінь деформації, що забезпечує стійкий процес при невеликих зусиллях, причому наступна стадія починається у фазі зниження зусилля попередньої стадії. Ефект інтенсифікації процесу досягається за рахунок того, що максимальні зусилля стадії не складаються і, тим самим, зменшується розтягаюча напруга на виході з матриці і підвищується його несуча здатність.

2. Новий метод комбінованого витягування на наступному переході полягає в повному або частковому виключенні деформації потоншення стінки при комбінованому витягуванні порожнистої, попередньо отриманої таким же методом, заготовки. Подальше витягування виробляють після відпалу або без нього (в залежності від ступеня зміцнення), але без потоншення стінки. Тобто комбінований процес в такому разі відбувається в початковий момент подальшого переходу з потоншенням частини дна («донного бар'єру») заготовки до товщини стінки. Метод забезпечує стабільність здійснення подальшого переходу комбінованого витягування за рахунок створення ненапружених умов деформування «донного бар'єру» в місці переходу до

стілки, де виникає істотна нерівномірність деформації і підвищений рівень основних і додаткових напружень.

3. Комбіноване витягування через дві матриці на наступних переходах з сприятливим силовим режимом здійснюється для заготовок, які пройшли віджигання після першого переходу комбінованого витягування. Процес будується таким чином, що потоншення стінки в другій матриці починається після того, як закінчується комбіноване деформування донної частини заготовки в першій матриці і стінка або вільно проходить в зазорі між пуансоном і матрицею, або деформується незначно. В результаті процес формозміни в обох матрицях здійснюється майже послідовно, що виключає складання зусиль і істотно знижує силовий вплив на заготовку і штамп.

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, слід вважати актуальним розвиток теорії комбінованого витягування шляхом подальшого вдосконалення інженерних аналітичних рішень для напружено-деформованого стану деформованого матеріалу і використання цих рішень для створення математичних моделей з їх чисельною реалізацією на комп'ютері, які дозволять ефективно здійснювати різноманітне проектування технологій.

### **1.5 Мета та задачі дослідження**

Огляд літературних даних показує, що найбільш ефективним процесом виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових матеріалів є комбіноване витягування, яке представляє собою одночасну зміну діаметра заготовки і її товщини, і дозволяє досягати високих ступенів деформації в порівнянні з витягуванням без потоншення і витягуванням з потоншенням, виготовляти вироби з підвищеною точністю діаметральних розмірів і більш зміцненою стінкою, що призводить до значної економії енергетичних і трудових ресурсів.

Однак комбіноване витягування поки ще не має широкого використання у виробництві, що обумовлюється недостатньою вивченістю процесу. Зокрема, розроблені методи аналізу напружено-деформованого стану металу і силових параметрів при комбінованому витягуванні не враховують дійсних значень

товщини і напруги плинності металу на вході в осередок деформації потоншення, які істотно змінюються на етапі деформації плоского фланця заготовки. Відсутні також рішення, що враховують зміцнення матеріалу в самому осередку деформації потоншення пропорційно ступеня зміни товщини.

У сучасних умовах, у зв'язку з широкими можливостями і доступністю обчислювальної техніки для підвищення техніко-економічних показників процесів комбінованого витягування порожнистих циліндрів, необхідне створення математичних моделей процесів деформування для багатоваріантного автоматизованого проектування операцій технології.

Для досягнення поставленої мети в роботі були сформульовані наступні завдання:

1. Отримати аналітичне рішення для напружено-деформованого стану металу при комбінованому витягуванні порожнистих циліндрів з листових заготовок.

2. Розробити чисельні математичні моделі комбінованого витягування для першої і наступних операцій.

3. Провести експериментальну перевірку адекватності отриманих математичних моделей.

## **2 ВИБІР НАПРЯМКУ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **2.1 Застосування багатоваріантного проектування - основний напрямок підвищення якості проектних робіт**

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується різким підвищенням вимог до якості виробів при зниженні собівартості продукції. Це стимулює розробку високоефективних технологій, які відповідають зазначеним вимогам.

При розробці технологічних процесів витягування в основному використовують емпіричні залежності з різних довідкових матеріалів, а також результати теоретичних досліджень, які не враховують багато практично важливих параметрів. У багатьох випадках це призводить до необхідності експериментального доопрацювання процесу витягування, що подовжує терміни і здорожує підготовку виробництва виробу. Якщо ж експерименти не проводяться, то для надійності процесу передбачають підвищену кількість операцій і збільшену норму витрати листового прокату, що призводить до збільшення кількості штампів і трудомісткості виготовлення деталі.

У зв'язку з цим застосування в проектуванні комп'ютерного моделювання дозволить створити ще на стадії проектних робіт можливість дослідження закономірностей формозміни і отримати необхідну інформацію про розглянуті технологічні рішення за допомогою математичних моделей і сучасної обчислювальної техніки. В такому випадку ЕОМ перетворюються в експериментальну установку, коли за допомогою моделей визначаються характеристики проектованого процесу, а саме проектування ведеться в діалоговому режимі з використанням формальних і неформальних методів аналізу, що дозволяє на кожному етапі оперативно приймати найкраще рішення, використовуючи узагальнений в приватних моделях виробничий досвід і інтуїцію технолога.

Як показав аналіз стану питання, виконаний в розділі 1, найкращі результати аналізу напружено-деформованого стану в процесах ОМТ дає чисельне моделювання методом кінцевих елементів, кінцевих різниць тощо.

Однак, навіть при високій швидкодії сучасних ЕОМ процедура вирішення завдань великих пластичних деформацій МКЕ досить тривала.

У зв'язку з цим для вирішення завдань проектування технологій витягування порожнистих циліндрів з листових матеріалів доцільно застосувати зазначений вище, впроваджуваний останнім часом в практику моделювання процесів ОМТ, аналітично-чисельний метод, який передбачає отримання аналітичного рішення з досяжним ступенем обліку основних чинників, а потім здійснювання чисельної реалізації цього рішення для великої кількості малих переміщень деформуючого інструменту, тобто поетапно, і при необхідності окремо для різних елементів заготовки. При цьому облік таких факторів, як зміна товщини матеріалу і зміцнення його при витягуванні проводиться на кожному етапі з використанням відомих залежностей і при необхідності з підсумовуванням результатів по мірі наростання загальної деформації.

Така методика дозволяє без великих витрат часу отримувати рішення для напружено-деформованого стану в процесах витягування циліндрів з листових заготовок з визначенням для кожного етапу напружень на виході з матриці, зусиль деформування і можливості руйнування. Якщо на якомусь етапі можливе руйнування, то у вихідні дані вносяться змінені параметри, що полегшують процес витягування, і моделювання повторюється для нових умов формозміни до тих пір, поки не зникне можливість руйнування. Таким чином багаторазовим проектуванням здійснюється пошук найкращих умов формозміни при витягуванні заданої деталі.

У зв'язку з викладеним, в даній роботі в якості напрямку вдосконалення процесів комбінованого витягування обрано створення методики багатоваріантного комп'ютерного проектування операції витягування порожнистих циліндрів, в основу якої покладено математичні моделі для поетапного і поелементного моделювання напружено-деформованого стану металу, заготовки, що деформується, що враховують основні технологічні і експлуатаційні особливості штампованих деталей, а також вплив різних чинників, що визначають різноманіття можливих варіантів технології.

## 2.2 Вибір методів теоретичного дослідження

Як вказувалося в розділі 1, для теоретичного аналізу процесів обробки тиском використовується велика кількість методів [6, 15, 16]. Стосовно різних способів вісесиметричного витягування листового матеріалу найбільшого поширення набули інженерні методи, засновані на спільному вирішенні рівняння рівноваги і умови пластичності [14, 17, 18 та ін.], метод балансу робіт [14, 17], метод ліній ковзання [13, 15], енергетичний метод [19]. Застосовують також більш складні методи, засновані на чисельном інтегруванні диференціальних рівнянь рівноваги [20] і рівнянь математичних моделей, створених на базі енергетичного методу [21], а також на використанні методу скінченних елементів [10, 11 та ін.]. Однак висока трудомісткість і витрати машинного часу при реалізації рішення задач чисельними методами (МКЕ і ін.) не дозволяють використовувати моделі даного класу при багатоваріантному проектуванні, виборі оптимального варіанта технології, а також для оптимізаційних задач автоматизованого проектування.

Слід зазначити, що максимальну простоту і мінімальну трудомісткість чисельної реалізації мають інженерні математичні моделі. При цьому відомі недоліки їх можуть усуватися максимально можливим наближенням аналітичних описів граничних умов до реальних, що мають місце в осередку деформації конкретного процесу формозміни в цілому або окремих його елементів. Зазначене, зокрема, стосується обліку деформаційного зміцнення металу в процесах всіх видів витягування та обліку зміни товщини матеріалу фланця і змінного її значення на вході в осередок деформації потоншення при комбінованому витягуванні.

У роботах [11, 22, 23] показано, що вказане наближення аналітичних описів граничних умов до реальних може бути досягнуто для нестационарного процесу, яким є витягування листового матеріалу без потоншення стінки, якщо безперервну формозміну в цьому процесі поділити на ряд елементарних етапів, що наступують один за одним. Для кожного етапу окремо розраховують компоненти напружено-деформованого стану заготовки та необхідні параметри

технологічного процесу. При цьому в якості вихідних даних в поетапних обчисленнях використовуються результати розрахунку попереднього етапу.

Таким чином, на підставі викладеного вище, найбільш доцільним видається в теоретичному дослідженні для математичного моделювання формозміни заготовки при комбінованому витягуванні використовувати простий і мінімально трудомісткий метод спільного рішення рівнянь рівноваги і пластичності, і метод балансу робіт, які застосовують при аналізі розбиття всього процесу витягування на ряд елементарних етапів, що наступають один за одним, і обчислення для кожного етапу окремо компонентів напружено-деформованого стану та інших параметрів процесу.

### **2.3 Вибір методів експериментального дослідження**

Для оцінки достовірності результатів, одержуваних розрахунком при моделюванні процесів комбінованого витягування, був проведений комплекс експериментальних досліджень.

Експериментально визначали зусилля витягування та притиску, і параметри деформованого стану. Дослідження проводилися на спеціальній експериментальній установці для витягування без потоншення стінок, з потоншенням стінок і комбінованого витягування при виготовленні порожнистих деталей діаметром до 100 мм з листових заготовок. Загальний вигляд установки на базі гідравлічного преса зусиллям 630 кН представлений на рис. 2.1.

Установка монтується на гідравлічному пресі простої дії. Вона складається з експериментального штампа і насосної станції (рис. 2.2).

Штамп влаштований таким чином. Нижня плита 1 і гідравлічний блок 11 жорстко пов'язані між собою чотирма колонами 8, за якими на втулках 9 може переміщатися траверса штампа 10 вниз плунжерами 16 гідравлічного блоку, вгору - пружинами 7.

Гідравлічний блок представляє собою корпусну деталь з чотирма сполученими між собою порожнинами, в яких знаходяться плунжери.



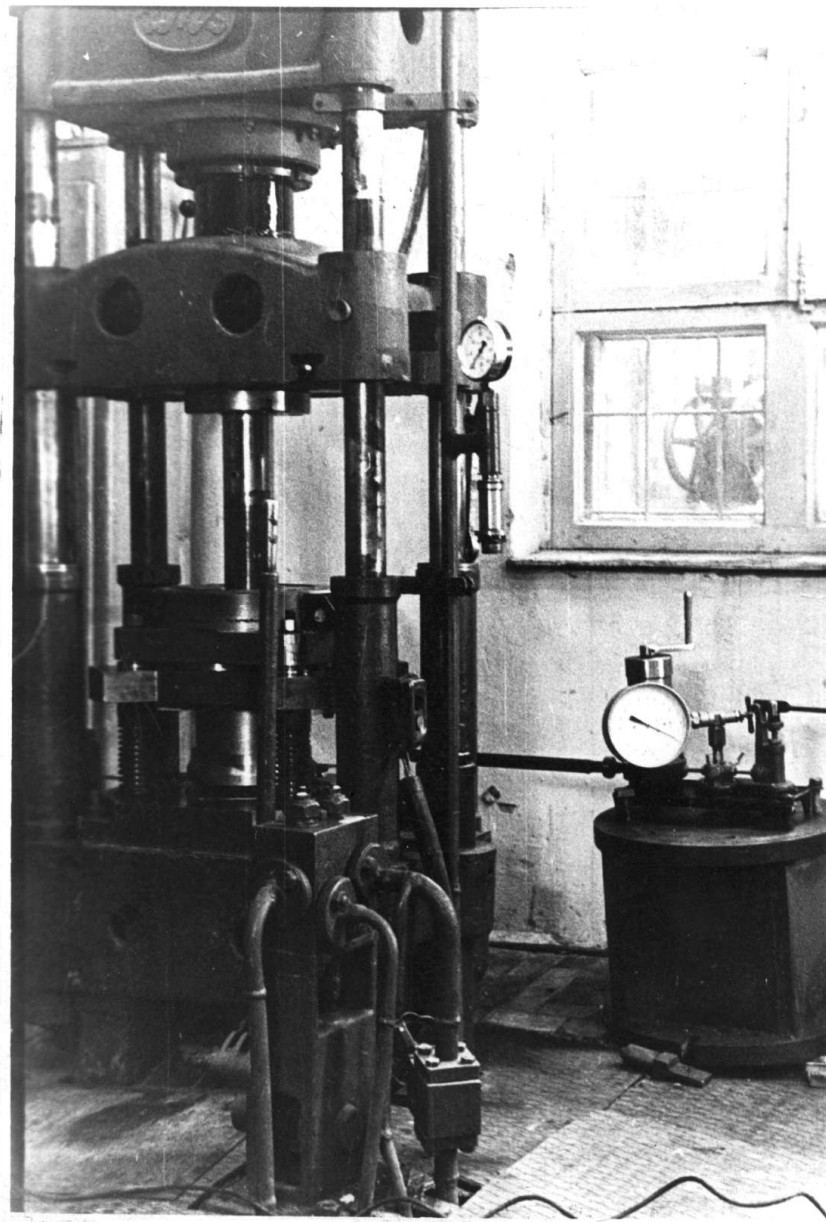


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд експериментальної установки на базі гідравлічного преса зусиллям 630 кН

Напрямок руху плунжерів забезпечується бронзовими втулками 15, а герметичність з'єднання плунжер - корпус досягається постановкою манжетних ущільнень 14. По центру гідравлічного блоку розточено отвір, через який проходить державка 12, яку направляють втулкою 17, що вставляється в траверсу штампа. Державка кріпиться до рухомої траверси преса за допомогою обойми 13, знизу в неї угвинчується змінний пуансон 5. Матриця 3 розміщується в нижній плиті і кріпиться до неї двома півкільцями 2. Притиск 6 своєю посадковою частиною заходить в розточення траверси і утримується в

такому положенні прихватами 18. Поєднання центру плоскої заготовки, що витягається, з центром штампа досягається за допомогою двох лінійок з ноніусом 25, розташованих на нижній плиті під кутом  $90^\circ$  один до одного. Штмп працює на провал і забезпечений знімачем 4.

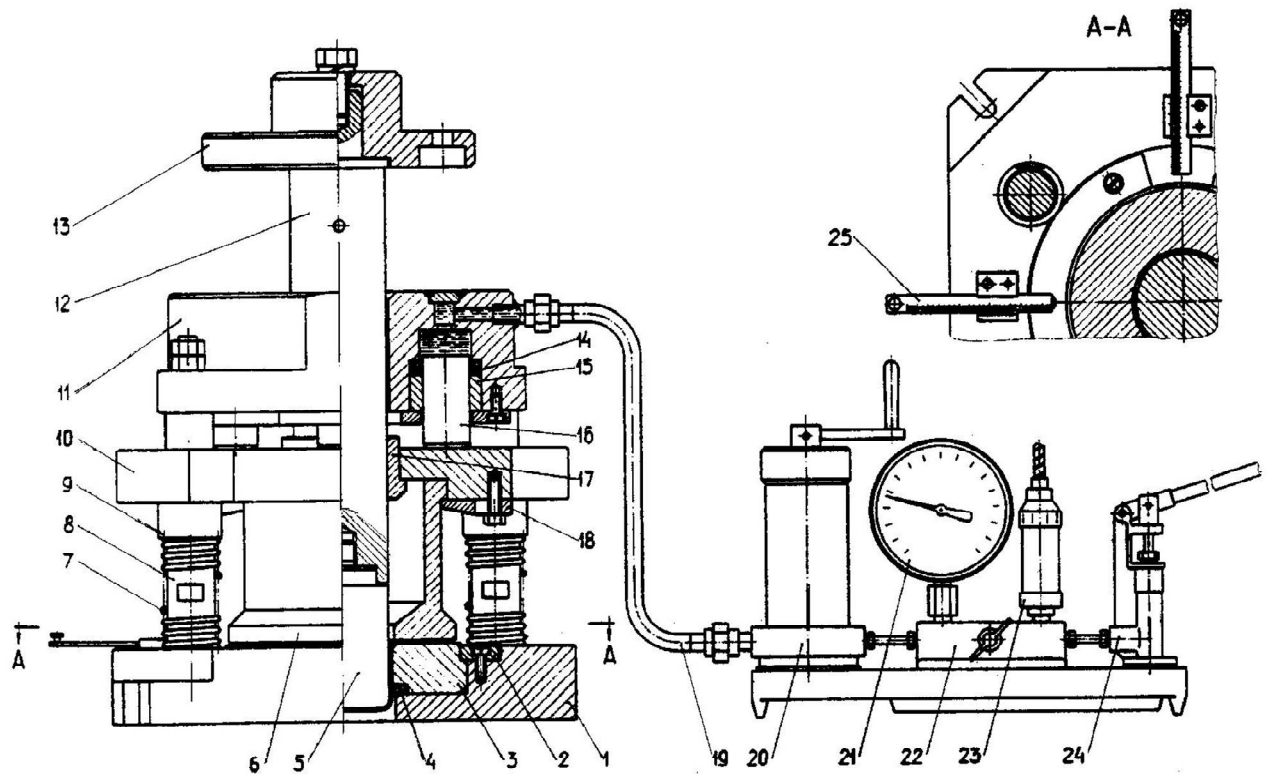


Рисунок 2.2 – Установка для дослідження процесів витягування

1 - нижня плита; 2 – півкільця; 3 – матриця; 4 – знімач; 5 - змінний пуансон; 6 - притиск; 7 – пружини; 8 – колони; 9 - втулки; 10 - траверса штампа; 11- гідравлічний блок; 12 – державка; 13 – обойма; 14 - манжетні ущільнення; 15 - бронзові втулки; 16 - плунжери гідравлічного блоку; 17 - направляюча втулка; 18 – прихвати; 19 – трубопровід; 20 - насос низького тиску; 21 – манометр; 22 - розподільна коробка; 23 - датчик тиску робочої рідини; 24 – насос високого тиску; 25 - лінійки з ноніусом.

Насосна станція пов'язана з гідравлічним блоком трубопроводом 19 на роз'ємних з'єднаннях і складається з насосами низького 20 і високого 24 тиску, розподільної коробки 22, манометра 21 і датчика тиску робочої рідини 23. Призначення насоса низького тиску - швидке переміщення траверси штампа і

прикріпленого до неї притиску. За допомогою насоса високого тиску забезпечується необхідне зусилля притиску заготовки.

Штамп описаної конструкції після заміни робочого інструменту може бути використаний для подальших операцій витягування без потоншення і комбінованого витягування, а також для витягування з потоншенням стінки.

При подачі робочої рідини в порожнину гідравлічної головки плунжери 15 переміщують траверсу вниз, пружини 7 при цьому стискаються, а необхідне зусилля від плунжерів 15 передається на притиск 6 штампа, який притискає її до площини матриці.

Хід траверси і закріпленого на ній притиску становить 25 мм. Плоска заготовка подається в зону притиску пінцетом; порожниста заготовка для подальшої операції витягування надається на притиск поза зоною штампа, а потім в такому положенні заводиться в корпус притиску, закріпленій на матриці; зусилля передається на притиск від траверси 10.

Для вимірювання зусиль витягування та притиску заготовки застосовані манометричні датчики тиску рідини. Датчик тиску являє собою тонкостінний циліндр, порожнина якого сполучається з порожниною робочого циліндра преса або з порожниною гідравлічної головки штампа. На бічну поверхню тонкостінного циліндра наклеюються тензодатчики, включені в мостову вимірювальну схему. Для запису зусилля витягування деталі і притиску заготовки застосовувався тензометричний підсилювач 87АН4-7М і шлейфовий осцилограф Н-700. Схема включення датчиків тиску і тензометричної апаратури наведена на рис. 2.3. Тарировки датчиків тиску проводили за допомогою гідро-поршневого манометра.

Експериментальне дослідження основних показників деформованого стану металу заготовок для етапів деформування витягуванням без потоншення виконували двома шляхами. З цією метою витягали циліндри з плоскої заготовки в штампі з зазором, рівним  $1,4S$ . Деформацію по товщині визначали вимірюванням товщини стінки циліндра вздовж його твірної за допомогою вимірювальної скоби з встановленим на ній індикатором годинникового типу, що має ціну поділки 0,01 мм. Крім безпосереднього вимірювання товщини

стілки визначали радіальну деформацію за допомогою координатної сітки [24]. З цією метою на плоску заготовку за допомогою трафаретного друку наносили координатну сітку у вигляді концентричних кіл з відстанями між ними 5 мм і меридіани під кутом  $90^0$ . Заготовка з нанесеною на її поверхню координатною сіткою і штампована деталь показані на рис. 2.4.

Обробка результатів експериментального дослідження полягала в наступному. У точках перетину меридіана з поперечною лінією вимірювали зміну відстані між лініями і товщину заготовки.

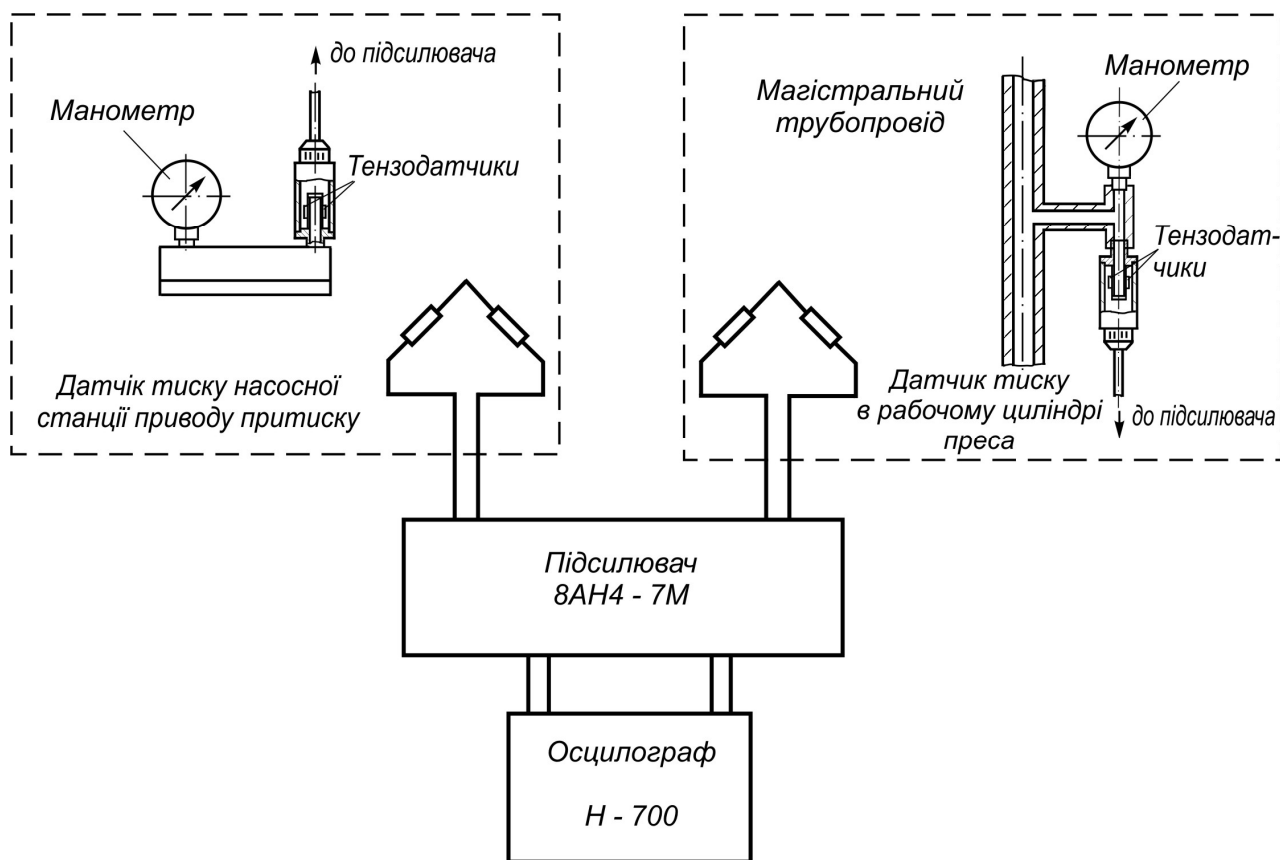


Рисунок 2.3 – Схема включення датчиків тиску і тензометричної апаратури

Кількісну оцінку деформованого стану металу здійснювали шляхом визначення наступних основних параметрів:

- радіальна деформація:

$$e_{\rho_j} = \ln \frac{\rho_j}{\rho_{0_j}}, \quad (2.1)$$

де  $\rho_{0_j}$  і  $\rho_j$  - початкова й результуюча відстані між лініями уздовж меридіана;

- деформація по товщині стінки:

$$e_{z_j} = \ln \frac{S_j}{S_{0j}}; \quad (2.2)$$

- тангенціальна деформація:

$$e_{\theta_j} = -e_{\rho_j} - e_{z_j}; \quad (2.3)$$

- інтенсивність деформації:

$$e_{ij} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{\rho_j} - e_{z_j})^2 + (e_{\rho_j} - e_{\theta_j})^2 + (e_{z_j} - e_{\theta_j})^2}. \quad (2.4)$$

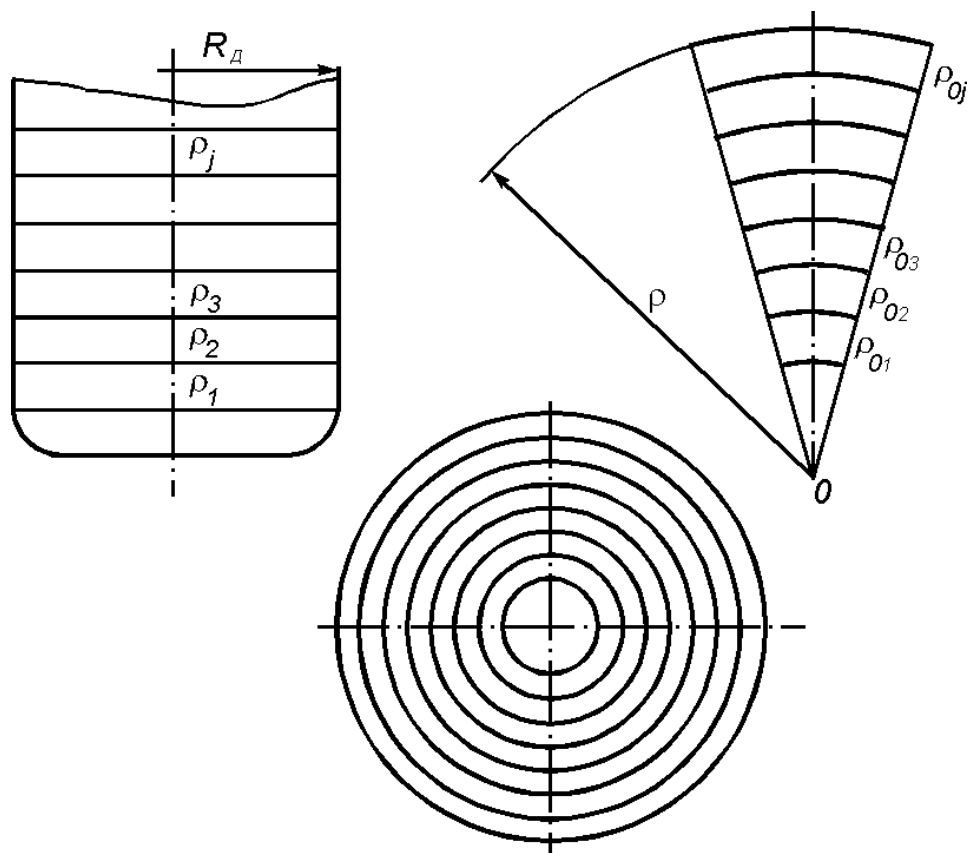


Рисунок 2.4 – Схема нанесення координатної сітки на заготовці (а) і деталь після витягування (б)

Визначення розподілу напруги плинності металу в стінці штампованої деталі виконували шляхом вимірювання твердості по Бринелю з подальшим переведенням з використанням існуючих залежностей [25]:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= 0,367HB - 240 \text{ при } HB > 1500 \text{ МПа} \\ \sigma_s &= 0,2HB \text{ при } HB < 1500 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (2.5)$$

## 2.4 Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Обробку отриманих в роботі експериментальних даних, а також оцінку достовірності результатів теоретичних рішень здійснювали на основі методів математичної статистики [26].

Адекватність розроблених математичних моделей перевіряли за допомогою точкових та інтервальних оцінок. При цьому відношення порівнюваних розрахункових і експериментальних значень зусиль штампування, напруги плинності, товщини стінки на вході в матрицю і деформацій у фланці розглядали як випадкові величини, які характеризуються нормальним законом розподілу.

В якості оцінки істинного значення досліджуваної величини брали середнє вибіркве значення  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad (2.6)$$

де  $n$  – кількість дослідів.

Для оцінки розподілу досліджуваної величини розраховували ряд статистичних показників:

- дисперсію -  $D_k = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n, \quad (2.7)$

- середньоквадратичне відхилення -  $\sigma_x = \sqrt{D_x}, \quad (2.8)$

- асиметрію -  $A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n \cdot \sigma^3}, \quad (2.9)$

- ексцес -  $E_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n \cdot \sigma^4} - 3. \quad (2.10)$

Гіпотеза про нормальний закон розподілу може бути прийнята в разі виконання співвідношень:

$$\left| A_s \right| < 1,5\sigma_A; \left| E_k + \frac{6}{n+1} \right| < 1,5\sigma_E, \quad (2.11)$$

де  $\sigma_A$  і  $\sigma_E$  - середньоквадратичне відхилення асиметрії і ексцесу.

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}; \sigma_E = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (2.12)$$

Довірчий інтервал досліджуваної випадкової величини визначали як:

$$\bar{x} - \Delta x < a < \bar{x} + \Delta x, \quad (2.13)$$

де  $\Delta x = t \frac{S}{\sqrt{n}}$  - абсолютна похибка;

$t$  – критерій Стюдента, який визначається за таблицями [26] в залежності від довірчої ймовірності  $P$  і числа дослідів  $n$ ;

$S$  – виправлене середньоквадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}. \quad (2.14)$$

Відносна похибка вимірювання:

$$\Delta = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (2.15)$$

Для оцінки якості апроксимації дослідних даних аналітичної залежністю обчислюється відносна похибка або варіація за формулою [27]:

$$v = \frac{100}{a_0} \sqrt{\frac{\sum (y_{oni} - y_{pi})^2}{N - K}}, \quad (2.16)$$

де  $a_0$  - вільний член в апроксимації;

$N$  - кількість дослідів;

$K$  - кількість коефіцієнтів в апроксимації;

$y_{oni}$  і  $y_{pi}$  - дослідні і розрахункові значення функції.

Апроксимація вважається прийнятною, якщо варіація не перевищує 6 – 8 %.

### **3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО - ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ (НДС) МЕТАЛУ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ВИТЯГУВАННІ**

При комбінованому витягуванні на етапі примусового потоншення деформується заготовка зі змінними товщиною стінки і механічними властивостями, які формувались в процесі згортання заготовки. Товщина стінки змінюється за складною залежністю, що являє собою на початку ходу немонотонне зменшення товщини, а потім її збільшення. Відповідно зміни товщини заготовки під потоншення змінні і властивості по висоті напівфабрикату. Змінність товщини і властивостей зумовлюють невизначеність положення небезпечного перетину, неоднозначність умов руйнування і обумовлюють нестационарність процесу.

У зв'язку з цим аналіз процесу і математичне моделювання необхідно вести, представляючи процес формозміни у вигляді послідовних етапів з заданим малим збільшенням ходу пуансона.

#### **3.1 Перший перехід комбінованого витягування**

Розглядаючи послідовність формозміни при комбінованому витягуванні з плоскої заготовки, можна виділити чотири стадії (див. рис. 3.1) [35].

Перша стадія характеризується деформацією кільцевої непритисненої частини заготовки і фланця шляхом просторового вигину з розтягуванням металу навколо крайок матриці і пуансона з поступовим збільшенням поверхонь контакту (рис. 3.1, а), при цьому частково втягується метал фланця.

Друга стадія - перехідна, в ній деформується фланець і відбувається втягування металу в зазор між пуансоном і матрицею і оформлення контуру вогнища деформації потоншення стінки (рис. 3.1, б).

Третя стадія являє собою усталений процес комбінованого витягування, що включає деформацію фланця і потоншення стінки втягнутої в матрицю частини заготовки (рис. 3.1, в).



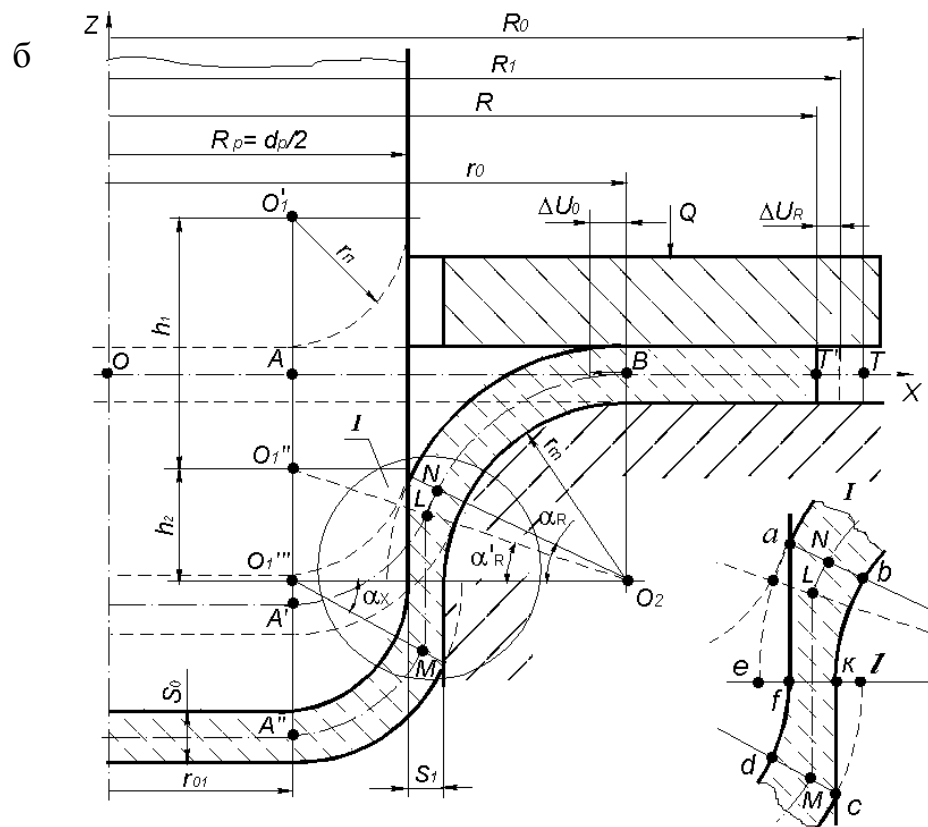
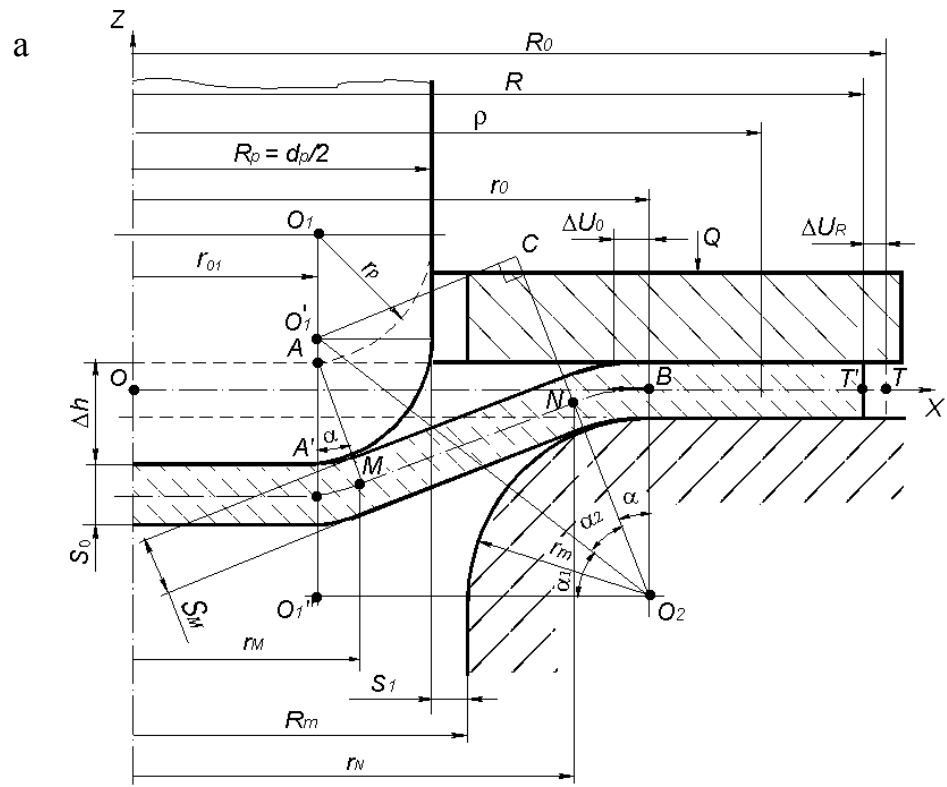


Рисунок 3.1 – Розрахункові схеми стадій комбінованого витягування: а - перша стадія; б - друга стадія; в - третя стадія; г - четверта стадія

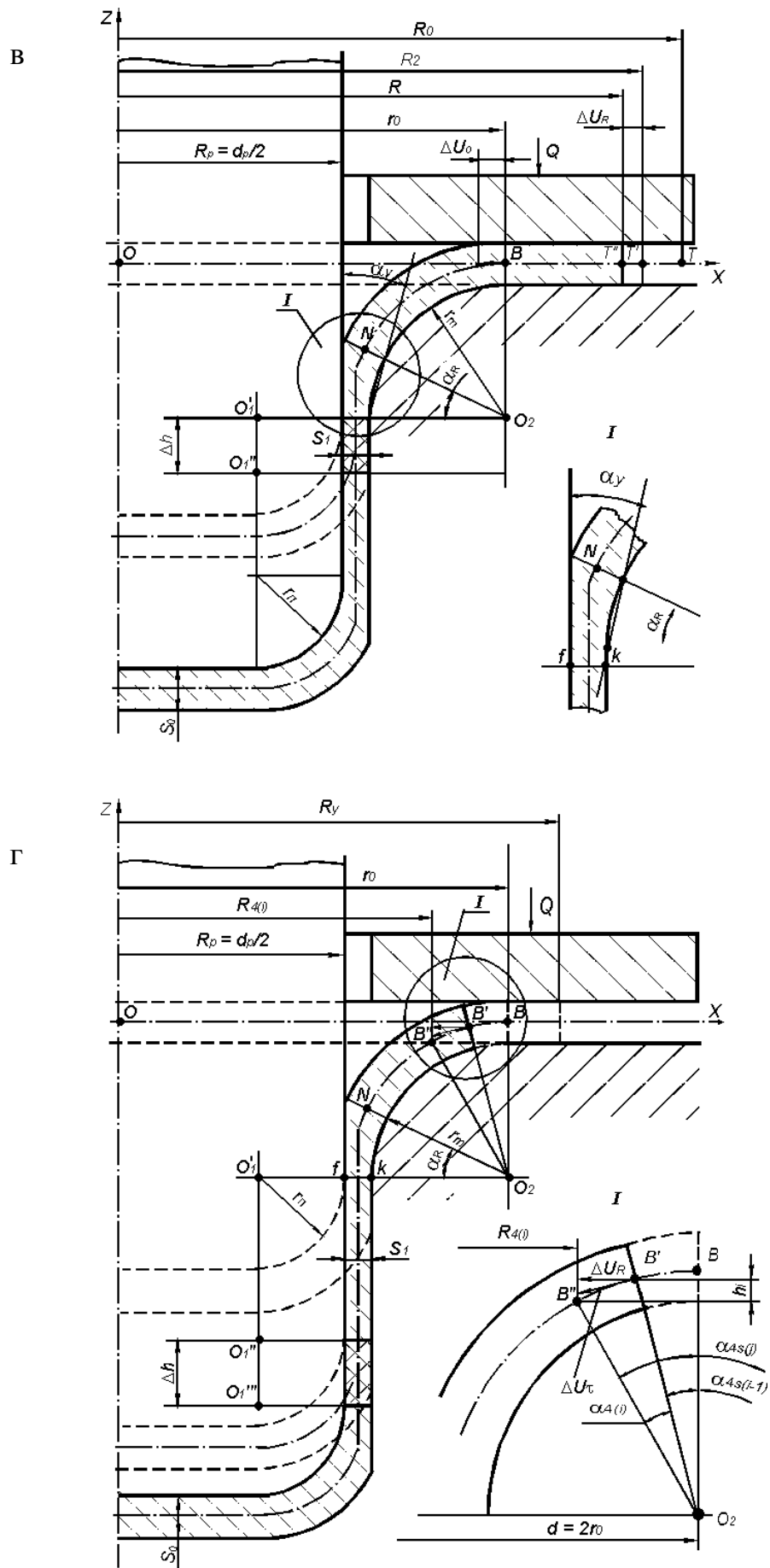


Рисунок 3.1. Аркуш 2

Четверта стадія - заключна; на ній плоский фланець відсутній, і крайова частина заготовки деформується без притиску, яка потім в зазорі між матрицею і пуансоном потоншується (рис. 3.1, г).

Процес формозміни заготовки на всіх стадіях будемо розглядати на основі зазначеного вище поетапного деформування.

Аналіз деформації зменшення діаметра (витягування без потоншення) проведемо, використовуючи методику, викладену в роботах [11, 22]. При цьому приймаємо звичайне припущення, що донна частина заготовки під плоским торцем пуансона протягом всього процесу деформування не змінює своїх розмірів. На першій стадії кільцева непритиснена частина заготовки, розташована в проміжку між закругленнями пуансона і матриці, в процесі витягування зазнає значних пластичних деформацій.

Розглянемо  $j$ -й етап деформування циліндричної деталі з круглої заготовки, коли приріст ходу пуансона дорівнює  $\Delta h$ , а  $j = 1$  (рис. 3.1, а).

Площа поверхні кільцевої непритисненої частини по середній лінії заготовки АВ до формозміни дорівнює

$$F_{AB} = \pi(r_0^2 - r_{0I}^2), \quad (3.1)$$

де  $r_0$  і  $r_{0I}$  - радіуси, що координують кордони округленої і плоскої поверхонь на матриці і на пуансоні.

Після переміщення пуансона на величину  $\Delta h$  поверхня цієї кільцевої частини заготовки А'В складається з трьох поверхонь, які описуються трьома плоскими кривими (дугою кола А'М на радіусному заокругленні пуансона, прямою MN і дугою кола NB на радіусному заокругленні матриці) при обертанні їх навколо вісі OZ, тобто

$$F_{A'B} = F_{A'M} + F_{MN} + F_{NB}. \quad (3.2)$$

Якби товщина заготовки в процесі деформування змінювалася, то збільшення поверхні частини заготовки А'MNB по ходу витягування відбувалося б тільки за рахунок перетікання матеріалу з фланця заготовки ВТ. Однак насправді поверхня кільцевої частини АВ значно збільшується за рахунок потоншення, і перетікання матеріалу з фланця зменшується. Елемент

заготовки А'М згинається на кромці пуансона з радіусом  $r_p$  в умовах дії значних розтягуючих напруг уздовж лінії MN, що призводить, згідно роботі [17], до істотної зміни радіуса нейтральної поверхні  $\rho_n$  в порівнянні з радіусом серединної поверхні:

$$\rho_{cp} = r_p + \frac{S_0}{2},$$

де  $S_0$  - вихідна товщина заготовки.

Згідно з даними роботи [17] в результаті вигину товщина заготовки  $S_0$  зменшується до величини

$$S_M = S_0 \frac{\rho_n}{\rho_{cp}}. \quad (3.3)$$

Тут  $\rho_n$  - радіус нейтральної поверхні, що розраховується за формулою, наведеною в роботі [17].

$$\rho_n = \sqrt{\frac{(r_p + S_0)r_p}{\left(\frac{R}{R_p}\right)^{\frac{S_0}{r_p}}}}, \quad (3.4)$$

де  $R$  - радіус фланця заготовки в момент, коли розглянутий елемент переходить на округлену кромку пуансона;

$R_p$  - радіус пуансона.

Беручи товщину  $S_M$  поверхні заготовки А'М з центральним кутом  $\alpha$  постійною в усіх точках, можна за умови сталості об'єму матеріалу  $F_{A'M}^0 \cdot S_0 = F_{A'M} \cdot S_M$  приблизно визначити величину збільшення поверхні заготовки А'М за рахунок зменшення товщини:

$$\Delta F_{A'M} = F_{A'M} - F_{A'M}^0 = F_{A'M} \left( 1 - \frac{S_M}{S_0} \right). \quad (3.5)$$

На це збільшення площі поверхні не буде втягнутий матеріал з фланця за період переміщення пуансона на величину  $\Delta h$ .

З приводу зміни поверхні заготовки NB зазначимо таке. У роботах [17, 29] показано, що вигин при вході заготовки на округлене кромку матриці дає невелике зменшення товщини є зв'язку з тим, що на кромці матриці має місце значна тангенціальна деформація стиснення, яка нашаровується на деформацію вигину і радіального подовження. Це призводить до того, що зміна кривизни елементів заготовки при переході їх з фланця на округлене кромку матриці відбувається при незначному зміщенні нейтральної поверхні від серединної. Істотна зміна товщини спостерігається при сходженні елементів з округлої кромки матриці, тобто під час випрямлення.

Однак при комбінованому витягуванні вказане випрямлення елементів заготовки відсутнє, так як початок осередку пластичної деформації примусового потоншення розташовується вище рівня верхньої кромки робочого циліндричного паска матриці (див. рис. 3.1, а).

У зв'язку з цим вважаємо, що потоншення на ділянці заготовки NB відсутнє.

Згідно [17] при зазвичай застосовуваних умовах витягування листових матеріалів, напруги, що розтягують і діють уздовж кінчної поверхні MN, не перевищують напруги плинності, тому поверхню цього елемента заготовки слід розраховувати без урахування потоншення.

Таким чином, якщо з площі  $F_{A'B}$  для  $j$ -го етапу витягування відняти площу  $F_{AB}$  для  $(j-1)$ -го етапу, і додатково відняти приріст площі  $\Delta F_{A'M}$ , отриманого за рахунок потоншення заготовки на ділянці A'M, то отримаємо площу поверхні, яка на  $j$ -му етапі деформування повинна бути втягнута з фланця заготовки BT.

$$\Delta F_1 = F_{A'B} - F_{AB} - \Delta F_{A'M}, \quad (3.6)$$

Кут охоплення заготовкою радіусних крайок пуансона і матриці знайдемо, розглянувши рівні прямокутні трикутники  $O_2CO_1'$  і  $O_2O_1''O_1'$ . В них кути  $O_2CO_1'$  і  $O_2O_1''O_1'$  - прями, а кути  $\alpha_1 = \alpha_2$  - ті, що зменшуються по ходу пуансона, тоді  $\alpha = \pi/2 - 2\alpha_1$ . Допускаючи  $S \cong S_1$ , знаходимо

$$\alpha = \pi/2 - 2 \operatorname{arctg} \frac{r_p + r_m + S \cdot \Delta h}{r_p + r_m + S}. \quad (3.7)$$

Складові виразу (3.6) є поверхнями обертання, площі яких знайдемо, скориставшись першою теоремою Гюльдена

$$\left. \begin{aligned} F_{A'M} &= 2\pi \left[ r_{0I} \cdot r_{pI} \cdot 2 - r_{pI} (1 - \cos \alpha) \right] \\ F_{MN} &= \pi (r_M^2 - r_N^2) / \cos \alpha \\ F_{NB} &= 2\pi \left[ r_0 r_{mI} \cdot \alpha - r_{mI}^2 (1 - \cos \alpha) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

де  $r_M$  і  $r_N$  - відстані від вісі OZ до точок M і N, що визначають початок і кінець кінчної ділянки MN (див. рис. 3.1, б).

Обчисливши за виразом (3.6) площу поверхні фланця  $\Delta F$ , яка на етапі витягування повинна бути втягнута в матрицю, можна визначити вектор збільшення переміщення  $\Delta U_0$  частини матеріалу на внутрішньому контурі фланця з радіусом  $r_0$ , який спрямований по дотичній до радіусу заокруглення матриці в точці В. Його величину знайдемо з рівняння:

$$\Delta F_i = \pi r_0^2 - \pi (r_0 - \Delta U_0)^2.$$

Звідки

$$\Delta U_0 = r_0 - \sqrt{r_0^2 - \frac{\Delta F_i}{\pi}}. \quad (3.9)$$

Друга стадія починається, коли мінімальна відстань між заокругленими поверхнями матриці і пуансона стане дорівнювати товщині заготовки перед потоншенням (рис. 3.1, б). У цей момент кут між горизонталлю і лінією, що з'єднає центри заокруглень пуансона і матриці, буде дорівнювати:

$$\alpha'_R = \arccos \frac{r_p + r_m + S_I}{r_p + r_m + S_N}. \quad (3.10)$$

Шлях пуансона до початку другої стадії визначимо з розгляду рис. 3.1, б, допускаючи  $S_N \approx S_0$ .

$$h_I = O'_I O''_I = (r_p + r_m + S_0) (1 - \sin \alpha'_R). \quad (3.11)$$

Закінчується друга стадія в момент збігу рівнів центрів заокруглень пуансона і матриці. Шлях пуансона від початку до кінця другої стадії буде:

$$h_2 = O_1''O_1''' = (r_p + r_m + S_L) \operatorname{tg} \alpha'_R. \quad (3.12)$$

в результаті деформації на другій стадії формується осередок деформації потоншення, контур якого в кінці другої стадії є криволінійним багатокутником  $abkcdf$  (див. рис. 3.1, б).

Площа поверхні заготовки, яка повинна бути втягнута в матрицю на другій стадії  $\Delta F_2$  знайдемо за умови рівності цього об'єму металу різниці об'ємів частин заготовки  $A''B$  і  $A'B$  в матриці відповідно в кінці і на початку другої стадії, тобто:

$$\Delta V_2 = V_{A''B} - V_{A'B}; \quad (3.13)$$

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta V_2}{S_B}. \quad (3.14)$$

Величини зазначених об'ємів обчислимо з використанням 2-ї теореми Гюльдена, згідно з якою об'єм тіла обертання дорівнює добутку площі напівперерізу на шлях його центра ваги при обертанні.

Об'єм металу заготовки, що знаходиться в матриці на початку 2-ї стадії  $V_{A'B}$  (без донної частини) складається з двох об'ємів тіл обертання частин кругових кілець  $V_{A'L}$  і  $V_{LB}$ , тобто

$$V_{A'B} = V_{A'L} + V_{LB}. \quad (3.15)$$

Виконавши обчислення значень доданків виразу (3.15) і перетворення, отримуємо

$$V_{A'B} = \pi \left\{ r_{O1} (\pi/2 - \alpha'_R) [(r_p + S_L)^2 - r_p^2] + \frac{2}{3} [(r_p + S_L)^3 - r_p^3] (1 - \sin \alpha'_R) + \right. \\ \left. + r_0 (\pi/2 - \alpha'_R) [(r_m + S_B)^2 - r_m^2] - \frac{2}{3} [(r_m + S_B)^3 - r_p^3] (1 - \sin \alpha'_R) \right\}. \quad (3.16)$$

Об'єм металу заготовки, що знаходиться в матриці в кінці другої стадії  $V_{A''B}$  включає три об'єми, в тому числі два з них - об'єми обертання частини кругових кілець  $A''M$  і  $NB$  і об'єм осередку деформації потоншення, що

представляє собою тіло обертання криволінійного багатокутника  $abkcdf$  (див. рис. 3.1, б), тобто

$$V_{A^*B} = V_{A^*M} + V_{NB} + V_{abkcdf}. \quad (3.17)$$

Об'єми  $V_{A^*M}$  і  $V_{NB}$  обчислюємо аналогічно розглянутому вище випадку для початку другої стадії. Тоді:

$$V_{A^*M} + V_{NB} = \pi \left\{ r_{0I} (\pi/2 - \alpha_x) \left[ (r_p + S_M)^2 - r_p^2 \right] + \frac{2}{3} \left[ (r_p + S_M)^3 - r_p^3 \right] (1 - \sin \alpha_x) + \right. \\ \left. + r_{0I} (\pi/2 - \alpha_R) \left[ (r_m + S_B)^2 - r_m^2 \right] - \frac{2}{3} \left[ (r_m + S_B)^3 - r_m^3 \right] (1 - \sin \alpha_R) \right\}, \quad (3.18)$$

де  $\alpha_x = \arccos \frac{r_p + S_I}{r_p + S_M}$  - кут між горизонталлю і лінією, що з'єднує центр заокруглення пуансона з точкою М, що лежить на нижній межі осередку деформації потоншення (див. рис. 3.1, б);

$$\alpha_R = \arccos \frac{r_m + S_I}{r_m + S_N} - \text{кут між горизонталлю і лінією, що з'єднує центр}$$

заокруглення матриці і верхню точку контакту заготовки з поверхнею пуансона в кінці другої стадії (див. рис. 3.1, б).

Для визначення об'єму металу осередку деформації потоншення  $V_{abkcdf}$  знайдемо площу його напівперерізу з використанням відомих формул геометрії:

$$F_{abkcdf} = \frac{\alpha_x}{2} \left[ (r_p + S_M)^2 - r_p^2 \right] - 0,5 \left[ (r_p + S_M)^2 \cdot \alpha_x - (r_p + S_M)(r_p + S_I) \cdot \sin \alpha_x \right] + \\ + \frac{\alpha_R}{2} \left[ (r_m + S_N)^2 - r_m^2 \right] - 0,5 \left[ (r_m + S_N)^2 \cdot \alpha_R - (r_m + S_N)(r_m + S_I) \cdot \sin \alpha_R \right]. \quad (3.19)$$

Положення центра ваги криволінійного багатокутника  $abkcdf$  визначимо як центр паралельних сил тяжіння відрізків, що становлять контур багатокутника, вважаючи, що сили тяжіння відрізків пропорційні їх довжині. Для обчислень помістимо багатокутник в координатну площину  $XOZ$ , як показано на рис. 3.1, б. Формули для обчислення відстані центрів тяжіння відрізків до вісі обертання  $OZ$  і їх довжини наведено в таблиці 3.1.



Відстань центра тяжіння криволінійного багатокутника до осі обертання буде:

$$X_{Cabkcdf} = \frac{\sum l_i \cdot x_{Ci}}{\sum l_i}.$$

Об'єм металу осередку деформації потоншення стінки відповідно до теореми Гюльдена буде:

$$V_{abkcdf} = 2\pi \cdot X_{CMN'} \cdot F_{abkcdf}. \quad (3.20)$$

Таблиця 3.1 – Параметри відрізків контуру криволінійного багатокутника

Відрізок, №	Розрахункові формули	
	Довжина, $l_i$	Відстань центра тяжіння до осі обертання, $X_{Ci}$
cd, 1	$S_M$	$R_p - r_p + (r_p + S_{N/2}) \cdot \cos \alpha_x$
df, 2	$r_p \cdot \alpha_x$	$R_p - r_p (1 - \sin \alpha_x / \alpha_x)$
fa, 3	$(r_m + S_B) \sin \alpha_R$	$R_p$
ab, 4	$S_N$	$R_p + S_{N/2} \cdot \cos \alpha_R$
bk, 5	$r_m \cdot \alpha_R$	$R_p + S_N + r_m (1 - \sin \alpha_R / \alpha_R)$
kc, 6	$(r_p + S_M) \cdot \sin \alpha$	$R_p + S_l$

Підставляючи в (3.17) значення суми об'ємів  $V_{A'M}$  і  $V_{NB}$  з (3.18), а також величину об'єму, обчисленого за (3.20), знаходимо об'єм  $V_{A'B}$  металу заготовки, що знаходиться в матриці в кінці другої стадії. Далі за (3.13) і (3.14) визначаємо кільцеву площу  $\Delta F_2$  поверхні фланця заготовки, яка втягується в матрицю на другій стадії комбінованого витягування.

Підставляючи у вираз (3.9) значення  $\Delta F_2$  з (3.14), знайдемо приріст переміщення  $\Delta U_0$  частинок матеріалу на внутрішньому контурі фланця за шлях пуансона, рівний  $h_2$  від початку до кінця другої стадії.

Третя стадія (див. рис. 3.1, в) являє собою усталений процес комбінованого витягування, при якому частина заготовки NB на кромці матриці переміщується практично не потоншуючись, а осередок деформації

потоншення на всій стадії залишається незмінним. У зв'язку з цим об'єм металу, що перетікає з фланця заготовки ВТ за шлях пуансона  $\Delta h$  дорівнює об'єму кільця висотою  $\Delta h$ , що втягується в зазор між пуансоном і матрицею шириною  $S_I$ , тобто:

$$\Delta F_3 \cdot S_B = 2\pi(R_p + 0,5S_I) \cdot \Delta h \cdot S_I. \quad (3.21)$$

Звідки площа поверхні, яка на  $j$ -му етапі третьої стадії повинна бути витягнута з фланця заготовки ВТ буде:

$$\Delta F_3 = \pi(R_p + 0,5S_I) \cdot \Delta h \cdot \frac{S_I}{S_B}. \quad (3.22)$$

Приріст переміщення  $\Delta U_0$  часток матеріалу на внутрішньому контурі фланця на етапах третьої стадії витягування обчислюється за формулою (3.9), підставляючи в неї  $\Delta F_3$  з (3.22).

На четвертій стадії плоский фланець відсутній і крайова частина заготовки деформується без притиску. Переміщаючись по закругленій поверхні матриці, так само, як на інших стадіях, частина заготовки, що деформується, практично не потоншується. У зазорі між пуансоном і матрицею відбувається потоншення стінки до заданої величини. Розрахункова схема четвертої стадії наведена на рис. 3.1, г.

Вважаємо, що на початку четвертої стадії товщина частини заготовки, що лежить на заокругленні, змінна. Мінімальне її значення - у межі осередку деформації потоншення і дорівнює товщині в точці В при  $R = R_y$ , де  $R_y$  - умовний радіус фланця, площа якого дорівнює площі крайової частини заготовки, що лежить на заокругленні матриці, на початку четвертої стадії (див. рис. 3.1, г). максимальну товщину має крайова частина заготовки на зовнішньому контурі, що дорівнює  $S_B$  при  $R = r_0$ .

Для  $j$ -го етапу четвертої стадії витягування, коли приріст ходу пуансона дорівнює  $\Delta h$ , визначимо величину приросту переміщення  $\Delta U_R$  часток матеріалу зовнішнього контуру крайової частини заготовки, спрямовану вздовж дотичної до кола радіусом  $(r_m + 0,5S_{B(m)})$  в точці В' (см. рис 3.1, г) за умовою

рівності об'єму матеріалу, втягнутого в зазор  $z = S_I$ , об'єму кільцевої частини заготовки В'В'', на який зменшується заготовка, яка переміщується вздовж радіусної кромки матриці.

Об'єм металу, втягнутий в зазор,  $z = S_I$  на шляху Пуансона  $\Delta h$  дорівнює:

$$V_{S_I} = 2\pi(R_p + S_I/2) \cdot S_I \cdot \Delta h. \quad (3.23)$$

Об'єм кільцевої частини біля краю заготовки, на який вона зменшиться переміщуючись вздовж радіусної кромки матриці на  $j$ -му етапі знайдемо, використовуючи теорему Гюльдена:

$$V_{B'B} = 2\pi \left\{ r_0 \frac{\alpha_{4j}}{2} \left[ (r_m + S_B)^2 - r_m^2 \right] - \frac{2}{3} \left[ (r_m + S_B)^3 - r_m^3 \right] \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{\alpha_{4j}}{2} \cdot \sin \alpha_{4j} \cdot \sin \left( \frac{\alpha_{4j}}{2} + \alpha_{4S(j-1)} \right) \right\}. \quad (3.24)$$

Прирівнюючи праві частини виразів (3.23) і (3.24), роблячи перетворення, отримуємо:

$$\alpha_{4(j)} = \frac{2 \left\{ (R_p + S_I/2) \cdot S_I \cdot \Delta h + \frac{2}{3} \left[ (r_m + S_B)^3 - r_m^3 \right] \cdot \sin \left( \alpha_{4j}/2 \right) \cdot \sin \left( \alpha_{4j}/2 + \alpha_{4S(j-1)} \right) \right\}}{r_0 \left[ (r_m + S_B)^2 - r_m^2 \right]}, \quad (3.25)$$

де  $\alpha_{4S(j-1)}$  - кут між вертикаллю і лінією, що з'єднує крайню точку заготовки з центром радіуса заокруглення матриці (див. рис. 3.1, г).

Це рівняння може бути вирішено щодо  $\alpha_{4(j)}$  методом ітерацій, починаючи обчислення для першого етапу четвертої стадії, коли  $j = 1$ , а перше наближення  $\alpha_{4(j)} = 0$  і відповідно початкове значення сумарного кута  $\alpha_{4S(j-1)} = 0$ .

Вирахувавши  $\alpha_{4(j)}$ , знаходимо горизонтальну складову збільшення переміщення  $\Delta U_R$  часток матеріалу на зовнішньому контурі крайової частини заготовки і відстань краю заготовки до осі  $R_{4(j)}$ , припускаючи при цьому, що величина переміщення  $\Delta U_\tau$  вздовж дуги В'В'', є дотичною до кола з радіусом

$(r_m + 0,5S_B)$  в точці В' дорівнює довжині дуги В'В''.

$$\Delta U_{R4(j)} = \alpha_{4(j)}(r_m + 0,5S_B) \cdot \cos \alpha_{4s(j-1)}. \quad (3.26)$$

Тоді радіус зовнішнього контуру крайової частини буде:

$$R_{4(j)} = R_{4(j-1)} - \Delta U_{R4(j)}. \quad (3.27)$$

Знаючи радіуси крайової частини заготовки до та після деформації при переміщенні її вздовж заокруглення матриці на шляху пуансона  $\Delta h$ , можна обчислити значення тангенціальної деформації стиснення за відомою формулою [15] і збільшення товщини крайової частини заготовки на етапах деформування при переміщенні її вздовж радіусної кромки матриці до осередка деформації потоншення.

Приріст тангенціальної деформації за етап переміщення пуансона:

$$d\varepsilon_{\theta_j} = \ln \frac{R_{4(j-1)}}{R_{4(j)}}.$$

Накопичена деформація від початку четвертої стадії:

$$\varepsilon_{\theta_j} = \sum_m^j d\varepsilon_{\theta_j}, \quad (3.28)$$

де  $m$  – номер етапу витягування, що відповідає початку четвертої стадії.

Збільшення товщини на етапі витягування

$$dS_j = S_{By(j)} \sqrt{\frac{R_{4(j-1)}}{R_{4j}}},$$

де  $S_{By(j)}$  - товщина заготовки в точці В на  $j$ -му етапі деформування при витягуванні в отвір матриці умовної кільцевої частини заготовки з початковою шириною, що дорівнює  $(R_y - r_0)$ .

Тоді товщина заготовки на вході в осередок деформації потоншення буде дорівнювати

$$S_{4j} = S_{By(j)} + \sum^j dS_j. \quad (3.29)$$

Обчисливши за формулою (3.9) значення збільшень переміщень  $\Delta U_0$  часток матеріалу на внутрішній кромці плоского фланця заготовки на першій,

другій і третій стадіях, переходимо до вирішення завдання з розрахунку збільшень і повних значень переміщень, деформацій і напружень у фланці заготовки на етапах витягування. З цією метою для перших трьох стадій комбінованого витягування, коли пластична деформація охоплює весь фланець заготовки, скористаємося аналітичним рішенням, отриманим в роботі [18]. Воно відноситься до розрахункової моделі вісесиметричної деформації в умовах плоского напруженого стану ізотропного зміцнюваного тіла, і отримано за допомогою спільного рішення рівняння рівноваги та енергетичної умови пластичності Мізеса, яке в полярній системі координат  $\rho\theta$  має вигляд [15]:

$$\sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\theta}^2 - \sigma_{\rho}\sigma_{\theta} = \sigma_s^2, \quad (3.30)$$

де  $\sigma_{\rho}$  і  $\sigma_{\theta}$  - радіальна і тангенціальна напружка;

$\sigma_s$  - напружка плинності матеріалу заготовки.

Рівняння (4.30) задовольняється при використанні залежностей, отриманих В.В.Соколовським [30], які за умови  $\sigma_{\rho} > \sigma_{\theta}$  мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho} &= 2k \cos(\omega - \pi/6) \\ \sigma_{\theta} &= 2k \cos(\omega + \pi/6) \end{aligned} \quad (3.31)$$

де  $k$  – постійна пластичності,  $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ ;

$\omega = \omega(\rho)$  - невідома функція, що характеризує положення точки на еліпсі пластичності.

Диференціальне рівняння рівноваги для вісесиметричної деформації в умовах плоского напруженого стану має вигляд [15]

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}}{\rho} = 0. \quad (3.32)$$

Підставляючи компоненти напружки з (1.31) в рівняння рівноваги (1.32), отримаємо:

$$\sin\left(\omega - \frac{\pi}{6}\right) \frac{d\omega}{d\rho} + \frac{\sin \omega}{\rho} = 0. \quad (3.33)$$

Інтегруючи це рівняння, знаходимо:

$$\rho^2 = \frac{C}{\sin \omega} \exp(\sqrt{3} \cdot \omega).$$

Після підстановки в (3.32) компонентів напруг з (3.31), інтегрування отриманого рівняння з визначенням постійної за умови, що на зовнішній кромці фланця заготовки при  $\rho = R$ ,  $\sigma_\rho = 0$ ,  $\omega = 2/3 \pi$ , отримаємо вираз:

$$\rho^2 = \frac{\sqrt{3}R^2}{2 \sin \omega} \exp\left(\frac{3\omega - 2\pi}{\sqrt{3}}\right),$$

який після логарифмування набуває вигляду:

$$\omega = \frac{1}{3} \left( 2\pi + \sqrt{3} \ln \frac{2\rho^2 \sin \omega}{\sqrt{3}R^2} \right) = f(\omega). \quad (3.34)$$

Це рівняння можна вирішити відносно  $\omega$  методом ітерацій, отримуючи значення кореня з будь-якою точністю.

Для визначення деформацій у фланці заготовки на перших трьох стадіях витягування скористаємося рівнянням зв'язку напруг і приросту деформацій (швидкостей деформації) [34]:

$$\frac{d\varepsilon_\rho}{d\varepsilon_\theta} = \frac{2\sigma_\rho - \sigma_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_\rho}. \quad (3.35)$$

Приріст радіальної  $d\varepsilon_\rho$  і тангенціальної  $d\varepsilon_\theta$  деформацій виражаються через збільшення радіального переміщення  $\Delta U$  часток фланця заготовки наступним чином:

$$d\varepsilon_\rho = \frac{d(\Delta U)}{d\rho}; \quad d\varepsilon_\theta = \frac{\Delta U}{\rho}. \quad (3.36)$$

Підставивши в (3.35) компоненти напружень з (3.31) і збільшення деформацій з (1.36), маємо:

$$\sin\left(\omega - \frac{\pi}{6}\right) \frac{d(\Delta U)}{d\rho} + \sin\left(\omega + \frac{\pi}{6}\right) \frac{\Delta U}{\rho} = 0.$$

Інтегрування цього диференційного рівняння з використанням граничної умови  $\Delta U = \Delta U_0$ ,  $\omega = \omega_0$  при  $\rho = r_0$ , де  $r_0$  - радіус внутрішньої кромки

плоского фланця заготовки, дає вираз для приросту переміщення в будь-якій точці фланця:

$$\Delta U_{R_{ji}} = \Delta U_0 \sqrt{\frac{\sin \omega_0}{\sin \omega} \exp[-\sqrt{3}(\omega - \omega_0)]}, \quad (3.37)$$

де  $i$  – порядковий номер кільцевого контуру фланця.

Визначивши по формулі (3.37) приріст переміщення часток заготовки на будь-якому кільцевому контурі фланця  $\Delta U_{R_{ji}}$  після кожного  $j$ -го етапу витягування, знаходимо новий радіус  $i$ -того контуру фланця:

$$R_{ji} = R_{(j-1)i} - \Delta U_{R_{ji}}. \quad (3.38)$$

Підставляючи в (3.36) значення  $\Delta U$  з (3.37), знаходимо вирази для збільшення радіальної  $d\varepsilon_\rho$  і тангенціальної  $d\varepsilon_\theta$  деформацій:

$$d\varepsilon_\rho = \frac{\Delta U_0 \sin\left(\omega + \frac{\pi}{6}\right)}{R \sin\left(\omega - \frac{\pi}{6}\right)} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \omega_0 \exp\left[\sqrt{3}(\omega_0 - 2\omega) + \frac{2}{\sqrt{3}}\pi\right]}; \quad (3.39)$$

$$d\varepsilon_\theta = -\frac{\Delta U_0}{R} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \omega_0 \exp\left[\sqrt{3}(\omega_0 - 2\omega) + \frac{2}{\sqrt{3}}\pi\right]}. \quad (3.40)$$

Величину приросту деформації  $d\varepsilon_z$ , пов'язану зі зміною товщини заготовки, визначаємо за умови нестискаємості  $d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0$ :

$$d\varepsilon_z = -\frac{\Delta U_0 \cos \omega}{R \sin\left(\omega - \frac{\pi}{6}\right)} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \omega_0 \exp\left[\sqrt{3}(\omega_0 - 2\omega) + \frac{2}{\sqrt{3}}\pi\right]}. \quad (3.41)$$

Приріст інтенсивності деформації буде:

$$d\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_\theta)^2 + (d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta)^2}. \quad (1.42)$$

Таким чином, задаючи різні значення радіуса  $\rho$ , можливо для  $j$ -го етапу витягування за рівнянням (3.34) розрахувати величини  $\omega_0$  для  $\rho = r_0$  і  $\omega$  для будь-якого радіусу  $\rho$ , а потім визначити збільшення переміщень згідно (3.37), деформацій згідно (3.39), (3.40), (3.41), (3.42), а також обчислити напруги у

фланці згідно (3.31), в тому числі радіальна розтяжна напруга на внутрішньому контурі фланця заготовки радіусу  $r_0$  в точці В -  $\sigma_{\rho B}$ .

Обчислення деформацій на етапах витягування та накопичених деформацій в точках фланця виконуються для окремих кругових перетинів, що є межами елементарних кілець, на які розбивається фланець заготовки.

Для кожного кільцевого перерізу після  $j$ -того етапу витягування визначаються переміщення, новий радіус його, а потім збільшення деформації за вказаними вище формулами і накопичену деформацію за виразом:

$$\varepsilon_{ji} = \sum_j d\varepsilon_{ji}. \quad (3.43)$$

Товщини заготовки в різних точках фланця обчислюються за величиною накопиченої деформації  $\varepsilon_{zji}$  для кожного кругового перетину, в тому числі і на внутрішньому і зовнішньому контурах фланця, на етапах витягування за виразом:

$$S_{ji} = S_0 \exp \varepsilon_{zji}. \quad (3.44)$$

В якості деформації, що визначає напругу плинності металу фланця  $\sigma_{S_{ji}}$ , приймається деформація тангенціального стискання  $\varepsilon_{\theta ji}$ . Напруга плинності обчислюється за кривою зміцнення [31]:

$$\sigma_{S_{ji}} = \sigma_{0,2} + A \cdot e_{ji}^n, \quad (3.45)$$

де  $e_{ji}$  - відносна деформація, виражена у відсотках, величину якої знаходимо за виразом:

$$e_{ji} = (\exp \varepsilon_{\theta ji} - 1) \cdot 100.$$

Величину напруги  $\sigma_{\rho N}$ , діючої на нижній межі ділянки, яка має контакт зі скругленою кромкою матриці (точка N), визначимо за даними роботи [17] з урахуванням вигину на округлених кромках матриці і пуансона, сил тертя, прикладених до нижньої і верхньої площин фланця, сили тертя на скругленій кромці матриці для першої стадії, коли глибина витяжки  $h < h_1$ , згідно виразу:



$$\sigma_{\rho N}^I = \left[ \sigma_{\rho B} + \sigma_{TP} + \frac{\sigma_{s_B} S_B}{4r_m + 2S_B} + \frac{\sigma_{s_M} S_M}{4r_p + 2S_M} \right] \exp(\mu\alpha). \quad (3.46)$$

де  $\sigma_{s_B}, \sigma_{s_M}$  - напруги плинності матеріалу відповідно в перетинах, що проходять через точки  $B$  і  $M$  заготовки; для точки  $M$  ступінь деформації обчислюється за виразом:

$$e = \frac{S_0 - S_M}{S_0} \cdot 100; \quad (3.47)$$

$\sigma_{TP}$  - радіальні розтягуючі напруги, що викликаються силами тертя, прикладеними до верхньої і нижньої площин фланця.

Величину цих усереднених по товщині напруг визначимо за даними роботи [17]:

$$\sigma_{TP} = 0,2\mu \left( \frac{R}{r_0} \right)^2 \left( \frac{R - r_0 - 9S}{R} \right) \sigma_{s_B}, \quad (3.48)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя на поверхні фланця;

$R$  - радіус на зовнішній кромці фланця.

З формули (3.48) видно, що при  $R - r_0 = 9S$  напруга тертя  $\sigma_{TP}$  і відповідно зусилля притиску стають рівними нулю. Це відповідає умовам витягування, при яких утворення складок відсутнє і притиск не потрібен. Тобто умовою застосування притиску є

$$R - r_0 \leq 9S.$$

У виразі (3.46) третє і четверте доданки представляють складові радіальної розтягуючої напруги від вигину на округлених кромках матриці і пуансона. співмножником  $\exp(\mu\alpha)$  враховується тертя на округленій кромці матриці.

На другій і третій стадіях витягування елементи заготовки на округленій кромці пуансона більше не згинаються і тому формула (3.46) приймає вигляд:

$$\sigma_{\rho N}^{2,3} = \left[ \sigma_{\rho B} + \sigma_{TP} + \frac{\sigma_{s_B} S_B}{4r_m + 2S_B} \right] \exp[\mu(\pi/2 - \alpha_R)]. \quad (3.49)$$

На четвертій стадії витягуванням без потоншення деформується крайова частина заготовки, що знаходиться на заокругленні матриці. Витягування її здійснюється без притиску, а розтягуюча напруга на верхній межі осередку деформації потоншення плавно, за майже лінійною залежністю, зменшуються від величини  $\sigma_{\rho N(\rho=r_0)}^3$  в кінці третьої стадії, до нуля в момент закінчення витягування [11, 17]. У зв'язку з цим, не допускаючи великої похибки, можна прийняти лінійну залежність зниження напруги  $\sigma_{\rho N}^4$  від величини  $\sigma_{\rho N(\rho=r_0)}^3$  до нуля у вигляді:

$$\sigma_{\rho N}^4 = \sigma_{\rho N(\rho=r_0)}^3 \left( 1 - \frac{h_4(z)}{r_m} \right),$$

де  $h_4(z)$  - величина ходу пуансона на четвертій стадії.

Для аналізу можливості руйнування в процесі комбінованого витягування визначимо максимальні напруги в небезпечних перетинах на стадіях деформування.

На першій стадії, коли глибина витягування  $h < h_1$ , небезпечним є перетин, що проходить через точку  $M$  (див. рис. 3.1, а) на кордоні контакту заготовки з пуансоном. Це перетин з радіусом  $r_M$  має мінімальну товщину  $S_M$ .

З умови рівності зусилля витягування  $P$ , прикладеного в небезпечному перерізі:

$$P = \sigma_{\rho max} \cdot 2\pi r_M \cdot S_M \cdot \sin \alpha \quad (3.50)$$

і в перерізі, що проходить через точку  $N$  з радіусом  $r_N$  і товщиною  $S_N = S_B$ :

$$P = \sigma_{\rho N} \cdot 2\pi r_N \cdot S_B \cdot \sin \alpha,$$

впливає:

$$\sigma_{\rho max} = \sigma_{\rho N} \cdot \frac{r_N}{r_M} \cdot \frac{S_B}{S_M}. \quad (3.51)$$

Підставляючи в (3.51) значення  $\sigma_{\rho N}$  з (1.46) отримуємо остаточні вирази для обчислення максимальної розтягуючої напруги  $\sigma_{\rho max}$  в небезпечному

перерізі, що проходить через точку  $M$  для першої стадії комбінованого витягування:

$$\sigma_{\rho max}^I = \left[ \sigma_{\rho B} + \sigma_{TP} + \frac{\sigma_{sN} S_B}{4r_m + 2S_B} + \frac{\sigma_{sM} S_M}{4r_p + 2S_M} \right] \times \exp(\mu\alpha) \cdot \frac{r_N}{r_M} \cdot \frac{S_B}{S_M}. \quad (3.52)$$

Для інших трьох стадій небезпечним є перетин на виході металу з матриці після його примусового потоншення.

Розтягуючу напругу на виході з матриці визначимо за формулою:

$$\sigma_{\rho}^i = 1,15E \left( \frac{S_N}{S_I} \right)^m \frac{b+1}{b+m} \left[ 1 - \left( \frac{S_I}{S_N} \right)^{b+m} \right] + 0,577E \left[ 1 + \left( \frac{S_N}{S_I} \right)^m \right] \operatorname{tg} \frac{\alpha_y}{2} + \sigma_{\rho N}^i \left( \frac{S_I}{S_N} \right)^b, \quad (3.53)$$

де  $i$  – номер стадії витягування,

$\alpha_y$  - кут нахилу твірної умовної конічної поверхні, що замінює тороїдальну контактну поверхню матриці.

Зусилля витягування для першої стадії обчислюється за виразом (1.50). Для інших трьох стадій формулу для зусиль комбінованого витягування буде мати вигляд:

$$P^i = \pi d_{\rho} S_I \left\{ 1,15E \left( \frac{S_N}{S_I} \right)^m \frac{b+c+1}{b+m} \left[ 1 - \left( \frac{S_I}{S_N} \right)^{b+m} \right] + 0,577E \left[ 1 + \left( \frac{S_N}{S_I} \right)^m \right] \operatorname{tg} \frac{\alpha_y}{2} + \frac{\sigma_{\rho N}^i}{b+1} \left[ (b+1+c) \left( \frac{S_I}{S_N} \right)^b - c \frac{S_N}{S_I} \right] \right\}. \quad (3.54)$$

Аналогічно моделюванню витягування з потоншенням стінки умову комбінованого витягування заготовки без руйнування формулюємо так: розтягуюча напруга в небезпечному перерізі (перетин, що проходить через точку  $M$  для першої стадії і перетин на виході з матриці для інших стадій) на всіх етапах витягування не повинна перевищувати максимальну напругу  $\sigma_{lim} = \sigma_S / c$  для цього місця, тобто показник завантаження операцій на етапах витягування повинен бути  $K_Z = \sigma_{\rho}^i / \left( \sigma_{S_i} / c \right) < 1$ . Якщо на якомусь етапі

витягування  $K_Z > 1$ , то витягування заготовки можливе тільки до цього етапу, а далі починається руйнування заготовки. В цьому випадку у вихідні дані вносяться змінені параметри виконання операції, що полегшують процес витягування: щодо геометрії деталі - збільшується  $r_p$ ; за параметрами технологічного процесу - змінюється в певних межах (щоб не було утворення складок) сила притиску, змінюються коефіцієнти тертя за рахунок зміни складу мастильного матеріалу і способу його нанесення: на поверхні матриці і притиску  $\mu_m$  зменшують, а на поверхні пуансона - збільшують; щодо геометрії вихідної заготовки - зменшується товщина її; за параметрами штампа - збільшується  $r_m$ . Якщо можливо виконати умову міцності конструкції деталі, то вибирається нова марка металу з меншими величинами  $\sigma_T$  і  $\sigma_B$  і більшою величиною  $n$ . Математичне моделювання виконується до тих пір, поки показник завантаження операції не стане менше одиниці.

Якщо ж і після зміни умов деформування витягування заданої деталі з плоскої заготовки за одну операцію неможлива, то необхідно проектувати багатоопераційний технологічний процес.

### **3.2 Наступні переходи комбінованого витягування**

При виготовленні глибоких порожнистих виробів потрібно кілька операцій як зменшення діаметра, так і потоншення стінки. У цих випадках застосовуються наступні переходи комбінованого витягування, тобто витягування з просторової заготовки у вигляді порожнього циліндра, отриманого комбінованим витягуванням або іншими способами.

Нижче наводиться методика моделювання процесу комбінованого витягування на наступних переходах з порожнистої заготовки з потоншеними стінками, отриманої комбінованим витягуванням, витягуванням з потоншенням стінки, видавлюванням або розкочуванням.

Характерною особливістю процесу формозміни на наступних переходах комбінованого витягування є обмеження деформації потоншення стінки

наявністю так званого «донного бар'єру», з подоланням якого пов'язано максимальне зусилля на початку операції. Прояв «донного бар'єру» на другому переході полягає в тому, що на початку витягування у витяжний зазор втягується кільцева ділянка дна напівфабрикату товщиною, рівною або майже рівною товщині вихідного листового матеріалу. Тому потоншення при деформації цієї ділянки більше, ніж було виконано на попередньому переході з граничним ступенем деформації, неможливе. Вплив зазначеного «донного бар'єру» в якості лімітує фактора посилюється на третьому переході в зв'язку зі збільшенням різниці в товщині стінки і дна напівфабрикату.

Зменшення ступеня потоншення або зниження деформації по діаметру, що застосовуються іноді на практиці для вирішення питання подолання «донного бар'єру» при комбінованому витягуванні, призводить до збільшення числа переходів.

Досліджуючи комбіноване витягування, С.О. Валієв показав [2], що найбільш ефективним способом здійснення подальших переходів комбінованого витягування є виконання їх в штампі з зазором, рівним або більшим зазору на попередньому переході. В такому випадку в початковий період подальшого переходу відбувається комбінований процес зменшення діаметра і потоншення донної ділянки напівфабрикату до товщини, більшої або рівної товщині стінки його циліндричної частини. Після деформації донної ділянки напівфабрикату відбувається зменшення діаметра циліндричної частини до заданого матрицею діаметра. Доцільно перед наступним переходом відпалювати заготовку і тоді зазор в штампі можна приймати рівним його величині на попередньому переході, що дозволить отримувати напівфабрикат з однаковою товщиною стінки по всій довжині циліндричної частини. При цьому в процесі деформації її буде відбуватися калібрування стінки в зв'язку з невеликим потовщенням, що відбувається при витягуванні без потоншення.

Нижче наводиться опис математичного моделювання наступних переходів комбінованого витягування з виконанням їх за описаним способом.

Розглянемо процес деформування просторового напівфабрикату на наступних переходах комбінованого витягування вісесиметричних деталей в

штампи з радіальною матрицею (рис. 3.2). Напівфабрикат отриманий комбінованим витягуванням з листової заготовки і підданий відпалу. Матриця має робочу поверхню у вигляді площини з радіусним заокругленням кромки і утворює з пуансоном зазор, рівний товщині стінки напівфабрикату. У цій матриці в початковій фазі процесу відбувається комбіноване витягування плоскої кільцевої ділянки дна заготовки, а потім здійснюється зменшення діаметра циліндричної частини напівфабрикату і калібрування стінки в зазорі між пуансоном і матрицею до товщини, рівної витяжному зазору.

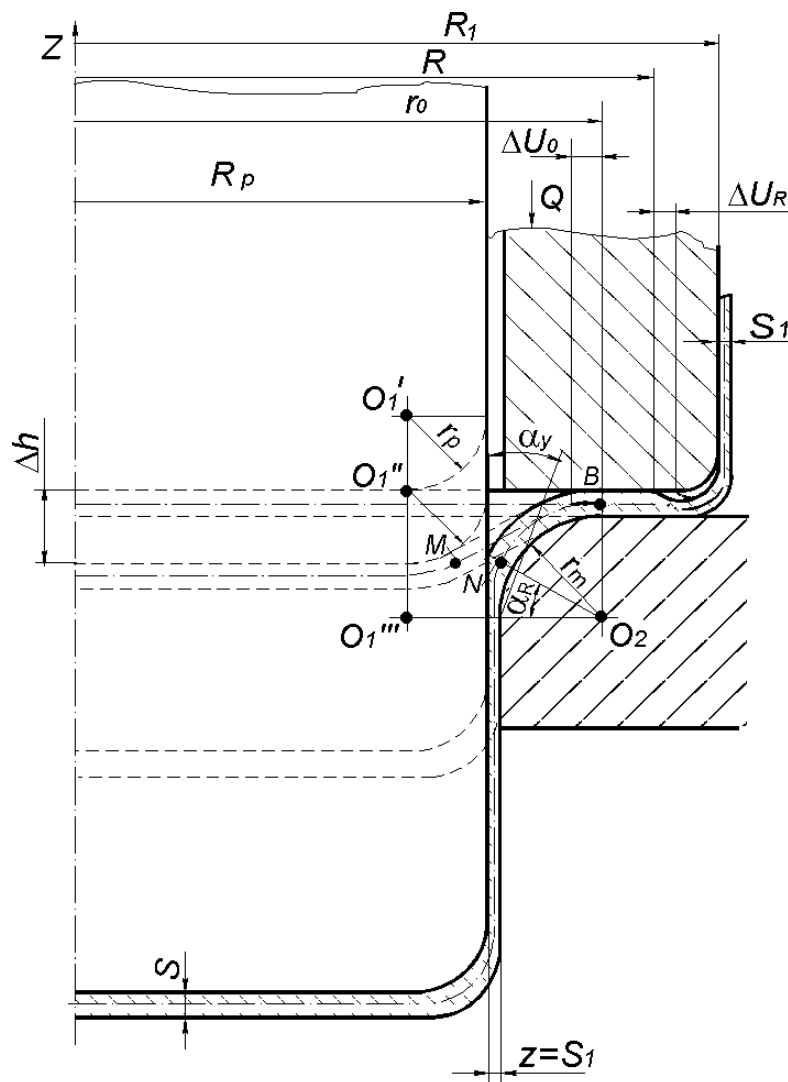


Рисунок 3.2 – Схема подальшого переходу комбінованого витягування

Очевидно, при деформації за такою схемою розтягуюча напруга в небезпечному перерізі заготовки, що обмежує величину її формозміни, допустима без руйнування, буде найбільшою в початковій фазі. Звідси

впливає, що при оцінці величини можливої формозміни заготовки на наступних переходах комбінованого витягування найбільший інтерес має пошук поля напружень в осередку деформації в початковій фазі процесу деформування.

Осередок пластичного деформування на наступних переходах витягування розташовується між недеформуємими частками стінок деталі, що витягається, і напівфабрикату, і в зазорі між матрицею і пуансоном, де відбувається потоншення або калібрування стінки (див. рис. 3.2). При цьому в початковій фазі деформується кругла плоска донна частина напівфабрикату за схемою комбінованого витягування з дією вздовж її зовнішнього контуру протинатягненням, що виникає в результаті переходу циліндричної частини заготовки на площину матриці. У зв'язку з цим визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу в осередку деформації для початкової фази подальшого переходу витягування може бути виконано аналогічно до наведеного вище рішення для першого переходу комбінованого витягування з плоскої заготовки.

Оскільки комбіноване витягування є нестационарним процесом деформування, то при математичному моделюванні наступних переходів необхідно безперервну формозміну розділяти на ряд наступних один за одним елементарних етапів і для кожного з них визначати компоненти НДС заготовки і необхідні параметри технологічного процесу.

Розглядаючи послідовність формозміни заготовки в початковій фазі витягування, виділяємо чотири стадії. На першій стадії відбувається просторовий вигин з розтяганням заготовки навколо крайок матриці і пуансона, деформується матеріал, що лежить на площині матриці, і починається перехід циліндричної частини напівфабрикату на площину матриці за допомогою просторового вигину і випрямлення. Друга стадія характеризується тим, що в ній також деформується фланець з протинатягненням і відбувається витягування металу в зазор між пуансоном і матрицею, і оформлення контуру осередку деформації потоншення. Третя стадія являє усталений процес комбінованого витягування, що включає потоншення втягнутої в матрицю частини заготовки,

деформацію фланця і перехід циліндричної частини напівфабрикату на площину фланця. Коли донна частина заготовки повністю зійде з площини матриці, починається четверта стадія. На ній крайові об'єми донної частини заготовки деформуються без притиску, переміщаючись по заокругленню матриці, і потім потоншують в зазорі між пуансоном і матрицею. При цьому циліндрична частина напівфабрикату продовжує переходити на площину матриці, починає втягуватися в неї і переміщатися вздовж радіусного заокруглення. Коли матеріал циліндричної частини напівфабрикату дійде до верхньої межі осередку деформації потоншення, закінчується початкова фаза і починається фаза деформування, в якій склад і розміри осередку деформації залишаються незмінними, а процес формозміни характеризується переходом елементів з циліндричної частини напівфабрикату в осередок деформації, а також переміщенням елементів заготовки в осередку деформації з одночасною зміною їх розмірів і, після калібрування в витяжному зазорі, переходом цих елементів в стінку виробу, що витягається.

Таким чином, для визначення параметрів НДС в початковій фазі подальшого переходу комбінованої витяжки скористаємося згаданим вище рішенням для першого переходу витяжки з плоскої заготовки. При цьому відмінність в розрахунковій схемі буде полягати в тому, що на наступний перехід на зовнішньому контурі деформованого плоского фланця докладена додаткова розтягаюча напруга від вигину і випрямлення стінки циліндричної частини напівфабрикату при її переході на площину матриці, і від пластичної деформації цього матеріалу у фланці.

Приріст напруги, що викликається вільним вигином і випрямленням елементів заготовки, знайдемо, використовуючи наближене рішення Є.А.Попова [17]:

$$2\Delta\sigma_{\rho} = \frac{\sigma_s \cdot S_l}{2R_{\rho}}, \quad (3.55)$$

де  $R_{\rho} = \frac{\sqrt{R_l S_l}}{\sin \beta}$  - радіус кривизни серединної поверхні при вільному



(безконтактному) вигині;

$\beta = \pi/2$  - центральний кут дуги вигину в меридіональному перерізі.

Виконуючи підстановки в (3.55), отримуємо вираз для сумарного збільшення розтягуючої напруги від вигину і випрямлення:

$$\Delta\sigma_{\rho\Sigma} = \frac{\sigma_s}{2} \sqrt{\frac{S_l}{R_l}}. \quad (3.56)$$

Складову додаткової розтягуючої напруги від пластичної деформації на площині матриці втягнутих елементів циліндричної частини напівфабрикату приблизно можна врахувати, приймаючи для всієї початкової фази деформування величину радіальної напруги на внутрішній кромці фланця, обчислену для максимального значення радіусу частини заготовки, що лежить на площині матриці, тобто при  $R = R_l$ .

Виходячи з викладеного та скориставшись рішенням для напруг і зусиль при комбінованому витягуванні порожнистих циліндрів з плоскої заготовки, запишемо вираз для розтягуючої напруги в небезпечних перетинах. Для першої стадії в перерізі на переході від округлої кромки пуансона до вільної кінчної поверхні:

$$\sigma_{\rho_M}^I = \left( \sigma_{\rho_B} + \sigma_{TP} + \frac{\sigma_s \cdot S}{4r_p + 2S} + \frac{\sigma_s \cdot S}{4r_m + 2S} \right) \exp(\mu\alpha) \frac{r_N}{r_M} \cdot \frac{S_B}{S_M} + \frac{\sigma_s}{2} \sqrt{\frac{S_l}{R_l}}, \quad (3.57)$$

де  $\sigma_{\rho_B}$  - радіальна розтягуюча напруга на внутрішньому контурі фланця, визначається за виразом (3.31) при  $\rho = r_0$ ;

$\mu$  - коефіцієнт контактної тертя на заокругленні і площині матриці і притиску.

Для другої, третьої і четвертої стадії (перетин в кінці осередку деформації потоншення):

$$\sigma_{\rho}^{2,3,4} = 1,15E \left( \frac{S}{S_l} \right)^m \frac{b+1}{b+m} \left[ 1 - \left( \frac{S_l}{S} \right)^{b+m} \right] + 0,577 \left[ 1 + \left( \frac{S}{S_l} \right)^m \right] \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_y}{2} + \sigma_{\rho_N} \left( \frac{S_l}{S} \right)^b, \quad (3.58)$$

де  $\sigma_{\rho_N}$  - нормальна напруга протинатягнення, що діє на верхній межі осередку

деформації потоншення.

Для другої і третьої стадій напруга  $\sigma_{\rho_N}$  є результатом опору деформації металу заготовки на ділянках осередку деформації, розташованих вище верхньої межі зони потоншення; вираз для нього можна записати у вигляді:

$$\sigma_{\rho_N}^{2,3} = \left( \sigma_{\rho_B} + \sigma_{Tp} + \frac{\sigma_s \cdot S_B}{4r_m + 2S_B} \right) \exp[\mu(\pi/2 - \alpha_R)] + \frac{\sigma_s}{2} \sqrt{\frac{S_1}{R_1}}. \quad (3.59)$$

Для четвертої стадії  $\sigma_{\rho_N}$  визначається з умови, що вона плавно, майже за лінійною залежністю зменшується від величини  $\sigma_{\rho_N}^3(R=r_0)$  в кінці третьої стадії до значення розтягуючої напруги на верхній межі осередку деформації потоншення в кінці четвертої стадії, обчисленої за виразом (3.59) для деформації заготовки товщиною, рівною товщині стінки циліндричної частини напівфабрикату  $S_1$ .

Зусилля комбінованого витягування на етапах другої, третьої і четвертої стадій деформування донної частини заготовки:

$$P_{кв} = \pi d_p S_1 \left\{ 1,15 E_2 \left( \frac{S}{S_1} \right)^m \frac{b+1+c}{b+m} \left[ 1 - \left( \frac{S_1}{S} \right)^{b+m} \right] + 0,577 E \left[ 1 + \left( \frac{S}{S_1} \right)^m \right] \times \right. \\ \left. \times \operatorname{tg} \frac{\alpha_y}{2} + \frac{\sigma_{\rho_N}}{b+1} \left[ (b+1+c) \left( \frac{S_1}{S} \right)^b - c \frac{S}{S_1} \right] \right\}, \quad (3.60)$$

де  $c = \mu_n / \sin \alpha_y$ .

Наведене рішення для параметрів НДС матеріалу заготовки в осередку деформації і деформуючих зусиль на етапах подальшого переходу комбінованого витягування може служити основою для моделювання процесу за викладеною вище методикою, яка дозволяє визначати умови можливого руйнування на етапах обробки і проектувати операцію в технології штампування порожнистих циліндрів.

### 3.3 Алгоритм чисельного математичного моделювання напружено-деформованого стану металу на етапах комбінованого витягування

В основу алгоритму покладено чисельну реалізацію отриманої математичної моделі напружено-деформованого стану при комбінованому витягуванні з листових заготовок. Чисельна реалізація моделі здійснюється шляхом обчислення параметрів НДС в елементах заготовки на етапах деформування з малими приростами ходу пуансона, для яких приймаються постійними значення граничних умов. Такий підхід дозволяє в повній мірі врахувати реальний характер зміни граничних умов і обчислити параметри витягування з урахуванням зміцнення металу, зміни товщини заготовки, сил тертя і інших чинників.

Методика чисельного математичного моделювання полягає в наступному:

- весь процес формозміни розбивається на велику кількість етапів і задається мале збільшення ходу пуансона;
- з урахуванням НДС та зміни товщини заготовки розраховується об'єм матеріалу, який на даному етапі повинен бути втягнутий з фланця;
- визначаються збільшення переміщень часток заготовки на контурах кінцевої безлічі елементарних кілець, на які попередньо розбивається фланець рівновіддаленими круговими перерізами;
- встановлюється необхідність застосування притиску;
- обчислюються компоненти НДС заготовки у фланці на контурах елементарних кілець, на радіусній кромці матриці, в осередку деформації потоншення і необхідні параметри процесу з урахуванням зміцнення, зміни товщини заготовки, сил тертя і інших чинників;
- визначається можливість руйнування заготовки на кожному етапі;
- розраховуються нові змінені радіуси контурів невтягнутих в матрицю елементарних кілець фланця після кожного заданого збільшення ходу пуансона;
- задається наступне прирощення ходу пуансона і всі описані стадії моделювання повторюються до моменту виходу краю виробу з зазору між пуансоном і матрицею.

Схема алгоритму наведена на рис. 3.3. Вихідними даними для моделювання є: розміри виробу, товщина вихідної заготовки, радіуси заокруглень робочих крайок матриці і пуансона, значення коефіцієнтів тертя на поверхнях матриці, пуансона в осередку деформації потоншення і на поверхні притиску, коефіцієнти апроксимації кривої зміщення матеріалу заготовки, крок збільшення ходу пуансона і кількість кільцевих елементів, на які розбито фланець.

Обчислення починаються з блоку 2, де визначається діаметр плоскої заготовки. Потім встановлюється необхідність притиску. Далі в блоці 4 фіксується початковий етап моделювання та переміщенню пуансона присвоюється значення кроку  $\Delta h$ . У блоках 5, 6, 7 обчислюються параметри розбиття фланця на елементарні кільцеві об'єми: ширина кільця

$$\Delta R = \frac{R_0 - r_0}{KE}, \quad (3.61)$$

де  $KE$  – кількість кільцевих елементів фланця і початкові радіуси кільцевих перетинів, що є контурами кордонів елементів, починаючи від зовнішнього контуру фланця ( $i = 1$ ) до внутрішнього ( $i = KC$ , де  $KC$  - загальна кількість кільцевих перетинів,  $KC = KE + 1$ ).

$$R_{l,i} = R_0 - (i - 1) \cdot \Delta R, \quad (3.62)$$

де  $i$  – номер кільцевого перетину;

$R_0$  – радіус вихідної заготовки.

У блоці 8 визначаються параметри деформації шляхом вигину з розтягуванням заготовки на кромці пуансона в першій стадії витягування: радіус нейтральної поверхні  $\rho_n$ , товщина заготовки після вигину  $S_m$  і ступінь деформації потоншення  $\varepsilon_j$ .

У блоках 9, 10, 11 послідовно знаходяться площі поверхонь, які повинні бути втягнуті з фланця заготовки відповідно на першій, другій і третій стадіях витягування, після чого у блоці 12 визначається приріст переміщення на внутрішній кромці фланця  $\Delta U_0$ .

Далі в блоках 13 - 19 в циклі обчислюються параметри деформованого стану на контурах всіх елементарних кільцевих об'ємів фланця, що лежать на площині матриці, починаючи з зовнішнього контуру фланця вихідної заготовки. При цьому спочатку в блоці 15 радіусам розрахункових контурів присвоюються їх вихідні значення. Потім в блоці 16 для всіх контурів даного етапу переміщення пуансона визначають приріст переміщення  $\Delta U_{R_{ji}}$ , приріст деформацій  $d\varepsilon_{\rho_{ji}}$ ,  $d\varepsilon_{\theta_{ji}}$ ,  $d\varepsilon_{z_{ji}}$  і інтенсивності деформації  $d\varepsilon_{ji}$ ; значення накопиченої деформації по товщині  $\varepsilon_{z_{ji}}$  і тангенціальної деформації  $\varepsilon_{\theta_{ji}}$ , а також товщину заготовки і напругу плинності матеріалу.

Потім в блоці 17 розраховується радіус  $i$ -того контуру кільцевого перетину фланця для наступного  $(j + 1)$ -го етапу переміщення пуансона:

$$R_{j+1,i} = R_{ji} - \Delta U_{R_{ji}}. \quad (3.63)$$

Зазначені обчислення параметрів деформованого стану в блоках 16 і 17 продовжуються до тих пір, поки радіус поточного розрахункового контуру  $R_{ji}$  залишатиметься більше радіуса внутрішнього контуру фланця  $r_0$ . Продовження обчислень або вихід з циклу встановлюється в блоках 18 і 19. При цьому в разі виходу з циклу кільцеві елементи фланця, радіуси внутрішнього контуру яких менше, ніж  $r_0$ , виключаються з розрахунку як ті, що зійшли з площини матриці. Тоді в блоці 20 фіксується номер останнього контуру кільцевого перерізу, що знаходиться на площині матриці з радіусом  $R_{ji} \geq r_0$ . В подальшому розрахунку вважається, що цей контур збігається з внутрішнім контуром фланця і для нього обчислюється товщина заготовки і напруга плинності матеріалу на внутрішньому контурі фланця. Таке припущення виправдане тим, що при початковій ширині елементарних кільцевих елементів фланця, що дорівнює 0,02 ... 0,03 ширини фланця, забезпечує відхилення у визначенні товщини заготовки на внутрішньому контурі фланця не більше, ніж на 1...3%.

Продовження обчислень здійснюється з блоку 23, в якому фіксується наступний крок переміщення пуансона і визначається його загальне переміщення.

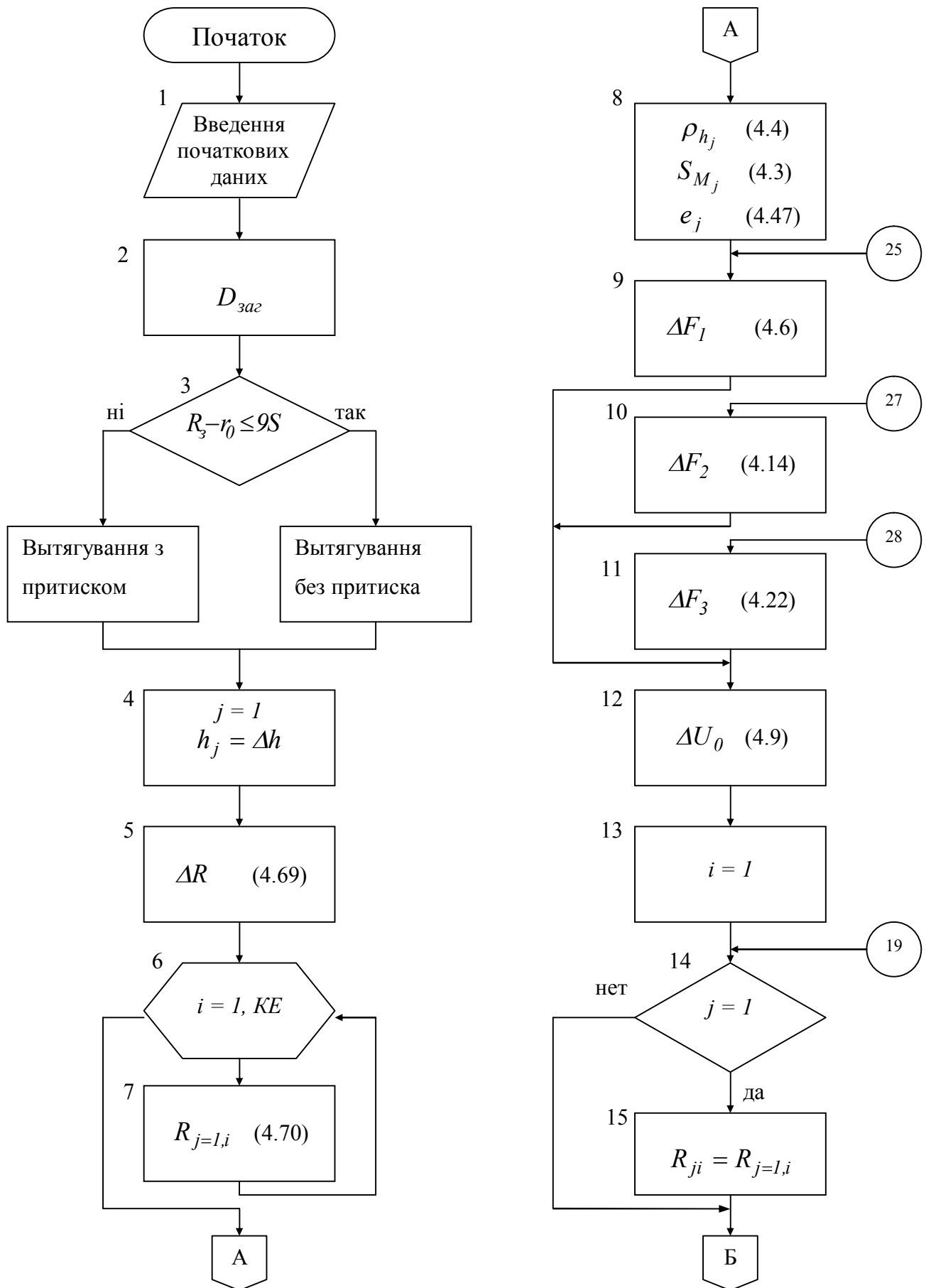


Рисунок 3.3 – Схема алгоритму чисельного математичного моделювання НДС металу при комбінованому витягуванні

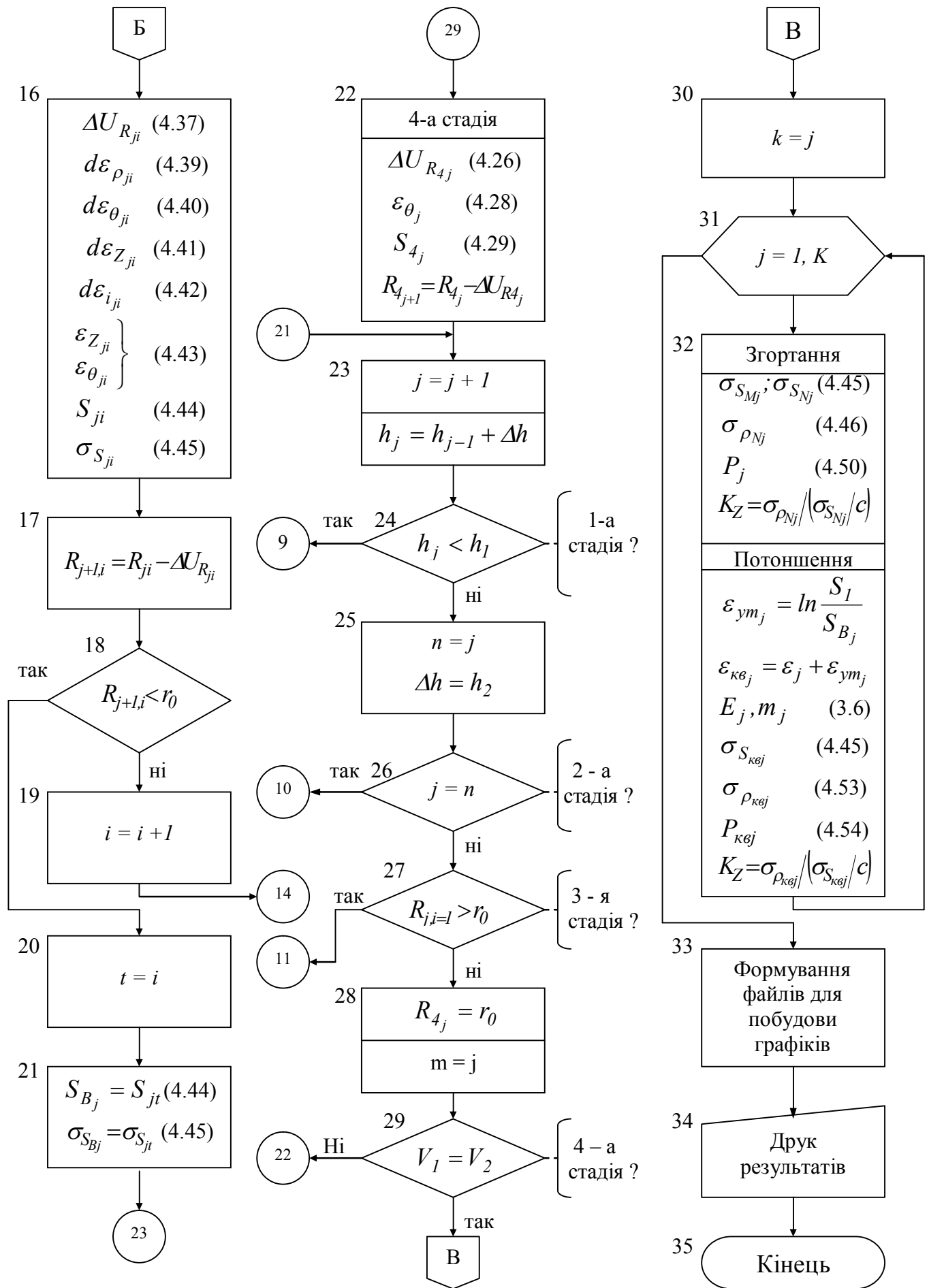


Рисунок 3.3. Аркуш 2

Далі в блоках 24-29 встановлюється стадія витягування, для якої буде здійснюватися продовження обчислень. Обчислення для першої стадії здійснюються до тих пір, поки хід пуансона не досягне величини  $h_1$ ; наступний крок фіксується під номером  $n$ . На цьому етапі здійснюється друга стадія - формування осередку деформації потоншення. Вона виконується на протязі одного кроку збільшення ходу пуансона, що дорівнює  $h_2$ , необхідного для повного формування осередку деформації потоншення. Тому перехід на третю стадію проводиться за ознакою розбіжності номера кроку збільшення ходу пуансона з номером кроку реалізації другої стадії (див. блок 27).

Розрахунки для третьої стадії ведуться до тих пір, поки радіус зовнішнього контуру фланця не стане рівним або менше радіуса внутрішнього контуру фланця (блок 27). В такому випадку радіусу зовнішнього контуру заготовки, втягнутого в матрицю, в блоці 28 присвоюється значення  $r_0$ . Цей етап фіксується під номером  $m$  і обчислення тривають з розрахунком параметрів для четвертої стадії в блоці 22. При цьому обчислюються переміщення контуру заготовки  $\Delta U_{R4j}$ , товщина заготовки на вході в осередок деформації потоншення  $S_{4j}$ , значення ступеня тангенціальної деформації крайового елемента заготовки на радіусній кромці матриці  $\varepsilon_{\theta j}$  і нове значення радіуса контуру заготовки для наступного кроку збільшення ходу пуансона  $R_{4j+1} = R_{4j} - \Delta U_{R4j}$ . Вихід з циклу розрахунку параметрів четвертої стадії встановлюється в блоці 29 за ознакою рівності поточного об'єму трубної частини заготовки, що вийшла з матриці  $V_{\text{труб } j}$  ( $V_1$ ), об'єму трубної частини виробу  $V_{\text{труб}}^{\text{изд}}$  ( $V_2$ ). Після цього в блоці 30 фіксується номер останнього кроку збільшення ходу пуансона і потім організовується цикл обчислення для всіх етапів процесу витягування значень напруги плинності матеріалу в різних фіксованих перетинах осередку деформації, розтягаючи напруг в небезпечних перетинах, необхідних для здійснення витягування без потоншення і комбінованого витягування, а також деформуєчих зусиль і показників завантаження операції  $K_z$ .



На друк можуть видаватися всі параметри, що розраховуються при моделюванні, в складі, який визначається необхідністю виконання відповідного аналізу. Дані видаються у вигляді таблиць, що містять величину ходу пуансона для всіх розрахункових етапів деформування і відповідні йому значення необхідних параметрів. Для ряду параметрів: деформуюче зусилля, розтягуюча напруга на виході з матриці, показник завантаження операції, товщина стінки на вході в осередок деформації потоншення розрахункові дані можуть видаватися у вигляді графіків залежностей їх від величини ходу пуансона. З цією метою в блоці 33 формуються файли для побудови графіків.

### **3.4 Застосування математичного моделювання для дослідження комбінованого витягування**

Як приклади чисельної реалізації отриманої математичної моделі нижче представлені результати розрахунків параметрів НДС, зусилля, показника завантаження операцій і граничних деформацій при комбінованому витягуванні.

Розрахунки зроблені для наступних початкових даних: матеріал - сталь 08кп, діаметр заготовки  $D_3 = 214 \text{ мм}$ , товщина  $S_0 = 1,0 \text{ мм}$ ,  $S_1 = 0,6 \text{ мм}$ ,  $r_M = 10 \text{ мм}$ ,  $r_n = 5 \text{ мм}$ , коефіцієнти тертя  $\mu_M = 0,05$ ;  $\mu_n = 0,075$ .

На рис. 3.4 наведені розрахункові розподіли в безрозмірних змінних радіальних  $\bar{\sigma}_\rho = \sigma_\rho / \sigma_s$  і тангенціальних  $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_s$  напруг, а також радіальної  $\bar{\varepsilon}_\rho = \varepsilon_\rho \cdot r_0 / \Delta U_0$ , тангенціальної  $\bar{\varepsilon}_\theta = \varepsilon \cdot r_0 / \Delta U_0$  і нормальної до площини листа  $\bar{\varepsilon}_z = \varepsilon_z \cdot r_0 / \Delta U_0$  деформацій у фланці заготовки в початковий момент комбінованого витягування циліндричної деталі діаметром 92,3 мм з листової заготовки ( $m_d = 0,43$ ).

Характер розподілів напружень і деформацій відповідає відомим розподілам з теорії листового штампування [17, 32]. На ділянці фланця з переважаючими стискаючими напруженнями  $|\sigma_\theta| > |\sigma_\rho|$  відбувається потовщення  $\varepsilon_z > 0$ , а на ділянці фланця з переважаючими радіальними

розтягуючими напругами  $|\sigma_\rho| > |\sigma_\theta|$  - потоншення  $\varepsilon_z < 0$ . При  $|\sigma_\rho| = |\sigma_\theta|$  товщина залишається незмінною і  $\varepsilon_z = 0$ .

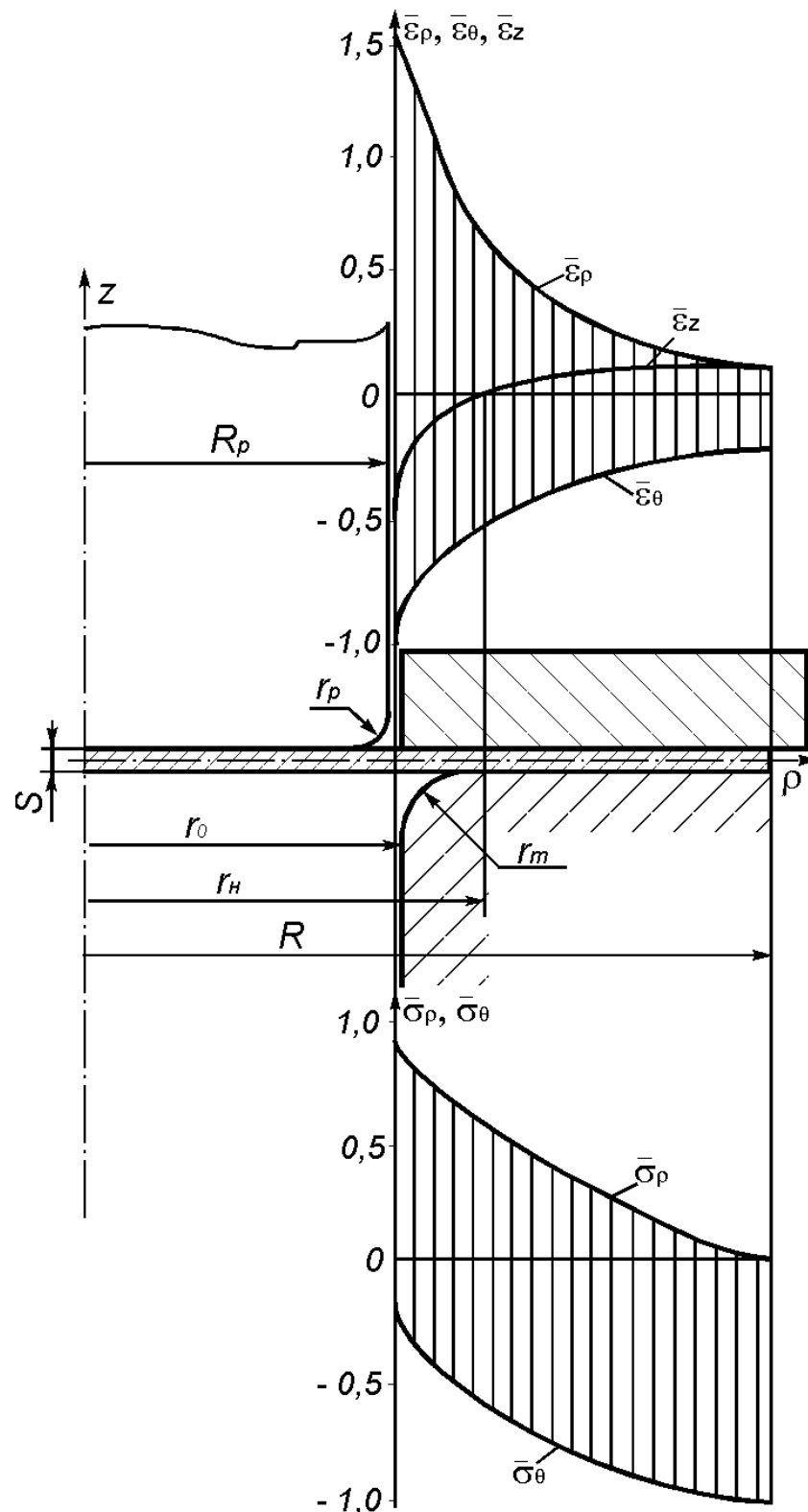


Рисунок 3.4 – Епюри радіальної  $\bar{\varepsilon}_\rho$ , тангенціальної  $\bar{\varepsilon}_\theta$  і нормальної до площини листа  $\bar{\varepsilon}_z$  деформацій, а також радіальних  $\bar{\sigma}_\rho$  і тангенціальних  $\bar{\sigma}_\theta$  напружень у фланці заготовки в початковий момент витягування

Межа між ділянками потовщення і потоншення фланця знаходиться на нейтральному колі радіусом  $r_n = 63,45 \text{ мм}$  або  $r_n = 0,593R$ , що відповідає теоретичному значенню радіусу нейтрального кола  $r_n = 0,59R$ , визначеному з використанням умови пластичності Мізеса [18].

Наведені результати розрахунків свідчать про їх достовірності і про прийнятність отриманої математичної моделі для визначення напружено-деформованого стану металу у фланці плоскої осесиметричної заготовки, що піддається витягуванню.

На рис. 3.5, 3.6, 3.7 наведені розрахункові графіки зміни розтягуючи напруг на виході з матриці, показника завантаження операції і зусилля деформування першої операції комбінованого витягування в залежності від величини ходу пуансона, представленого безрозмірною змінною  $\bar{h} = h/H$ , де  $H$  - повний хід.

На кожному із зазначених рисунків дано 5 кривих, отриманих розрахунком для різних граничних умов деформування комбінованого витягування, які визначаються поєднанням значень коефіцієнтів витягування та потоншення.

Криві 1 відносяться для граничного стану, обумовленого можливим руйнуванням стінки, пов'язаним з недостатньою міцністю небезпечного перетину, який формується на першій стадії в результаті вигину з розтягуванням металу на радіусній кромці пуансона.

Криві 2 представляють зміну  $\sigma_z$ ,  $K_z$  і  $P$  для комбінованого витягування, при якому граничні стани процесу мають місце в рівній мірі як в кінці першої, так і в третій стадії усталеного процесу витягування.

Криві 3 і 4 характерні для умов комбінованого витягування, при яких гранична формозміна обмежується міцністю стінки на виході з матриці на третій стадії.

Криві 5 відносяться до граничних умов витягування, при яких руйнування може відбуватися на четвертій стадії при потонненні крайової частини заготовки, потовщеної в процесі деформації її на площині фланця і радіусної кромки матриці.

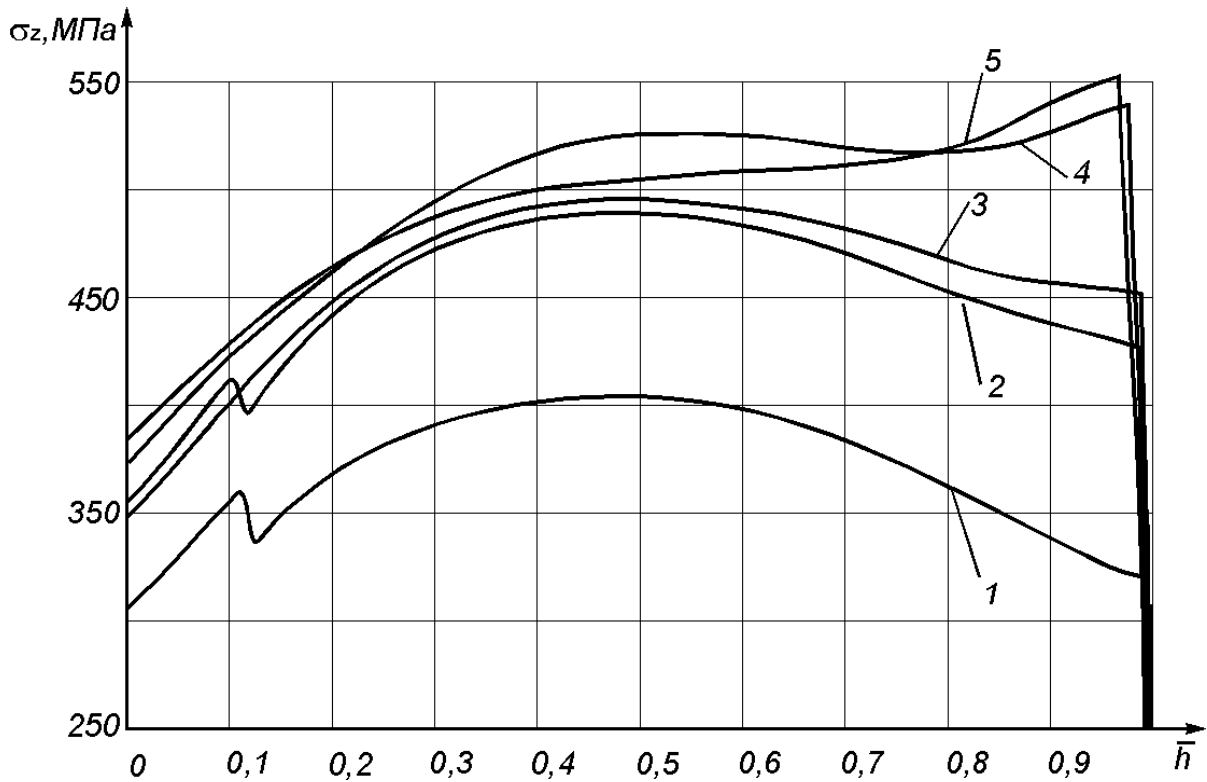
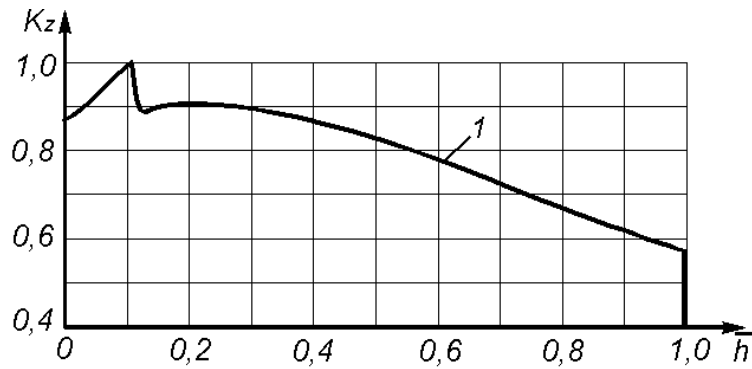


Рисунок 3.5 – Зміна растягуючої напруги на виході з матриці при комбінованому витягуванні в залежності від ходу пуансона: сталь 08кп,  $S_0 = 1,0 \text{ мм}$  ;  $D_{заг} = 214 \text{ мм}$  ; 1 -  $m_d = 0,47$  ,  $m_s = 0,84$  , 2 -  $m_d = 0,47$  ,  $m_s = 0,75$  , 3 -  $m_d = 0,5$  ,  $m_s = 0,7$  , 4 -  $m_d = 0,6$  ,  $m_s = 0,57$  , 5 -  $m_d = 0,7$  ,  $m_s = 0,5$

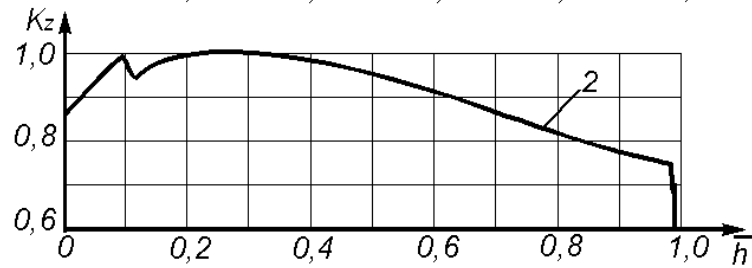
Слід зазначити, що зазначені умови можливого руйнування і момент його виникнення чітко можна встановити тільки з розгляду кривих зміни показника завантаження операції в залежності від ходу пуансона (рис. 3.6). Це пояснюється тим, що являє собою відношення растягуючої напруги на виході з матриці на етапі деформування і напруги плинності металу в цьому ж місці на цьому етапі.

Підтвердженням сказаного є відсутність кореляції залежностей  $\sigma_z = f(\bar{h})$  і  $K_z = f(\bar{h})$  (див. рис. 3.5 і 3.6), зокрема, положення максимумів на відповідних кривих різні, крім графіків 5, які мають місце, коли формозміна обмежується потоншенням крайової частини заготовки.



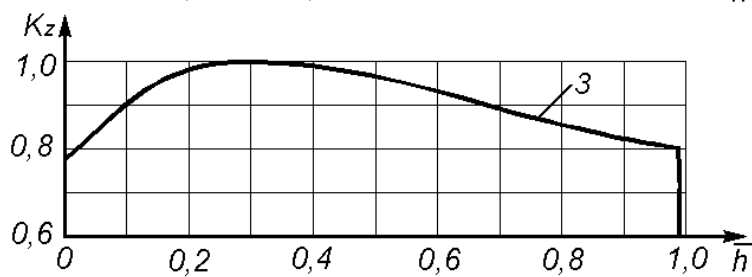
$$m_d = 0,47$$

$$m_S = 0,84$$



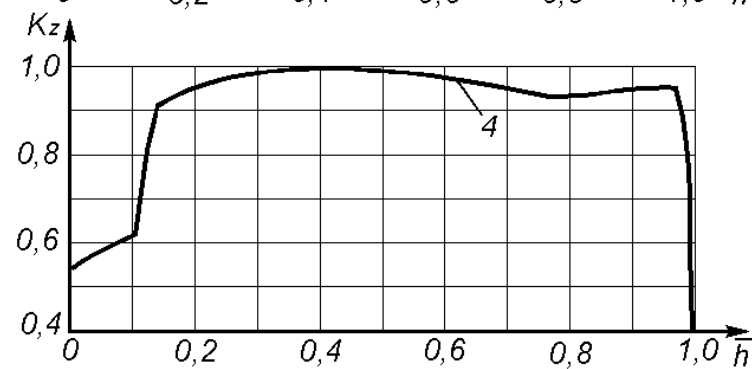
$$m_d = 0,47$$

$$m_S = 0,75$$



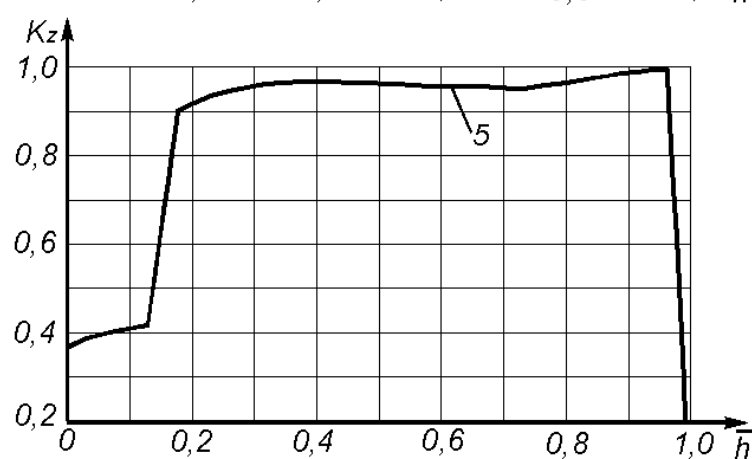
$$m_d = 0,50$$

$$m_S = 0,7$$



$$m_d = 0,60$$

$$m_S = 0,57$$



$$m_d = 0,70$$

$$m_S = 0,5$$

Рисунок 3.6 – Розподіл показника завантаження операції по висоті напівфабрикату при комбінованому витягуванні в залежності від коефіцієнтів витягування та потоншення: *сталь 08 кп*;  $S_0 = 1,0\text{мм}$ ;  $D_{заг} = 214\text{мм}$

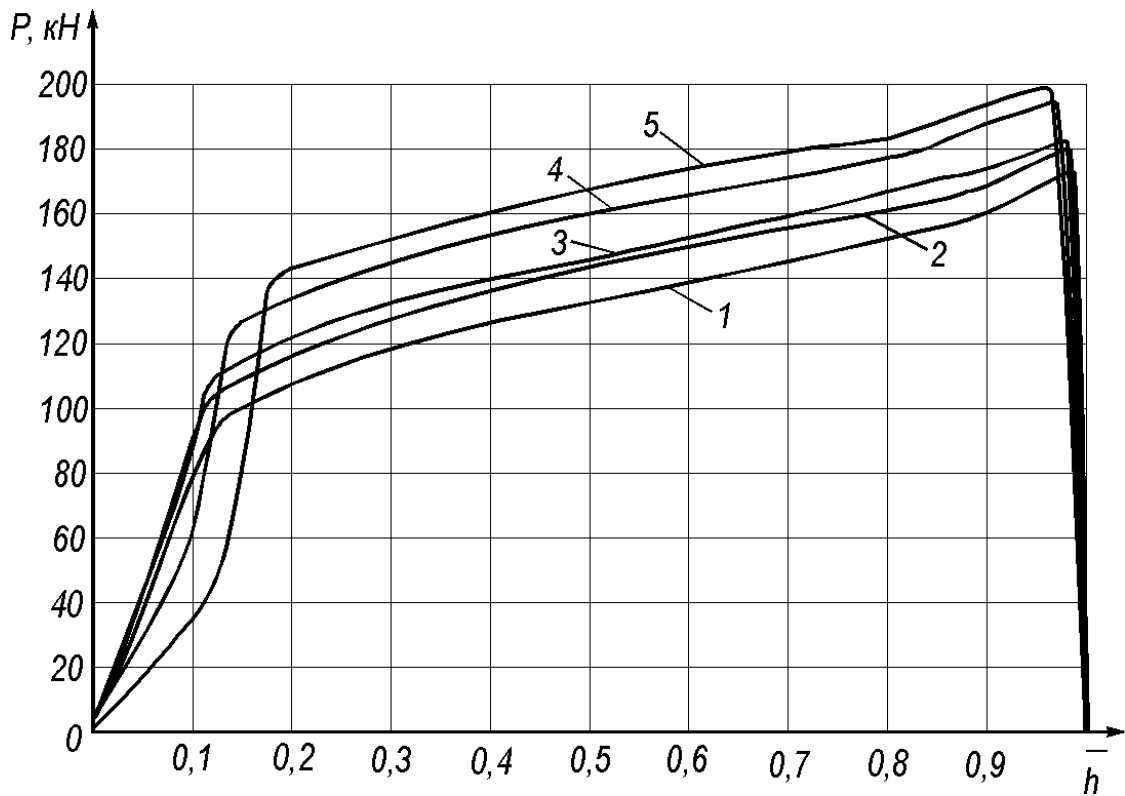


Рисунок 3.7 – Зміна зусилля комбінованого витягування в залежності від ходу пуансона: сталь 08кп,  $S_0 = 1,0\text{мм}$  ;  $D_{заг} = 214\text{мм}$ ; 1 -  $m_d = 0,47$ ,  $m_s = 0,84$ , 2 -  $m_d = 0,47$ ,  $m_s = 0,75$ , 3 -  $m_d = 0,5$ ,  $m_s = 0,7$ , 4 -  $m_d = 0,6$ ,  $m_s = 0,57$ , 5 -  $m_d = 0,7$ ,  $m_s = 0,5$

З розгляду ходу кривих  $K_z = f(\bar{h})$  (див. рис. 3.6) видно, що максимум  $K_z$  і відповідно руйнування заготовки може мати місце в будь-який момент формозміни, починаючи з моменту початку формування осередку деформації потоншення (кінець першої стадії, початок другої) і кінчаючи четвертою стадією при потонненні крайової частини заготовки. При цьому зі збільшенням ступеня деформації потоншення місце руйнування зміщується від придонної частини стінки до відкритого торця циліндра.

Зміна зусилля по ходу витягування (рис. 3.7) завжди таке, що воно монотонно зростає від початку до кінця процесу. Це пов'язано з тим, що, по-перше, опір деформації потоншення значно більше опору деформації зменшення діаметра, і тому максимум зусиль згортання плоскої заготовки, положення якого збігається по ходу процесу з моментом початку формування осередку деформації потоншення завжди менше зусилля на початку другої

стадії. Більш того ці зусилля складаються і виходить загальне монотонне зростання його. По-друге, по мірі збільшення ходу пуансона в осередок деформації потоншення надходить заготовка з товщиною і напругою плинності матеріалу, що монотонно збільшуються і які формуються в процесі деформації її на площині фланця і радіусної кромки матриці.

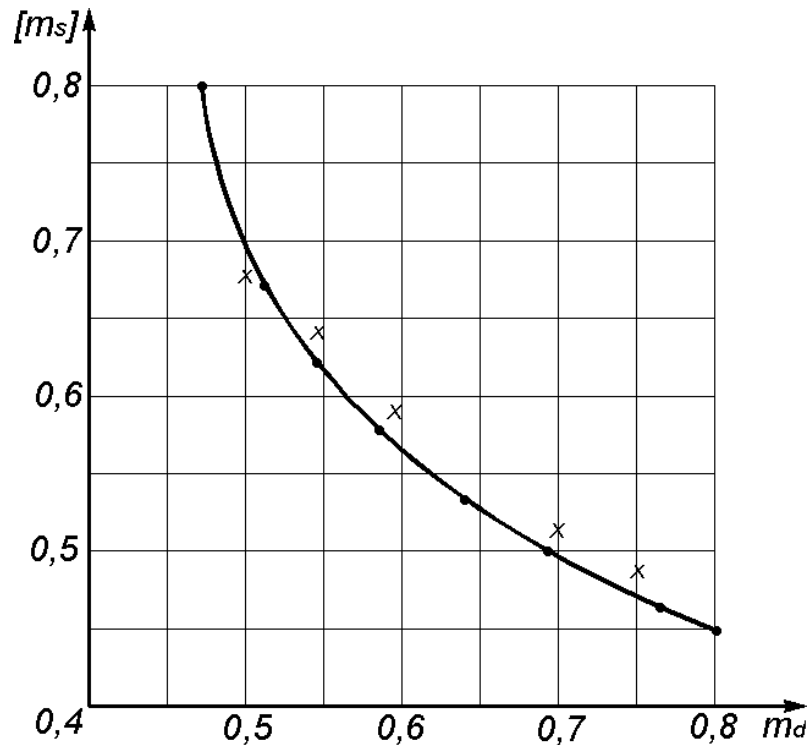


Рисунок 3.8 – Залежність граничного коефіцієнта потоншення від коефіцієнта витягування: • -  $S/D_{заг} \cdot 100 = 0,46$  ; × -  $S/D_{заг} \cdot 100 = 3,09$

На рис. 3.8 наведена розрахункова залежність граничного коефіцієнта потоншення від коефіцієнта витягування, побудована для комбінованого витягування порожнистих циліндрів з плоскої заготовки з відносною товщиною  $S/D \cdot 100 = 0,46$ . На полі графіка нанесені точки, отримані для витягування заготовок з  $S/D \cdot 100 = 3,09$ . Положення зазначених точок відносно кривої свідчить, що в інтервалі  $0,46 < S/D \cdot 100 < 3,09$  вплив відносної товщини на залежність  $[m_s] = f(m_d)$  незначний.

З рис. 3.8 видно, що при комбінованому витягуванні зменшення деформації зменшення діаметра заготовки призводить до зростання гранично

допустимої деформації потоншення.

Отримана залежність  $[m_s] = f(m_d)$  може бути використана при проектуванні технології комбінованого витягування на етапі проектного розрахунку варіанта в першому наближенні. Для зручності виконання обчислень з використанням зазначеної залежності крива, побудована на основі обчислювальних експериментів, апроксимована квадратичним поліномом методом середніх [33].

$$[m_s] = 2,753m_d^2 - 4,4m_d + 2,22. \quad (3.64)$$

Варіація апроксимації (3.64) склала  $1,12\% < 6...8\%$ , що відповідає задовільній її якості [27].



## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНОГО ВИТЯГУВАННЯ

### 4.1 Умови проведення експериментів

Експериментальні дослідження деформованого стану, зусиль і механічних властивостей металу були проведені з метою оцінки ступеня достовірності отриманих математичних моделей і методів розрахунку, наведених в розділу 3.

Використовувані методи дослідження і відповідні прилади та обладнання представлені в підрозділі 2.3.

Безпосередньо експериментальне дослідження зусиль штампування і деформованого стану було проведено з використанням установки для дослідження процесів витягування (див. рис. 2.2), яка монтувалася на гідравлічному пресі простої дії зусиллям 630 кН. Вихідні заготовки діаметром 194 мм виготовляли з холоднокатаної сталі 08кп номінальною товщиною 1,0 мм. Внутрішній діаметр штампованої деталі 92,3 мм, товщина стінки 0,6 мм. Радіуси заокруглення кромки матриці  $r_m = 10$  мм, пуансона  $r_n = 5$  мм. Зусилля притиску приймалося постійним і рівним 3,6 кН.

Механічні властивості металу після комбінованого витягування вивчалися на зразках, вирізаних зі стінки напівфабрикатів після першої операції штампування дослідної партії циліндрів приводу засувки УФ-13005-050-А, відштампованих за новою технологією з гарячекатаної листової сталі 35 товщиною 8 мм на базі комбінованого витягування (див. наст. розділ).

В якості технологічного мастила в експериментах використовували омилене цинко-фосфатне покриття поверхні заготовки. При цьому фосфатування здійснювали зануренням заготовки на 30 хв. в розчин «Перетворювач іржі».

Вихідний листовий метал випробовували на розтягнення з побудовою кривої зміцнення за відомою методикою [31]. Плоскі зразки шириною 20 мм з чотирикратною розрахунковою довжиною  $40 \times 4 = 160$  мм згідно ГОСТ 1497-84

вирізалися в напрямку прокатки. Коефіцієнти кривої зміцнення визначалися за результатами випробування п'яти зразків з визначенням деформації зі зміни розмірів у найбільш віддаленого від місця розриву ділянки розрахункової довжини.

Аналітичний опис функціонального зв'язку  $\sigma_s = f(\varepsilon)$  здійснювали у вигляді залежності:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + A \cdot \varepsilon^n, \quad (4.1)$$

де  $\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \cdot 100\%$  - відносне подовження.

Отримані наступні значення коефіцієнтів кривих зміцнення: для сталі 08кп:  $\sigma_{0,2} = 238$  МПа,  $A = 34,0$  МПа,  $n = 0,605$ ; для сталі 35:  $\sigma_{0,2} = 350$  МПа,  $A = 74,0$  МПа,  $n = 0,49$ .

Значення варіації апроксимації кривих зміцнення склали: для сталі 08кп  $3,6\% < 6...8\%$ ; для сталі 35  $4,2\% < 6...8\%$ , що свідчить про задовільну якість отриманих аналітичних виразів для напруги плинності.

## 4.2 Результати експериментальних досліджень

Для оцінки похибки вимірювання зусиль штампування за допомогою датчика тиску рідини в робочому циліндрі преса проводили 5 дослідів по комбінованому витягуванні циліндрів діаметром 92,3 мм і товщиною 0,6 мм з заготовок товщиною 1,0 мм і діаметром 194 мм ( $m_d = 0,48$ ,  $m_s = 0,6$ ) із записом зусиль. В якості досліджуваного параметра брали максимальне значення зусилля. Отримані наступні результати вимірювання:  $P_1 = 164,3$  кН,  $P_2 = 165,4$  кН,  $P_3 = 170,5$  кН,  $P_4 = 179,0$  кН,  $P_5 = 184,1$  кН. Середнє зусилля п'яти вимірювань склало  $\bar{P} = 172,6$  кН.

Розрахунки параметрів для перевірки виконання нормального закону розподілу дали наступні результати: середньоквадратичне відхилення  $\sigma = 0,7813$ ; асиметрія  $A_s = 0,279$ ; ексцес  $E_k = -1,31$ ; середньоквадратичні відхилення асиметрії і ексцеса  $\sigma_A = 0,612$ ,  $\sigma_E = 0,224$ . З отриманих результатів випливає:

$$|A_s = 0,279| < 1,5\sigma_A = 0,918 \text{ і}$$

$$\left| E_k + \frac{6}{n+1} \right| = 0,31 < 1,5\sigma_E = 0,336,$$

що свідчить про виконання гіпотези про нормальний розподіл значень вимірних зусиль в п'яти паралельних дослідах.

Довірчий інтервал вимірних значень зусиль знайдений на підставі наступних даних розрахунку: виправлене середньоквадратичне відхилення  $S = 0,873$ ; абсолютна похибка вимірювання  $\Delta x = 10,6$  кН для довірчої ймовірності  $P = 0,95$  і значення критерію Стюдента  $t = 2,7$  [26]. Довірчий інтервал вимірюваного зусилля:  $162 \text{ кН} < P < 183,2 \text{ кН}$ .

$$\text{Відносна похибка вимірювання: } \Delta = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% = \pm 6,14\%.$$

Зміна деформуючого зусилля в процесі комбінованого витягування розрахункового  $P_p$ , отриманого з використанням математичної моделі (див. розділ 3), і записане при штампуванні  $P_{on}$  наведені в таблиці 4.1 і на рис. 4.1.

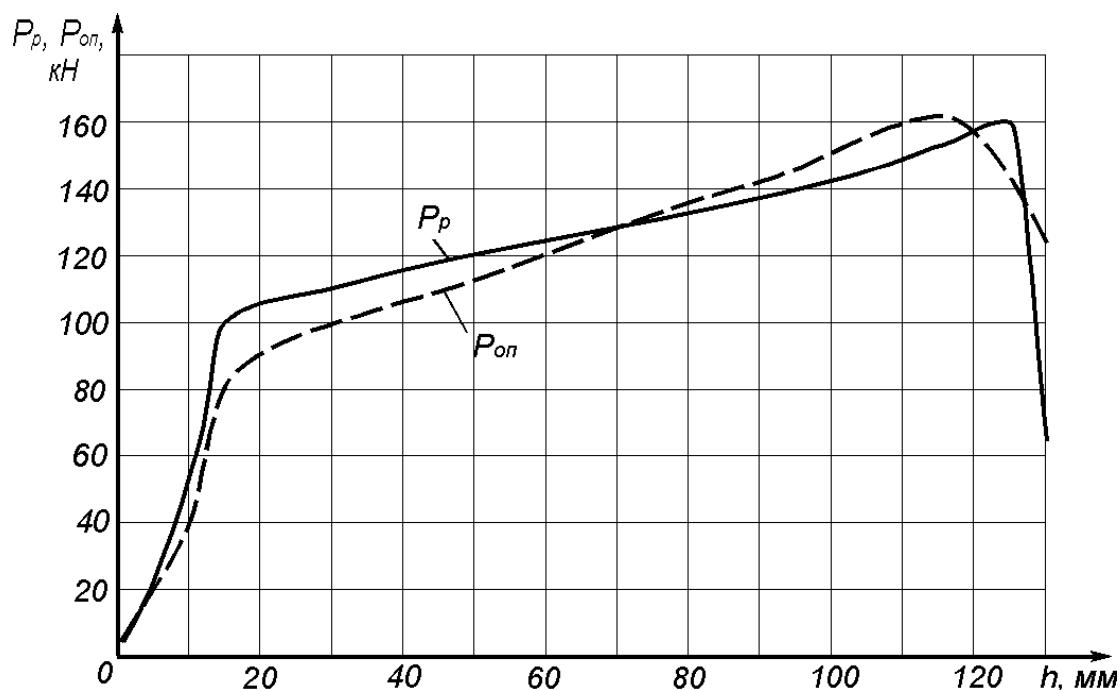


Рисунок 4.1 – Розрахункові  $P_p$  і дослідні  $P_{on}$  значення зусилля комбінованого витягування циліндра з плоскою заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $S_1 = 0,6$  мм;  $r_m = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

Таблиця 4.1 – Розрахункові  $P_p$  та дослідні  $P_{on}$  значення зусилля комбінованого витягування циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп,  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $S_I = 0,6$  мм;  $r_m = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм;  $H = 130$  мм)

Хід, мм	$P_{p_i}$ , кН	$P_{on_i}$ , кН	$\delta$ , %	$\lambda = P_{p_i}/P_{on_i}$
1	3,69	4,0	-8,4	0,922
5	21,8	18	17,4	1,21
10	50,4	38	24,6	1,32
15	99,3	80	19,4	1,24
20	103,4	90	12,9	1,148
25	106,8	95	11,0	1,124
30	109,8	100	8,9	1,099
35	111,5	102	8,5	1,093
40	115,2	105	8,8	1,097
45	117,5	109	7,7	1,078
50	118,6	114	4,0	1,049
55	121,6	118	3,0	1,030
60	124,2	122	1,8	1,018
65	126,0	126	0	1,0
70	127,8	130	-1,7	0,983
75	129,6	133	-1,7	0,974
80	132,5	135	-1,8	0,982
85	134,3	138	-2,6	0,973
90	136,2	142	-4,2	0,959
95	139,7	146	-4,3	0,956
100	141,7	150	-5,8	0,944
105	143,8	154	-6,6	0,933
110	148,2	159	-6,7	0,931
115	152,0	162	-6,1	0,938
120	155,9	155	0,6	1,006
125	159,8	144	11	1,109
127	161,3	130	24	1,24
130	64,5	124	- 48	0,52
Довірчий інтервал $0,98 < \lambda < 1,09$				Середнє $\bar{\lambda} = 1,034$

Середнє вибіркоче значення відношень розрахункових і дослідних зусиль  $\bar{\lambda} = P_{p_i}/P_{on_i}$  в точках, що відповідають певній величині ходу пуансона склало 1,034. Для ймовірності  $P = 0,95$  довірчий інтервал цього відношення  $0,98 < \lambda < 1,09$ . Для ділянки усталеного процесу витягування  $20 \text{ мм} < h < 120$

мм відносні відхилення розрахункових значень зусиль  $\delta_{P_i} = 100((P_{p_i} - P_{on_i})/P_{p_i})$  знаходяться в інтервалі  $-6,7 < \delta_p < +12,9$ .

Результати досліджень деформованого стану металу і зміни товщини на етапах витягування без потоншення наведені в таблицях 4.2 ... 4.6 і на рис. 4.2...4.4.

Таблиця 4.2 – Розрахункові  $\varepsilon_{z p}$  і дослідні  $\varepsilon_{z on}$  значення деформації по товщині при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_M = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

$H$ , мм	$\varepsilon_{z p}$	$\varepsilon_{z on}$	$\delta_{\varepsilon_z}$	$\lambda = \varepsilon_{z p} / \varepsilon_{z on}$
10,5	-0,13	-0,122	6,6	1,06
16,1	-0,048	-0,044	9,1	1,08
21,5	0,016	0,015	6,67	1,05
28,0	0,036	0,035	2,86	1,03
34,3	0,061	0,06	1,67	1,01
40,4	0,089	0,088	1,14	1,01
46,4	0,120	0,119	0,84	1,0
52,7	0,156	0,157	-0,64	0,99
59,8	0,198	0,208	-4,8	0,95
66,5	0,260	0,271	-4,06	0,96
73,6	0,315	0,331	-4,83	0,95
Довірчий інтервал $0,98 < \lambda < 1,058$				Середнє $\bar{\lambda} = 1,02$

Таблиця 4.3 - Розрахункові  $\varepsilon_{\rho p}$  і дослідні  $\varepsilon_{\rho on}$  значення радіальної деформації при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_M = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

$H$ , мм	$\varepsilon_{\rho p}$	$\varepsilon_{\rho on}$	$\delta_{\varepsilon_\rho}$	$\lambda = \varepsilon_{\rho p} / \varepsilon_{\rho on}$
1	2	3	4	5
10,5	0,063	0,07	-10	0,9
16,1	0,074	0,08	-7,5	0,92
21,5	0,124	0,133	-6,77	0,93
28,0	0,174	0,189	-7,9	0,92
34,3	0,210	0,224	-6,2	0,94
40,4	0,232	0,247	-6,0	0,94

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
46,4	0,246	0,258	-4,6	0,95
52,7	0,254	0,245	3,6	1,03
59,8	0,266	0,250	6,4	1,06
66,5	0,285	0,270	2,89	1,06
73,6	0,315	0,294	7,14	1,07
Довірчий інтервал $0,952 < \lambda < 1,034$				Середнє $\bar{\lambda} = 0,98$

Таблиця 4.4 – Розрахункові  $\varepsilon_{\theta p}$  і дослідні  $\varepsilon_{\theta on}$  значення тангенціальної деформації при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_m = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

$H$ , мм	$\varepsilon_{\theta p}$	$\varepsilon_{\theta on}$	$\delta_{\varepsilon_{\theta}}$	$\lambda = \varepsilon_{\theta p} / \varepsilon_{\theta on}$
10,5	-0,063	-0,07	-10	0,9
16,1	-0,079	-0,085	-7,0	0,9
21,5	-0,141	-0,155	-9,03	0,91
28,0	-0,210	-0,223	-5,83	0,94
34,3	-0,271	-0,271	0	1
40,4	-0,321	-0,338	-5,03	0,95
46,4	-0,367	-0,4	-8,25	0,92
52,7	-0,410	-0,414	-0,87	0,99
59,8	-0,464	-0,46	0,87	1,01
66,5	-0,528	-0,508	3,9	1,04
73,6	-0,630	-0,618	1,94	1,02
Довірчий інтервал $0,923 < \lambda < 0,997$				Середнє $\bar{\lambda} = 0,96$

Таблиця 4.5 – Розрахункові  $\varepsilon_{i p}$  і дослідні  $\varepsilon_{i on}$  значення інтенсивності деформації при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_m = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

$H$ , мм	$\varepsilon_{i p}$	$\varepsilon_{i on}$	$\delta_{\varepsilon_i}$	$\lambda = \varepsilon_{i p} / \varepsilon_{i on}$
1	2	3	4	5
10,5	0,113	0,112	0,89	1,01
16,1	0,093	0,102	-8,82	0,91
21,5	0,154	0,167	-7,78	0,92
28,0	0,225	0,234	-3,85	0,96
34,3	0,284	0,285	-0,35	0,996
40,4	0,331	0,343	-3,5	0,965

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5
46,4	0,374	0,395	-5,32	0,947
52,7	0,414	0,416	-0,48	0,995
59,8	0,466	0,462	0,87	1,01
66,5	0,534	0,522	2,3	1,02
73,6	0,63	0,62	1,6	1,016
Довірчий інтервал $0,95 < \lambda < 1,0$				Середнє $\bar{\lambda} = 0,98$

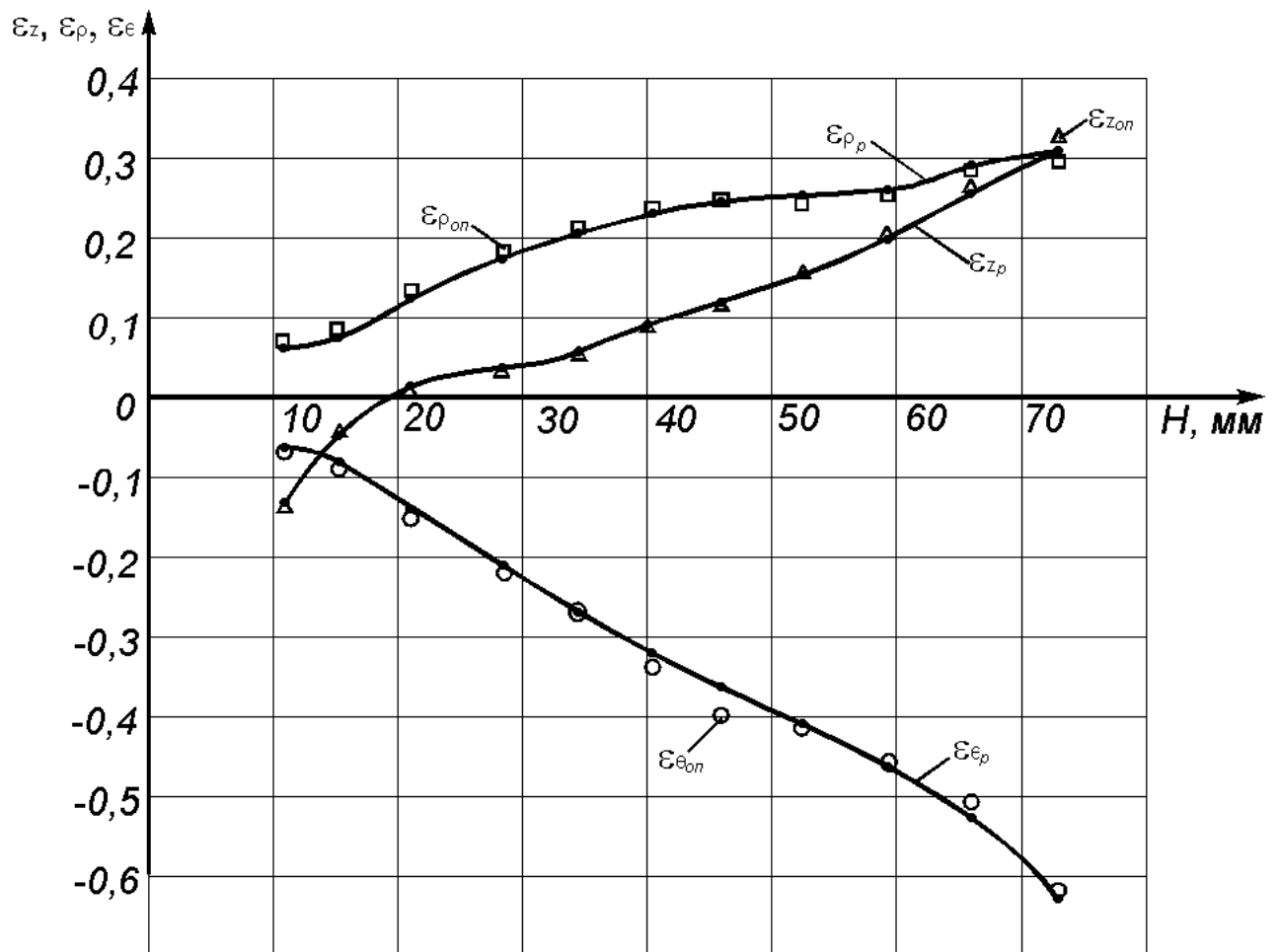


Рисунок 4.2. – Розрахункові і дослідні розподіли деформацій по висоті циліндра при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_M = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

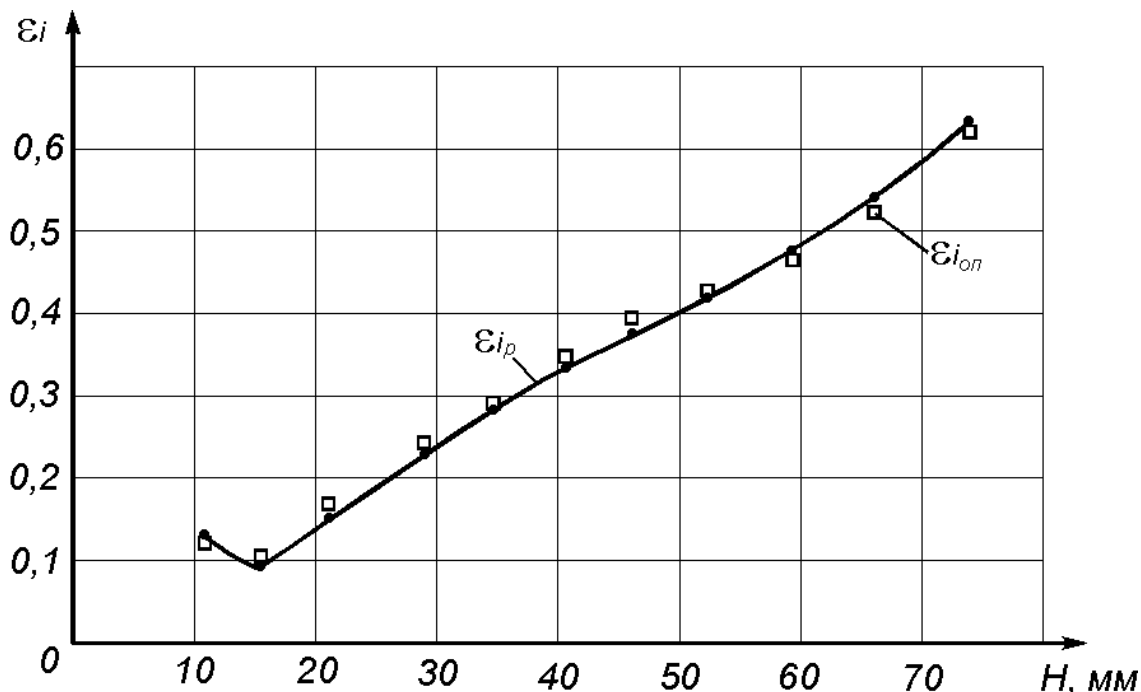


Рисунок 4.3 – Розрахунковий та дослідний розподіл інтенсивності деформації по висоті циліндра при витягуванні без потоншення з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_M = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

Таблиця 4.6 – Розрахункові  $S_p$  і дослідні  $S_{on}$  значення товщини стінки при витягуванні без потоншення циліндра з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_M = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

H, мм	$S_p$	$S_{on}$	$\delta_s, \%$	$\lambda = S_p/S_{on}$
10,5	0,88	0,79	11,4	1,11
16,1	0,95	0,88	7,95	1,08
21,5	1,016	0,95	6,95	1,07
28,0	1,036	1,0	3,6	1,04
34,3	1,062	1,031	3,01	1,03
40,4	1,093	1,093	0	1
46,4	1,127	1,138	-0,96	0,99
52,7	1,168	1,19	-1,85	0,98
59,8	1,218	1,26	-3,33	0,97
66,5	1,296	1,34	-3,3	0,96
73,6	1,37	1,44	-4,86	0,95
Довірчий інтервал $0,99 < \lambda < 1,06$				Середнє $\bar{\lambda} = 1,02$



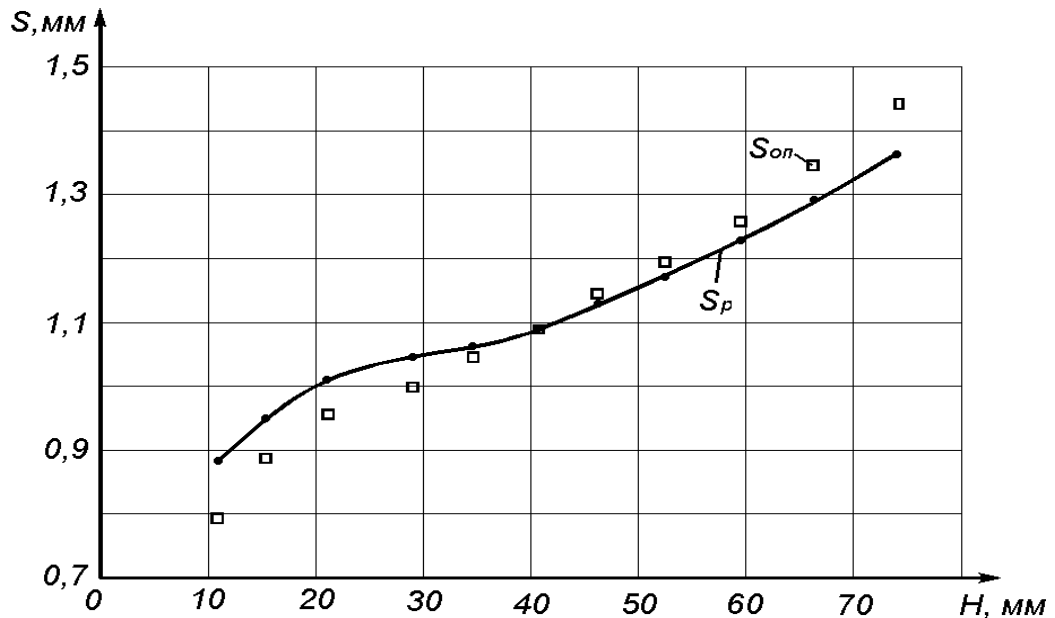


Рисунок 4.4 – Розрахункові і дослідні значення товщини стінки при витягуванні без потоншення з плоскої заготовки (сталь 08кп;  $d = 92,3$  мм;  $D_3 = 194$  мм;  $S_0 = 1,0$  мм;  $r_m = 10$  мм;  $r_n = 5$  мм)

Результати дослідження розподілу напруги плинності металу в стінці циліндрів, отриманих комбінованим витягуванням наведені в таблиці 4.7 і на рис. 4.5. Розрахункові значення отримані з використанням математичної моделі, а дослідні - шляхом вимірювання твердості по Бринелю в стінці напівфабрикату циліндра приводу засувки УФ-13005-05-А після першої операції комбінованого витягування та подальшим переведенням за формулами (3.5).

Аналіз наведених результатів дозволяє зробити висновок про достатню достовірності розробленої чисельної математичної моделі напружено-деформованого стану металу при комбінованому витягуванні, застосування якої дозволяє досягати таких показників. Максимальні значення відносних відхилень розрахункових значень від експерименту складають: для деформуючого зусилля в сталій стадії –  $6,7\% < \delta_P < 12,9\%$  (див. табл. 4.1); для деформацій на стадіях витягування без потоншення:  $-4,8\% < \delta_{\varepsilon_z} < 9,1\%$  - в напрямку нормальному товщині (див. табл. 4.2);  $-10\% < \delta_{\varepsilon_r} < 7,1\%$  - в радіальному напрямку (див. табл. 4.3);  $-10\% < \delta_{\varepsilon_\theta} < 3,9\%$  - в тангенціальному

напрямку (див. табл. 4.4); для інтенсивності деформації на етапах витягування без потоншення –  $8,9\% < \delta_{\varepsilon_i} < 2,3\%$  (див. табл. 4.5); для товщини стінки на вході в осередок деформації потоншення, що формується на етапах витягування без потоншення –  $4,9\% < \delta_S < 11,4\%$  (див. табл. 4.6); для напруги плинності металу стінки після комбінованого витягування –  $8\% < \delta_{\sigma_S} < 10\%$ .

Таблиця 4.7 – Розрахункові  $\sigma_{Sp}$  і дослідні  $\sigma_{Son}$  значення напруги плинності металу стінки напівфабрикату після комбінованого витягування з плоскої заготовки (сталь 35;  $d = 128$  мм;  $D_3 = 235$  мм;  $S_0 = 8$  мм;  $S_1 = 5$  мм;  $r_M = 32$  мм;  $r_n = 20$  мм)

$H$ , мм	$\sigma_{Sp}$	$\sigma_{Son}$	$\delta_{\sigma_S}$	$\lambda = \sigma_{Sp} / \sigma_{Son}$
28	823,91	749,0	10,0	1,1
38	837,83	797,93	4,76	1,05
48	851,72	818,96	3,85	1,04
58	863,52	890,23	-3,1	0,97
68	874,5	892,35	-2,04	0,98
78	885,5	894,44	-1,01	0,99
88	896,0	914,3	-2,04	0,98
98	918,93	988,1	-7,53	0,93
Довірчий інтервал $0,9706 < \lambda < 1,0414$				Середнє $\bar{\lambda} = 1,006$

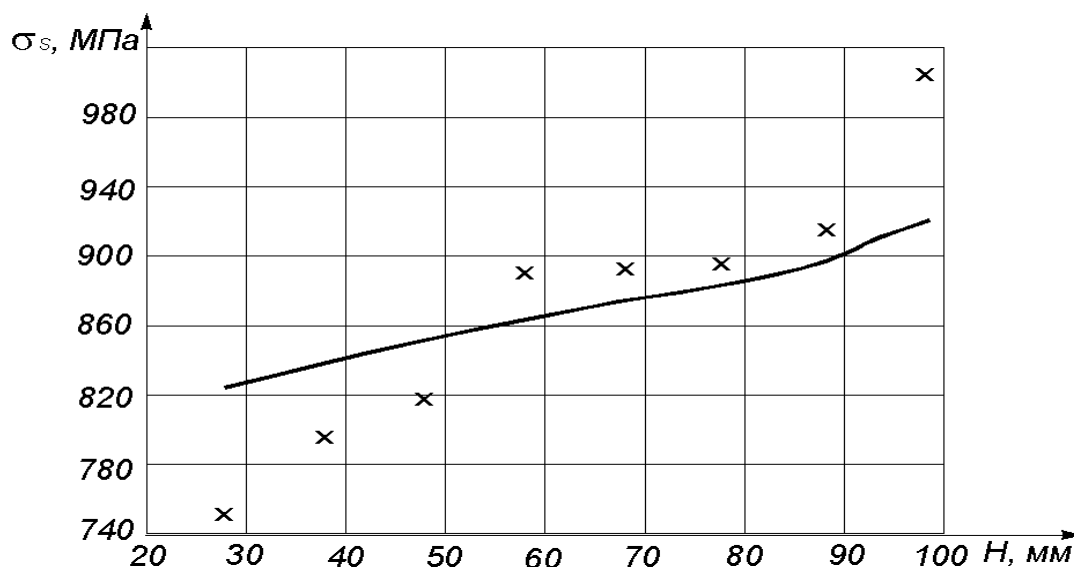


Рисунок 4.5 – Розрахункові і дослідні значення напруги плинності металу стінки напівфабрикату після комбінованого витягування з плоскої заготовки (сталь 35;  $d = 128$  мм;  $D_3 = 235$  мм;  $S_0 = 8$  мм;  $S_1 = 5$  мм;  $r_M = 32$  мм;  $r_n = 20$  мм)

Середні вибіркові значення відношень розрахункових і експериментальних даних розглянутих параметрів процесу витягування, а також довірчі інтервали цих відношень для довірчої ймовірності 0,95, і абсолютне і відносне відхилення розрахунку від досліду, які є критеріями адекватності розрахункових значень параметрів, представлені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Статистичні оцінки адекватності розрахункових значень параметрів витягування

Параметр	$\bar{\lambda}$	Довірчий інтервал	Похибка	
			абсолютна	відносна
$P$	1,034	$0,98 < \lambda_P < 1,09$	0,0377	$\pm 3,7 \%$
$\varepsilon_z$	1,02	$0,98 < \lambda_{\varepsilon_z} < 1,06$	0,0377	$\pm 3,7 \%$
$\varepsilon_\rho$	0,98	$0,95 < \lambda_{\varepsilon_\rho} < 1,03$	0,0388	$\pm 3,8 \%$
$\varepsilon_\theta$	0,97	$0,92 < \lambda_{\varepsilon_\theta} < 1,0$	0,037	$\pm 3,85 \%$
$\varepsilon_i$	0,98	$0,95 < \lambda_{\varepsilon_i} < 1,0$	0,0263	$\pm 2,7 \%$
$S$	1,02	$0,99 < \lambda_S < 1,06$	0,036	$\pm 3,53 \%$
$\sigma_S$	1,006	$0,97 < \lambda_{\sigma_S} < 1,04$	0,0354	$\pm 3,52 \%$

Результати виконаних досліджень були використані при розробці металозберігаючої технології виготовлення циліндра приводу засувки клинної з висувним шпинделем УФ-13005-050-А.

На виробництві зазначені циліндри виготовляються за серійною технологією та мають збірну конструкцію, що складається з трубної заготовки і штампованої з листа порожнистої сферичної донної частини, які з'єднуються зварюванням. Внутрішня поверхня трубної заготовки піддається механічній обробці.

За новою технологією циліндр отримували суцільноштампованим з листової заготовки товщиною 8 мм комбінованим витягуванням. Матеріал штампованого циліндра, як і зварного - сталь 35, гарячокатаний лист. Кресленик штампованої заготовки наведено на рис. 4.6. Проектування технології виконувалося відповідно до викладених вище рекомендацій;

обчислення параметрів НДС виконувалися з використанням розробленої технології.

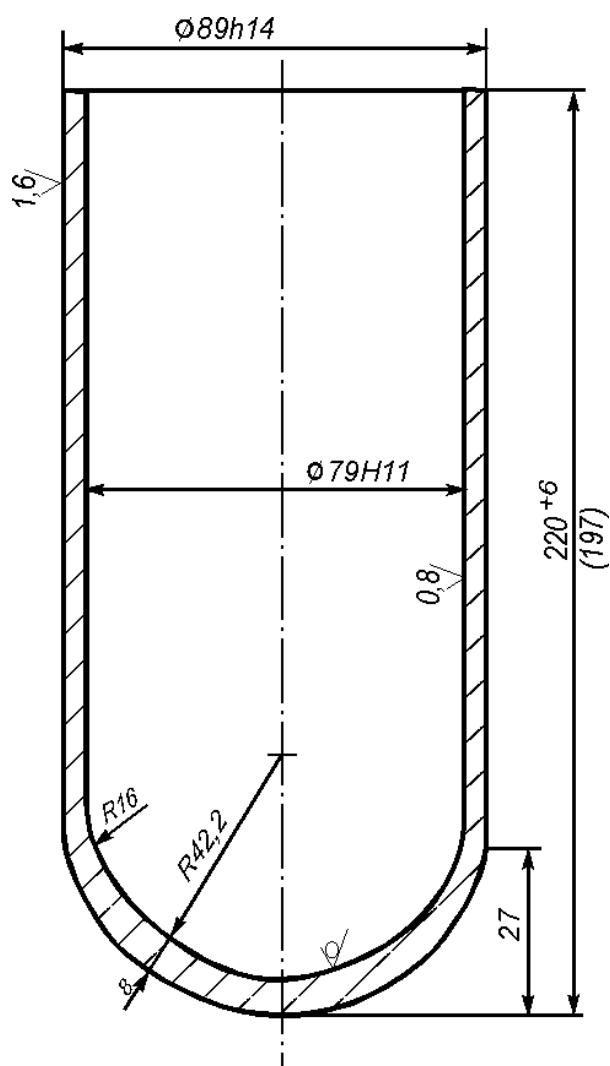


Рисунок 4.6 – Штампована заготовка циліндра приводу засувки

В результаті математичного моделювання різних варіантів технології з розрахунком параметрів НДС металу заготовки та визначенням показника завантаження операції з коефіцієнтом запасу, рівним 1,2, був обраний варіант технологічного процесу, що включає дві операції комбінованого витягування з заготовки діаметром 235 мм (рис. 4.7). Перша операція витягування з плоскої заготовки передбачає отримання напівфабрикату у вигляді порожнього циліндра з внутрішнім діаметром 128 мм, висотою 109 мм і товщиною стінки 5 мм; коефіцієнти деформації  $m_d = 0,578$ ;  $m_s = 0,625$ . Після першої операції заготовка піддається відпалу.

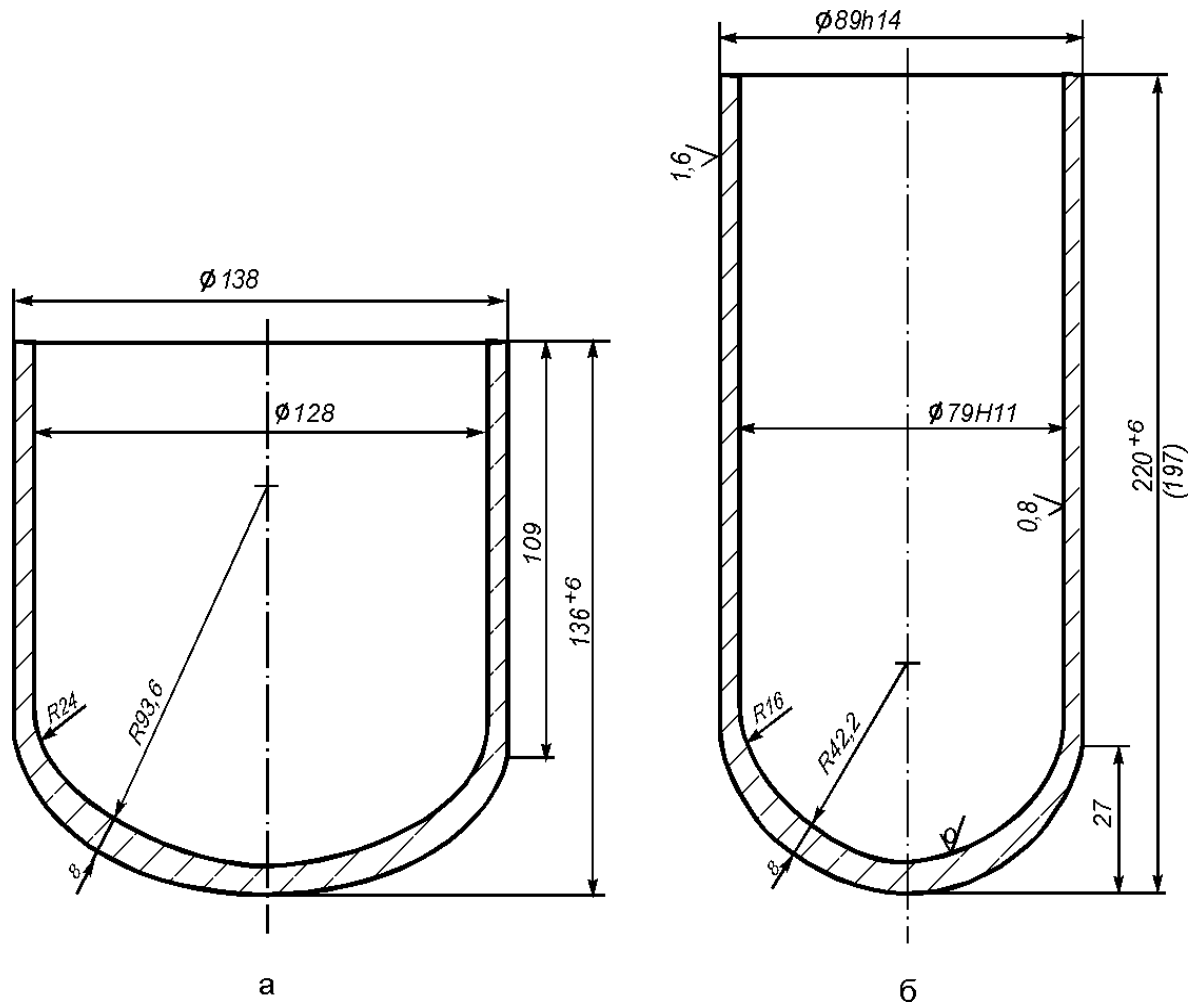


Рисунок 4.7 – Переходи технологічного процесу штампування заготовок циліндра приводу засувки: а - напівфабрикат після першої операції комбінованого витягування; б - напівфабрикат після другої операції комбінованого витягування

На другій операції витягування з порожнистої заготовки комбінованим витягуванням деформується донна частина циліндричного напівфабрикату в штампі з зазором між пуансоном і матрицею, рівним товщині стінки циліндра після першої операції. При цьому стінка циліндричного напівфабрикату піддається незначній деформації по товщині (калібрується), зменшуючи останню на величину невеликого потовщення, отриманого в результаті зменшення діаметра порожнистої частини напівфабрикату. Коефіцієнти деформації на другій операції:  $m_d = 0,631$ ;  $m_s = 0,625$ .

Зазначені деформації зменшення діаметра і товщини заготовки визначають максимальні значення показника завантаження операції з урахуванням 20% -

ного запасу, відповідно для першої операції  $K_{Z_{max}} = 0,917$ ; для другої -  $K_{Z_{max}} = 0,87$ .

Штапування здійснювали на пресі ПД-476 в штампі без притиску. Радіуси заокруглень кромek матриці і пуансона приймалися: для першої операції  $r_m = 32$  мм,  $r_n = 20$  мм; для другої -  $r_m = 24$  мм,  $r_n = 16$  мм. В якості мастила використовували омилене цинко-фосфатне покриття.

З штапованої заготовки (рис. 4.8), отриманої за новою технологією виготовлений і випробуваний дослідний зразок циліндра приводу засувки. Випробування показали відповідність дослідного зразка циліндра вимогам конструкції засувки клинової.



Рисунок 4.8 – Штапована заготовка циліндра приводу засувки

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ**

Комбіноване витягування належить до формозмінюючих операцій холодного листового штампування.

Холодне штампування - це один з методів обробки металів тиском, при якому метал деформується пластично в холодному стані. Листове штампування застосовується для виготовлення деталей з листового матеріалу. Холодне штампування дозволяє значно скоротити витрати металу, так як метал не відділяється в стружку, зменшити трудомісткість виготовлення виробів і підвищити продуктивність праці. Одночасно холодна обробка тиском забезпечує зміцнення оброблюваного матеріалу, що дозволяє робити деталі більш легкими, менш металомісткими і більш зносостійкими. Листове холодне штампування здійснюється головним чином на механічних і гідравлічних пресах. З механічних пресів найбільше застосування знаходять кривошипні.

Все обладнання науково-дослідної лабораторії, в якій встановлено кривошипний прес повинно відповідати вимогам стандартів з безпеки на окремі групи виробничого обладнання. Зокрема преси повинні бути сконструйовані, виготовлені і налагоджені таким чином, щоб в разі можливої передбаченої відмови в роботі якого-небудь одного елемента - електричного, електронного, механічного, пневматичного або гідравлічного - не були порушені функції забезпечення безпеки або, в разі їх порушення, преси зупинялися [36].

Якщо конструкцією преса не можуть бути передбачені засоби захисту для забезпечення безпеки виконання робіт, профілактичного і поточного ремонту, переналагодження, то в експлуатаційній документації повинні бути вказані безпечні прийоми виконання цих робіт.

Кінематика преса заснована на передачі зусилля за допомогою повзуна, що здійснює зворотно-поступальний рух, що отримується в свою чергу від електроприводу за допомогою кривошипного, ексцентрикового, фрикційного або гвинтового механізму.

Для забезпечення безпеки в конструкції преса необхідно передбачити наступні запобіжні пристрої: муфта-гальмо фрикційного типу; врівноважувач,

що виключає опускання повзуна під дією власної маси в разі обриву шатуна; огорожу міжштамповочного простору; виносні пульти управління; дворучне включення, що виключає перекриття кнопок механічним способом; огорожу, що не допускає випадкового натискання на педаль.

Міжштамповочний простір повинен мати місцеве освітлення з освітленістю не менше 50 лк [37].

Щоб уникнути травмування під час установки штампа необхідно відключити електропривід, вивісити на пусковому пристрої забороняючий плакат «Не включати - працюють люди» і переконатися в повній зупинці обертання маховика. Регулювати хід повзуна слід тільки в режимі «налагодження», користуючись кнопкою «налагодження», яка не має блокування контактів.

Необхідно пам'ятати, що неправильна установка штампа, неправильне регулювання ходу повзуна можуть привести до поломки штампа і травмування робітників. Тому вирубні штампи слід встановлювати в закритому положенні, а калібрувальні і штампи для гнуття - тільки з вкладеною в штамп заготовкою або деталлю.

Забезпечення безпеки залежить від конструкції штампів. При конструюванні штампа необхідно забезпечити неможливість доступу рук в зоні штампування між матрицею і пуансоном. У разі неможливості виконання цієї вимоги слід небезпечні зони захищати. У штампах з направляючими колонками необхідно виключити випадки сходу направляючих втулок при підйомі повзуна щоб уникнути травмування робочого через поломки колонки.

Кріплення матриць і пуансонів має бути надійним, що виключає їх зрив.

Найбільш небезпечною є операція ручного укладання заготовок або листа під пуансон і видалення готової деталі з матриці, оскільки руки робочого періодично знаходяться в зоні дії інструменту - штампа.

Поряд з автоматизацією і механізацією процесу штампування необхідно здійснювати і інші заходи безпеки, а саме:

- механізація подачі заготовок у штамп і видалення готових деталей з штампувального простору;



- розробка технологічних процесів із застосуванням безпечних конструкцій штампів;
- установка захисних пристосувань на пресах.

Застосування висувних штампів дозволяє робити укладання заготовки на матриці штампа поза зоною дії робочого інструмента. Однак конфігурація багатьох деталей не дозволяє застосовувати конструкції висувних і закритих штампів, і у більшості пресів штампи відкриті. На відкритих штампах для установки заготовки і поправки її на матриці для знімання відштампованих деталей застосовуються спеціальні пінцети.

Оскільки робітники не завжди користуються пінцетами, то для забезпечення безпеки на штампах відкритого типу застосовують додаткові заходи, як, наприклад, установка режиму роботи преса «одиначний хід з блокуванням рук». При цьому режимі роботи обидві руки робочого повинні бути зайняті під час робочого ходу повзуна. Розташування кнопок управління робиться таким, щоб виключалося натискання однією рукою обох кнопок. Застосування дворучного управління в повному обсязі виключає можливість травмування рук штампувальників в разі раптового ходу повзуна преса з різних причин несправності, більш ефективним засобом захисту рук є застосування нерухомих або рухомих огорожувальних пристроїв.

Нерухоме огороження постійно забезпечує закритим штамповий простір преса протягом усього робочого циклу повзуна. Для того щоб грати не заважала робітникові, його встановлюють нижче площини роз'єму штампа. При опусканні повзуна захисна решітка піднімається вгору на відстань не менше ходу повзуна. Якщо при опусканні повзуна руки працюючого знаходяться в небезпечній зоні, то рухома решітка відводить їх вгору, тим самим виключаючи небезпеку травмування.

Небезпека порізів рук виникає при ручному перенесенні листових матеріалів і заготовок гострими крайками сталевих листів і при наявності задирок, які утворюються при поганому заточенні штампів.

## 5.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету [36 – 39].

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках [38].

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також [39]:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути [38]:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;
- частки металу, що відлітають;

- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі [39]:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю - покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

## **5.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи**

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння [36 – 39].

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки [39]:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;
- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;
- наявність і справність блокувальних і запобіжних пристроїв, зблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Виключено". Повторне включення преса має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення. Повернення у вихідне положення органів аварійного відключення не повинно викликати повторного включення будь-якої частини преса.

Робота на пресах повинна проводитися після перевірки:

- справності роботи приладів системи управління, наявності та рівня мастила в резервуарі;
- відсутність течії масла;

- дії аварійно-попереджувальної сигналізації на сигнальному табло (червона лампочка - небезпеки);
- справності роботи фотозахисту;
- наявності тиску і відповідності його зусилля.

### **5.3 Вимоги охорони праці під час роботи**

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути [38, 39]:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захаращувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220V електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захарашували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

#### **5.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи**

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займисті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

#### **5.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях**

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій [37].

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі [37, 38]:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.



## ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи показано, що:

1) найбільш ефективним процесом виготовлення глибоких порожнистих циліндрів з листових матеріалів є комбіноване витягування, яке представляє собою одночасну зміну діаметра заготовки і її товщини, і дозволяє досягати високих ступенів деформації в порівнянні з витягуванням без потоншення і витягуванням з потоншенням, виготовляти вироби з підвищеною точністю діаметральних розмірів і більш зміцненою стінкою, що призводить до значної економії енергетичних і трудових ресурсів;

2) ефективним шляхом пошуку раціональних режимів деформації операцій нестационарного процесу комбінованого витягування є створення методики багатоваріантного комп'ютерного проектування, в основу якого покладено поетапне і поелементне моделювання напружено-деформованого стану металу, що враховує технологічні та експлуатаційні особливості штампованих деталей, а також вплив різних чинників, що визначають різноманіття можливих варіантів технології;

3) отримано аналітичний розв'язок для напружено-деформованого стану металу при комбінованому витягуванні порожнистих циліндрів з листового матеріалу для першої і наступних операцій витягування з урахуванням зміни товщини і зміцнення металу в елементах заготовки на етапах деформування;

4) на основі отриманих теоретичних рішень для НДС металу заготовки розроблений алгоритм чисельного математичного моделювання процесу комбінованого витягування, який передбачає обчислення напруг, деформацій в осередку деформації, напруги плинності металу в елементах заготовки, деформуючого зусилля і встановлення можливості руйнування на етапах витягування;

5) чисельна реалізація отриманих математичних моделей дозволила досліджувати можливі граничні стани процесів комбінованого витягування. В результаті обчислювальних експериментів показано, що максимум показника завантаження операції і відповідно руйнування заготовки може мати місце в

будь-який момент формозміни, починаючи з моменту початку формування осередку деформації потоншення і закінчуючи четвертою стадією при потоншуванні крайової частини заготовки;

6) зіставлення результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень зусиль та деформацій і механічних властивостей виробів підтвердило достовірність отриманих математичних моделей, що свідчить про можливість їх використання для вирішення завдань проектування технологічних процесів і в якості бази знань в САПР технологій штампування порожнистих циліндрів з листових заготовок;

7) результати роботи у вигляді методик і програмних засобів використані при проектуванні дослідного технологічного процесу штампування циліндра приводу засувки УФ-13005-050-А. Застосування нової технології забезпечує підвищення техніко-економічних показників при виготовленні циліндрів: зниження витрат на матеріали до 15% і зменшення трудомісткості виготовлення на 20%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. - 520 с.
2. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1973. - 176 с.
3. Технологія холодного штампування. Електронний посібник: для студентів напряму підготовки – 6.050502 «Інженерна механіка», спеціальності – Обладнання для обробки металів тиском. / Ю.П.Фещук. – Луцьк: ЛНТУ, 2010. Режим доступу: [http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/tf/m\\_ta\\_pfkkm/2010/10-140/files/context\\_frames\\_0.html](http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/tf/m_ta_pfkkm/2010/10-140/files/context_frames_0.html).
4. Боков В. М. Технологія холодного штампування. Курсове проектування. Листове штампування: навч. посіб. - Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2010. - 249 с. - ISBN 978-966-189-057-1.
5. Технологія холодного штампування та конструювання штампів [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напряму підготовки 6.050502 «Інженерна механіка» / уклад. М. В. Орлюк, С. М. Добровлянський, П. С. Вишневський, С. Ф. Калантир. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/470>.
6. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа, изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.
7. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др.; Под ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1993.
8. Gelin J.C., Doriel I.L. // Computer modeling of Sheet metal forming by the finite element method. – GIRLAnn., 1989. - № 1. – P. 271 – 274.
9. Reobandt J.M., Batoz J.L. Shell finite elements for deep drawing problems: computational aspects and results // IUTAM Symp.: Finite Inelast Deformat – Hanover. – 1991, - P. 96 – 97.
10. Вдовин С.И. Методы расчёта и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок. – М.: Машиностроение, 1988. –

160 с.

11. Жарков В. А. Математическое моделирование процессов вытяжки осесимметричных деталей // Кузнечно – штамповочное производство. – 1999. - № 7. - С. 8 – 14.

12. Аль-Хурани Мохаммад Камал Мохаммад Совершенствование проектирования технологии листовой штамповки на основе моделирования операций формоизменения осесимметричных деталей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.05/ Донбас. Гос. Машиностр. акад. – Краматорск, 2001. – 19 с.

13. Вытяжка с утонением стенки / И.П. Ренне, В.Н. Рогожин, В.П. Кузнецов и др. – Тула: Изд-во Тульск. политехн. ин-та, 1970. – 141 с.

14. Дорошко В. И., Бирюков В. П. Напряжения, усилие и предельная деформация при вытяжке с утонением стенки // Передовой производственный опыт: Научно-произв. Сб. – М.: ЦНИИНТИ, - 1982. - № 2. - С. 26 – 31.

15. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. 4-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

16. Сегал В.М. Технологические задачи теории пластичности (методы исследования). – Минск: Наука и техника, 1997. – 256 с.

17. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

18. Овчинников А. Г., Жарков В. А. Исследование напряжённо-деформированного состояния фланца заготовки при осесимметричной вытяжке листовых материалов // Известия вузов. Машиностроение. – 1982. - №1. - С. 135 – 139.

19. Евстратов В.А., Торяник В.В., Левченко В.Н. Анализ процесса вытяжки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. - № 4. – С. 2 – 5.

20. Теоретические и экспериментальные исследования первой операции комбинированной вытяжки цилиндрических изделий из анизотропного упрочняющегося материала / Ю.Г. Нечепуренко, А.Ю. Мишкин, С.С. Яковлев, Н.Н. Проскуракова // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки давлением и резанием. – Тула: ТулГУ, 1999. – Вып. 2. – С. 209 – 219.

21. Левченко В.Н. Совершенствование технологии листовой штамповки осесимметричных деталей на базе разработанных математических моделей процессов вытяжки: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.05 / Донбас. Гос. машиностр. акад. – Краматорск, 2001. – 16 с.

22. Жарков В. А. Методика расчёта первого перехода вытяжки цилиндрических деталей// Вестник машиностроения. – 1988. - № 8. - С 57 – 58.

23. Жарков В. А. Математическое моделирование процессов вытяжки листовых материалов // Кузнечно – штамповочное производство. – 1990. - № 4. - С. 13 – 17.

24. Маслов В.Е., Шаповал В.Н. Экспериментальное исследование процессов обработки металлов давлением – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 232 с.

25. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твёрдости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

26. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

27. Рафалес-Ламарка Э., Николаев В.Г. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов. – Киев: Наукова думка. – 1971. – 119 с.

28. Калюжний О. В. Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формоутворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів / О.В. Калюжний // Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків, 2013. – № 42'2013. – С. 126–131.

29. Попов Е.А. Распределение деформаций при вытяжке листового материала // Машины и технология обработки металлов давлением: МВТУ. – Машгиз, 1955. - № 40. – С. 37 – 58.

30. Соколовский В.В. Теория пластичности. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.

31. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Справ. / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский; НАН Украины. Ин-т пробл. прочности им.

Г. С. Писаренко. — 3-е изд., перераб. и доп.. — К.: Издат. дом «Ин Юре», 2003. — 539 с. — [ISBN 966-8088-36-0](https://doi.org/10.1007/978-96-8088-36-0)

32. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 430 с.

33. Задачин В. М. Чисельні методи: навчальний посібник / В.М.Задачин, І.Г. Конюшенко. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.

34. Vertram A. . Elasticity and Plasticity of Large Deformations. — Springer, 2012. — 345 с.

35. Патент 124575 UA, МПК В21D 22/20 (2017.01) Спосіб комбінованого витягування глибоких порожнистих циліндрів з листових заготовок / Сергієнко О.В., Ситнік Б.В.; заявник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. - № u 2017 11837; заявл. . 04.12.2017; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7/2018.

36. Основи охорони праці: підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. – Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.

37. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халі мовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.

38. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навч. закладів / За ред. М.П. Гандзюка – К.: Каравела, 2004. – 408 с.

39. Голінько В.І. Г 60 Основи охорони праці: підручник / В.І. Голінько; М-во освіти і науки України; Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.

## ДОДАТКИ