

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні

( назва факультету )

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри )

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
(другий (магістерський) рівень)

на тему Вдосконалення технології виготовлення середньгабаритних  
деталей методами холодного штампування в умовах серійного  
виробництва

Виконав: студент  2  курсу, групи  8.1362-омт

\_\_\_\_\_ (ПБ) \_\_\_\_\_ (підпис)

спеціальності

136 Металургія   
(шифр і назва)

спеціалізація

\_\_\_\_\_ (шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском   
(шифр і назва)

Керівник  Явтушенко А.В.  \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент  Белоконь Ю.О.  \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**  
**ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий магістерський рівень  
другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 136 металургія  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма обробка металів тиском  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 07 ” 05 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ**

Помазан Андрій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вдосконалення технології виготовлення середньогабаритних деталей методами холодного штампування в умовах серійного виробництва

керівник роботи (проекту) Явтушенко Анна Володимирівна к.т.н, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “09” 10 2023 року № 1581-с

2. Строк подання студентом роботи (проекту) 07.05.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекту) Вдосконалення технології виготовлення середньогабаритних деталей методами холодного штампування в умовах серійного виробництва

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Загальна частина. Технологічна частина, Дослідницька частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
*Креслення, презентаційний матеріал 12 слайдах (на 12 сторінках)*

---



---



---

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Явтушенко А.В., доцент</i>	
<i>Розділ 2</i>	<i>Явтушенко А.В., доцент</i>	
<i>Розділ 3</i>	<i>Явтушенко А.В., доцент</i>	
<i>Розділ 4</i>	<i>Явтушенко А.В., доцент</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 07.05.2023

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.05 - 12.06.2023</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>13 - 16.06.2021</i>	
3	<i>Розділ 1</i>	<i>17.06 - 11.08.2023</i>	
4	<i>Розділ 2</i>	<i>12.08 - 12.09.2023</i>	
4	<i>Розділ 3</i>	<i>13.09 - 30.10.2023</i>	
5	<i>Розділ 4</i>	<i>1.11 - 25.11.2023</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>30.11.2023</i>	

Студент \_\_\_\_\_ А.І. Помазан  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ А.В. Явтушенко  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

*ПЗ: 96 с. 39 рис., 10 табл., 28 джерел.*

Об'єкт дослідження – електрогідроімпульсна (ЕГІ) витяжка-формовка тонколистових і особливо тонколистових металів.

Мета роботи – обґрунтування вибору прийнятої для дослідження ЕГІ технології, як найефективнішої для виготовлення тонколистових деталей, проаналізовано параметри імпульсного тиску в розрядній камері під час ЕГІ витяжки-формування.

Метод розрахунків – розрахунок комп'ютерних моделей процесів витяжки-формування тонколистових деталей, а також стандартні методики розрахунків у штампувальному виробництві під час виконання витяжних і формувальних операцій.

Отримані результати і їх новизна – було виконано уточнення аналітичних залежностей для розрахунку технології електрогідроімпульсної витяжки-формовки.

У розділі охорони праці і оцінки техногенної обстановки приведено опис шкідливі чинники виробництва і вказані шляхи поліпшення умов праці.

Рекомендації по впровадженню – результати магістерської роботи рекомендується застосовувати на будь-якому автомобільному чи машинобудівному заводі в листоштампувальному цеху.

Ключові слова: ХОЛОДНЕ ШТАМПУВАННЯ, ПЛАСТИЧНІСТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, СТРИЧКА, ПРИТИСК, ШТАМП, ЗАКРИТА ВИСОТА, ПУАНСОН, МАТРИЦЯ, ШТАМПУЄМОСТЬ, ОПЕРАЦІЯ, РОЗКРІЙ, ЗУСИЛЛЯ, ЕЛЕКТРО-ГІДРО ШТАМПУВАННЯ.

## ABSTRACT

**SOFTWARE:** 93pp. 39 figs. 10 tables, 28 sources.

The object of study is an electrohydroimpulse (EHI) hood-former of thin-sheet and especially thin-sheet metals.

Purpose - to substantiate the choice of the EHI technology as the most effective for the manufacture of thin-sheet parts, analyzing the parameters of pulse pressure in the discharge chamber during EHI drawing-forming.

Methods of calculations - calculation of computer models of the processes of drawing and forming thin-sheet parts, as well as standard calculation methods in stamping production during drawing and forming operations.

The results obtained and their novelty - the analytical dependencies for the calculation of electrohydro-pulse drawing and forming technology were refined.

The section on labor protection and assessment of the technological environment describes the harmful factors of production and indicates ways to improve working conditions.

Recommendations for implementation - the results of the master's work are recommended to be used at any automobile or machine-building plant in the sheet metal forming shop.

**Keywords:** COLD STAMPING, PLASTICITY, DEFORMATION, TAPE, CLAMPING, STAMP, CLOSED HEIGHT, PUNCH, DIE, STAMPABILITY, OPERATION, CUTTING, FORCE, ELECTRO-HYDRAULIC STAMPING.

## ЗМІСТ

Реферат	4
1. Загальна частина	8
1.1. Загальні відомості про холодне штампування	8
1.2. Існуючі технології виготовлення деталей із тонколистових металів	9
1.3. Класифікація методів виготовлення деталі	9
1.4. Витягування в жорстких штампах	11
1.5. Методи точкового деформування листових металів	12
1.6. Витяжка із застосуванням додаткового тиску рідини	14
1.7. Квазістатична витяжка еластичними середовищами	16
1.8. Ударно-імпульсна витяжка еластичними середовищами	18
1.9. Витяжка із застосуванням електромагнітного поля	19
1.10. Витяжка із застосуванням енергії електричного розряду	23
1.11. Порівняльна класифікація технологічних можливостей методів виготовлення деталей із тонколистових металів	25
1.12. Обґрунтування вибору прийнятої для дослідження технології	26
1.13. Відомі технологічні схеми електрогідроімпульсної витяжки-формування	27
1.14. Типові дефекти під час електрогідроімпульсного витягування	30
1.15. Обґрунтування вибору прийнятої для дослідження технології	33
2. Технологічна частина	34
2.1. Аналіз технологічності деталі	34
2.2. Розробка креслення штамповки	35
2.2.1. Розробка маршрутної технології (вибір переходів штампування)	37
2.2.2. Визначення форми і розмірів заготовки	37
2.2.3. Розкрій вихідного матеріалу	39
2.2.4. Аналіз напружено-деформованого стану	44
2.2.5. Розрахунок технологічних операцій	45
2.2.6. Вибір пресового обладнання	53
2.2.7. Розрахунок трудомісткості виготовлення деталі	54
3. Дослідницька частина	62
3.1. Дослідження процесу тонколистового витягування-формування в закрити матрицю	57

3.2. Вплив швидкості деформування на процес тонколмстового витягування-формування в закриту матрицю	57
3.3. Вплив форми і тривалості імпульсу тиску на процес витяжки-формування в закриту матрицю	62
3.4. Проектування інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування	69
3.5. Ефективність ЕГІ витяжки-формування	74
3.6. Технологічні можливості ЕГІ витяжки-формування	75
3.7. Висновки	78
4. Охорона праці та техногенна безпека	79
4.1. Джерела небезпеки	79
4.1.1. Джерела механічної небезпеки	79
4.1.2. Джерела електричної небезпеки	80
4.2. Заходи, проведені для повної або часткової ліквідації небезпечних виробничих факторів	80
4.2.1. Запобігання електричній небезпеці	81
4.2.2. Шум на робочому місці	82
4.2.3. Випромінювання на робочому місці	83
4.2.4. Пожежна безпека	84
4.3. Організаційні заходи	86
4.4. Техніка безпеки під час роботи в ковальсько-штампувальних цехах	87
Загальні висновки	89
Перелік посилань	91
Додатки	94

## **1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА**

### **1.1. Загальні відомості про холодне штампування**

Холодне штампування вважається найбільш передовою технологією обробки металів тиском. Уміле застосування холодного штампування дає змогу отримувати вироби різних форм і розмірів. Що важливо, вироби, виготовлені за цією технологією, вирізняються точністю своїх геометричних параметрів і високою якістю формованої поверхні, тому не потребують додаткового доопрацювання. Процес холодного штампування легко піддається автоматизації, що дає змогу виготовляти за його допомогою вироби з високою продуктивністю. Штампування – це процес, під час якого заготовка з металу під впливом тиску піддається пластичній деформації. У результаті такого впливу, для здійснення якого використовується спеціальне обладнання, із заготовки формується готовий виріб необхідних розмірів і форми. Деформування металевої заготовки може виконуватися з її попереднім нагріванням, тоді такий процес називається гарячим штампуванням. Якщо ж ніякого попереднього термічного впливу на заготовку не чиниться, тоді виконується холодне штампування металу. При виконанні холодного штампування використовується спеціальне технологічне оснащення. При цьому метал, з якого зроблена заготовка, піддається додатковому зміцненню. Тим часом під час виконання холодного штампування металу погіршується його пластичність. Підвищення міцності заготовки під час виконання холодного штампування призводить до збільшення крихкості металу, що є доволі негативним фактором. Щоб уникнути цього, між технологічними операціями, з яких складається штампування деталей у холодному стані, виконують термічну обробку заготовки - рекристалізаційний відпал. У готових виробах, які в процесі виробництва були піддані такій термічній обробці, оптимально поєднуються параметри міцності та пластичності.



## 1.2. Існуючі технології виготовлення деталей із тонколистових металів

Існують різні способи виготовлення осесиметричних деталей із тонколистових металів, як квазістатичних, так і імпульсних. Ефективним способом отримання таких деталей є витяжка, тобто перетворення листових заготовок на порожнисту деталь. Під час витягування заготовок із тонколистових і особливо тонколистових металів процес являє собою витягування з потоншенням матеріалу заготовки, переважно в донній частині, а тому такий процес правильніше називати витяжкою-формуванням. У цій роботі будуть розглянуті різні технології виготовлення деталей з листових і тонколистових металів, а тому, під витяжкою мається на увазі також витяжка-формування.

## 1.3. Класифікація методів виготовлення деталі

Під час оцінювання досконалості нових і раціонального використання чинних методів і процесів, зокрема і процесів штампування рідиною або традиційними методами, як об'єктивний виступає економічний показник – витрати суспільної необхідної праці на одиницю деталі.



Рисунок 1.1 – Приклади деталей з листа

формування яких може здійснюватися одним або різними методами. У штампувальних цехах для виготовлення однієї й тієї самої деталі можуть бути застосовані кілька процесів, що однаково забезпечують виконання технічних

умов. Наприклад, виготовлення деталей, показаних на рисунку 1.2, може бути здійснено такими процесами:

- 1) Витяжкою гумовою матрицею по жорсткому пуансону з притиском;
- 2) Витяжкою-формуванням гумовим або рідинним пуансоном у жорсткій матриці;
- 3) Багатоперехідним гнучким-формуванням гумою при підвищених тисках;
- 4) Формоутворенням на токарно-давильних верстатах;
- 5) Формоутворенням гумою по жорсткому пуансону з нерухомою притискною опорою;
- 6) Витяжкою в інструментальних витяжних штампах тощо. Застосування кожного з цих процесів або методів стає найвигіднішим у тому разі, якщо його використано відповідно до для цього процесу (методу) конкретних умов виробництва.

Ці умови визначаються:

- 1) Програмою (масштабом випуску);
- 2) Номенклатурою і конструктивною різноманітністю деталей, що входять до конструкції виробу;
- 3) Габаритними розмірами деталей, вузлів і агрегатів;
- 4) Ступенем точності виготовлення;
- 5) Частотою оновлюваності (поліпшення конструкції) об'єкта виробництва.

Таким чином, під час проєктування деталі "Насадок випускної труби" з урахуванням конструктивних особливостей: відносної глибини, товщини матеріалу тощо, передбачається її виготовлення одним із двох способів: витяжкою-формуванням рідинним пуансоном у жорсткій матриці або витяжкою в інструментальних витяжних штампах. У цій роботі проведено порівняльний аналіз двох процесів формування деталі "Насадок випускної труби". Однак, з урахуванням програми випуску деталі пріоритетним є електрогідравлічний метод.

## 1.4. Витягування в жорстких штампах

Листова витяжка в жорстких штампах (рисунок 1.1) є широко поширеною технологією оброблення металів тиском і являє собою процес перетворення плоскої заготовки на порожнисту деталь за рахунок пластичної деформації, супроводжуваної зсувом значного об'єму металу у висоту. Плоска заготовка 3 встановлюється на матриці 4 і фіксується притиском 2. Пуансон 1 чинить тиск на центральну частину заготовки і витягує її в матрицю, здійснюючи таким чином формозміну матеріалу.

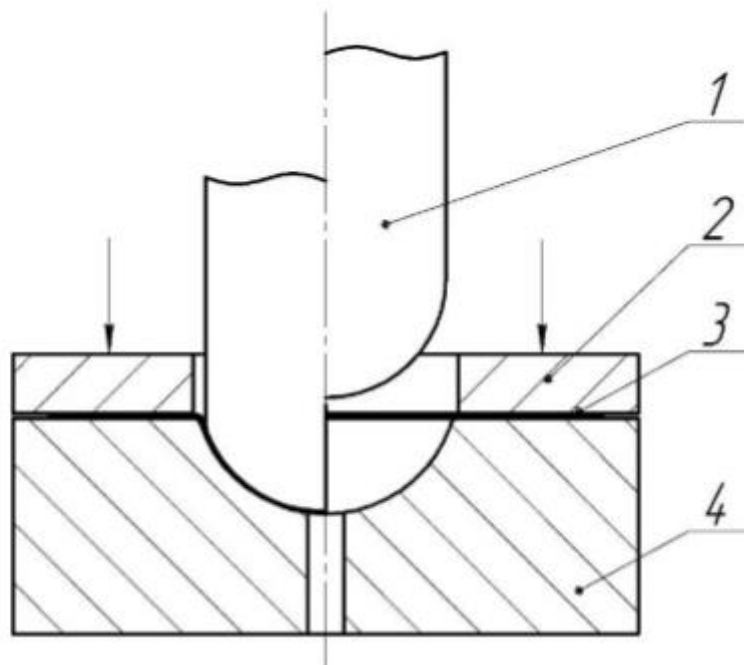


Рисунок 1.2 – Схема листового витягування в жорсткому штампі: 1 – пуансон; 2 – притискач; 3 – заготівля; 4 – матриця

Листова витяжка в жорсткому штампі дає змогу отримувати мініатюрні та великогабаритні деталі за товщини матеріалу від 0.2 - 0.4 мм до 30 - 40 мм. Ступінь витяжки під час використання цього методу зазвичай перебуває в межах  $k = D_3 d / = (1.4 \div 2.2)$  [19]. Цей метод має низку недоліків. Характерною особливістю інструментального штампа є наявність двох робочих інструментів - матриці та пуансона - і, відповідно, наявність жорсткого зв'язку між цими

елементами. Тому жорсткі штампи є не універсальними, а їх виготовлення пов'язане зі значними труднощами. Найбільшу трудомісткість викликає "підгонка" форми пуансона під форму матриці. Як правило, така операція здійснюється вручну, займає багато часу і значно збільшує вартість штампа. Кожен пакет штампа призначений для виготовлення конкретної деталі і не може бути переналагоджений для виготовлення іншої. У зв'язку з цим, метод виготовлення деталей у жорстких штампах вирізняється високою вартістю інструменту, відсутністю універсальності оснащення і трудомісткістю виробництва нового інструменту, а тривалий термін підготовки виробництва [48] робить метод неефективним у межах дрібносерійного виробництва.

Зростання ролі продукції, що виготовляється дрібними серіями, зумовлює необхідність гнучкості та пристосованості елементів виробничих систем до частоті зміни параметрів продукції [60]. Тому деталі ширшого застосування знаходять методи, які виключають один із жорстких формоутворювальних інструментів, та інтенсифіковані процеси листового штампування, що забезпечують задані технічні характеристики деталі та економічну ефективність виробництва [123]. Крім того, відносна вартість оснащення інтенсифікованих методів, як порівняти з витяжкою в жорстких штампах, значно знижується і становить 5 - 10 %.

### **1.5. Методи точкового деформування листових металів**

Методи точкового деформування ґрунтуються на процесах формозміни плоских або порожнистих заготовок з додатком точкового або лінійного зовнішнього навантаження, що переміщується за заданою траєкторією, а також характеризуються повною або частковою відсутністю традиційних формоутворювальних елементів [23]. До таких методів належать ротаційна витяжка і токарно-давильна обробка, основна відмінність яких полягає у виборі деформувального інструменту: ролик і давильник відповідно. Ротаційне витягування застосовується як економічна альтернатива листовому

штампуванню в жорстких штампах і глибокому витягуванню в дрібносерійному виробництві. На рисунку 1.2, а наведено схему ротаційної витяжки конусоподібної деталі 3 з плоскої заготовки 2. Заготівля 2 у вигляді диска фіксується оправкою 5 і притиском 4. Під час обертання оправки ролик 1, переміщаючись уздовж шаблону, деформує метал. На малюнку 1.2, б показано схему токарно-давильної обробки, де аналогічним чином давильник 1 деформує плоску заготівлю 2 у порожнисту сферичну деталь 3, зафіксовану притиском 4 на оправці 5.

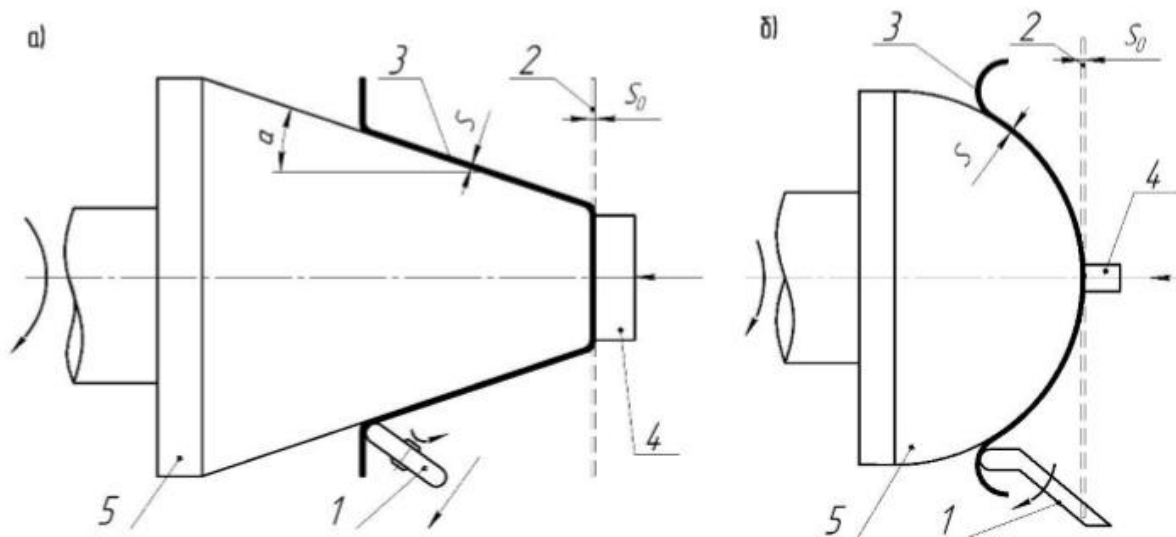


Рисунок 1.3 – Схеми одержання заготовок методами точкового деформування: а – ротаційне витягування конусоподібної деталі; б – ротаційне витягування сферичної деталі; 1 – формоутворювальний інструмент; 2 – листовая заготівля; 3 – деталь, що виготовляється; 4 – притиск; 5 – оправлення

Метод точкового деформування дає змогу отримувати вироби зі звичайних сталей і сплавів, мідних і алюмінієвих сплавів, а також важко деформованих і тугоплавких матеріалів [17]. Ротаційною витяжкою можна отримувати порожнисті вироби з листових заготовок діаметром від декількох мм до 6 м, і товщиною від 0,25 – 0,8 мм залежно від обраного матеріалу [11]. На токарно-давильних верстатах можна отримувати деталі діаметром до 4 м з товщиною стінок від 0,25 до 1,5 мм (сталі) і до 2 мм (кольорові метали [19]. Під

час деформування тонких заготовок із товщиною матеріалу менше ніж 0,4 мм можливе виникнення кільцевих складок, шийкоутворення і руйнування. Незважаючи на малу вартість інструменту і незначні енергетичні витрати, ротаційне витягування і токарно-давильне оброблення відрізняються невисокою продуктивністю [12]. При точковому деформуванні часто спостерігається похибка форми в поперечному перерізі, що впливає на діаметральні розміри. Оболонка, знята з оправки, не зберігає стабільний діаметр і має мінливу овальність [25]. Щоб уникнути порушення розмірної точності та форми оболонок, рекомендується проводити формозміну за кілька переходів, з інтервалом часу не менше ніж 20-24 години для пружного відновлення розмірів деталі [24], що значно знижує ефективність методу.

### **1.6. Витяжка із застосуванням додаткового тиску рідини**

Методи із застосуванням додаткового тиску рідини належать до категорії інтенсифікованих методів, розроблених з метою зниження собівартості виробів, вартості інструменту і розширення технологічних можливостей формозміни [12]. Головною перевагою подібних методів є відсутність одного з формотворчих інструментів, завдяки чому відпадає необхідність припасування пуансона і матриці один до одного, істотно знижується вартість інструменту, зменшується термін підготовки виробництва і розширюються можливості застосування методу в дрібносерійному виробництві. Метод із застосуванням додаткового тиску рідини або гідравлічна витяжка порожнистих деталей проводиться за допомогою тиску рідини на деформований метал [14]. Існує два різновиди процесу: гідромеханічна витяжка і гідростатична витяжка. Процес гідромеханічного витягування порожнистих деталей полягає в деформуванні їх жорстким пуансоном листових заготовок у рідинну матрицю (рисунок 1.4, а). Заготовку 3 розміщують на поверхні матриці 4 і фіксують притиском 2, після чого пуансон 1 впроваджується в заготовку. При цьому в рідині, що знаходиться в порожнині, створюється тиск, під дією якого заготовка набуває

форми пуансона [15]. Процес гідростатичної витяжки (рисунок 1.4, б) полягає в деформуванні рідинним пуансоном у жорстку матрицю. Заготівля 2 розміщується на жорсткій матриці 3, фіксується притиском 1 і піддається впливу рідини. Під дією тиску рідини заготівля пластично деформується і набуває форми матриці.

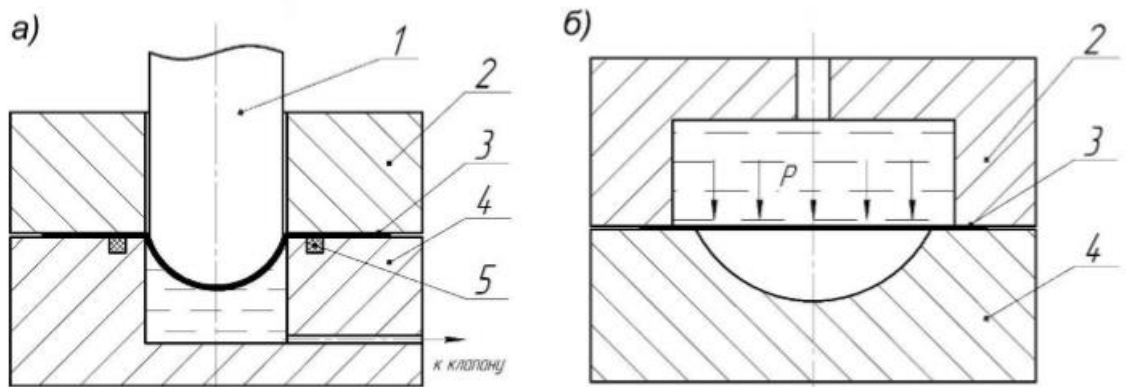


Рисунок 1.4 – Принципові схеми гідравлічного витягування: а – гідромеханічне витягування, б – гідростатичне витягування: 1 – пуансон; 2 – притиск; 3 – листова заготовка; 4 – матриця; 5 – кільцеве ущільнення

Цими методами можна отримувати конічні, сферичні, параболічні та ін. деталі зі сталей і сплавів, зокрема високоміцних матеріалів, сплавів із низькими показниками пластичності та матеріалів, схильних до захоплення з матеріалом інструменту. Отримувані деталі зазвичай середнього розміру, до 200 – 500 мм у плані та товщиною від 0,2 – 0,8 мм до 10 мм [15]. Ступінь витяжки для цього методу перебуває в межах  $k = D_3 d / = (2.2 \div 2.7)$  для гідромеханічного витягування [15] і  $k = D_3 d / = (1.5 \div 2.4)$  для гідростатичного витягування. Метод має такі недоліки. Течія матеріалу фланця заготовки нерівномірна, що призводить до вираженої різновтовщинності стінок деталі та потоншення фланця [15]. Процес гідростатичного витягування характеризується нестійкою рівновагою заготовки в процесі витягування і сповзанням її набік у разі порушення осьової симетрії, оскільки між рідким інструментом і заготівлею відсутнє тертя [27]. Гідромеханічна витяжка схильна

до сповзання заготовки меншою мірою, але характеризується значним потоншенням у куполі витяжки [24] і потребує додаткового ущільнення стику "заготовка - дзеркало штампа". Методи виготовлення деталей під дією тиску рідини знаходять обмежене застосування в промисловості. Більш поширене деформування листових заготовок під дією тиску еластичного середовища або тиску рідкого середовища, що повідомляється через еластичну мембрану.

### **1.7. Квазістатична витяжка еластичними середовищами**

Витяжку і формування еластичним середовищем проводять або штампуванням еластичною матрицею по жорсткому пуансону, або штампуванням еластичним пуансоном по жорсткій матриці [18]. Схему квазістатичного витягування в жорстку матрицю представлено на малюнку 1.4. Універсальний штамп складається з контейнера 1, усередині якого розміщується еластичний блок 2. Форма виробу визначається матрицею 4. Повзун преса створює тиск еластичного середовища на заготовку 3 і деформує її за формою матриці 4 [11]. Змінюючи шаблони в межах розмірів контейнера можна отримувати різні деталі. Квазістатичним витягуванням еластичними середовищами можна отримувати деталі з габаритами в діапазоні від 20 до 300 мм з алюмінію, сталі, титану, магнієвих та інших сплавів завтовшки від 0,02 – 0,05 мм; ступінь витяжки перебуває в межах  $k = D/d = (1,5 \div 2,2)$  залежно від форми деталі. До позитивних особливостей методу відносять високу рівномірність прикладених до заготовки деформованих тисків, а також швидкий перехід від виробництва одного виду продукції до іншого за рахунок універсальності інструменту [10]. Використання інструменту з поліуретану також оберігає поверхню металу від механічних пошкоджень [26].



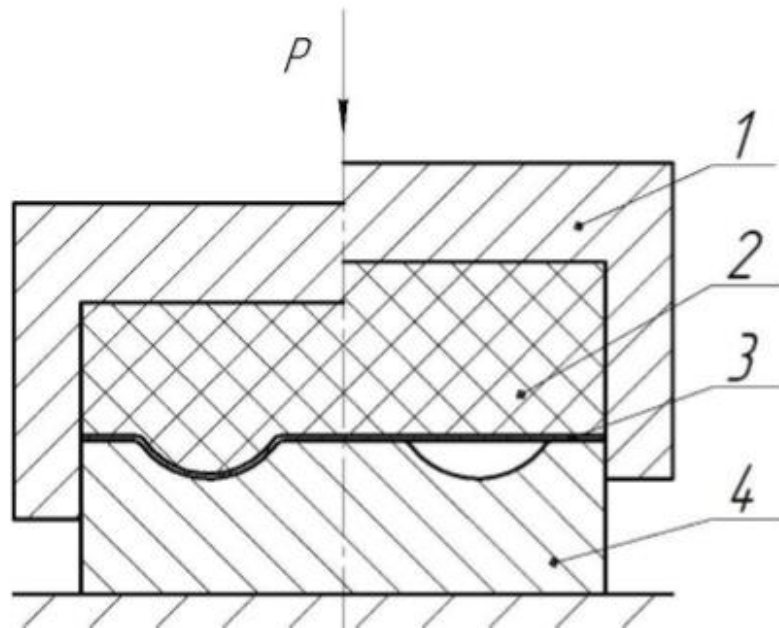


Рисунок 1.5 – Схема кватістатичної витяжки поліуретаном у жорстку матрицю: 1 - контейнер; 2 - еластичний блок (поліуретан); 3 - листова заготовка; 4 – матриця

Застосування поліуретану дає змогу скоротити вартість штампа в 5-6 разів порівняно з металевим штампом, однак інструмент з еластичного середовища є також головним обмежувачем технологічних можливостей методу. Однією з важливих характеристик еластичного середовища є твердість, яка визначає ефективність методу та можливість здійснення того чи іншого процесу [17]. Еластичне середовище обмежує тиск, який буде передано на заготовку, оскільки за перевищення граничного навантаження поліуретановий блок окрихчується, втрачає еластичність і розсипається [17]. З економічного погляду процес доволі ефективний, проте не забезпечує граничних можливостей і має низку недоліків. Нестійка по периметру течія фланця в різних ділянках через анізотропію механічних властивостей може призвести до односторонньої утяжки фланця [19]. Недоліком цього методу також є необхідність застосування великого тиску і зайва витрата роботи преса [10]. Тонколистові заготовки, одержувані з використанням еластичного середовища, вирізняються великим потоншенням стінок і вираженою

різнотовщинністю, що досягає 30-40% і може бути усунута завдяки малопродуктивній і трудомісткій обробці [17]. Крім того, під час квазістатичного витягування поліуретаном через низьку швидкість навантаження заготовки не завжди вдається досягти необхідного граничного ступеня формозміни заготовки, що є нижчим, порівняно з витягуванням у жорстких штампах.

### **1.8. Ударно-імпульсна витяжка еластичними середовищами**

Принципова відмінність ударно-імпульсного впливу від квазістатичного полягає у високих швидкостях деформації і короткостроковому впливі на заготовку. Сутність ударно-імпульсного витягування еластичними середовищами полягає в деформації заготовки імпульсом тиску, що створюється в результаті удару швидкорухомого бойка по передавальному середовищу (рідині або поліуретану), що заповнює робочу камеру обладнання. Бойок масою до декількох кг розганяється в стволі 2 до швидкостей 50-150 м/с. Під час удару об поверхню передавального середовища кінетична енергія бойка перетворюється на роботу деформування заготовки і відбувається заповнення матриці. У літературі варіації методу зустрічаються під назвами "гідроударна", "пневмоударна", "ударно-імпульсна" обробка металів тиском [16, 23]. Існує кілька різновидів ударно-імпульсної витяжки. Основні відмінності полягають у передавальному середовищі, як яке використовують поліуретан (рисунок 1.6, а), рідину (рисунок 1.6, б) або комбінацію двох середовищ (рисунок 1.6, в). Даним методом можна виготовляти деталі з різних сталей і сплавів, зокрема кольорових, габаритами до 500 - 800 мм і товщиною від 0.5 - 0.8 мм до 2.5 - 4.0 мм залежно від обладнання [16, 25]. Ступінь витяжки ударно-імпульсного формозміни перебуває в межах  $k = D/d = (1,3 \div 1,43)$ .

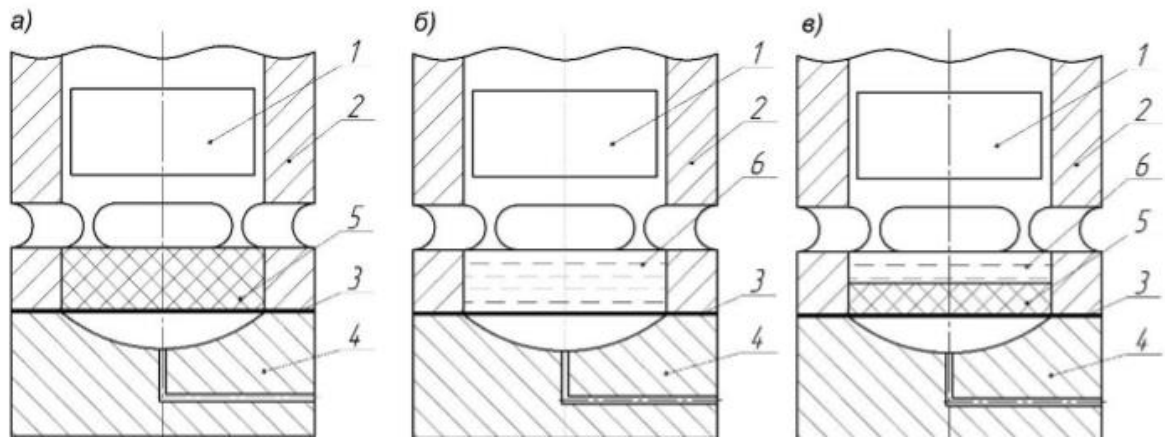


Рисунок 1.6 – Схеми ударно-імпульсної витяжки рухомими середовищами: а – поліуретаном; б – рідиною; в – комбінована: 1 – бойок; 2 – стоббур; 3 – заготовка; 4 – матриця; 5 – рідина; 6 – еластичний блок (поліуретан)

Основним недоліком методу ударно-імпульсної витяжки є низька точність дозування енергії, через що застосування цього методу є неефективним для формозміни тонколистових металів, товщина яких становить менше ніж 0,2 – 0,4 мм.

### 1.9. Витяжка із застосуванням електромагнітного поля

Витяжка з використанням електромагнітного поля належить до групи імпульсних методів оброблення металів тиском, що характеризується короткочасністю силового впливу ( $\sim 40$  мкс), високими швидкостями деформування і точністю дозування енергії (до 1%) [20]. Силовий вплив здійснюється тиском магнітного поля, створюваним індуктором [31]. Можна виділити два види процесів: магнітно-імпульсні та магнітно-еластоімпульсні методи. Магнітно-імпульсна обробка металів тиском (МІОМ) ґрунтується на перетворенні електричної енергії, запасеної в накопичувачі, у змінне магнітне поле, що виконує роботу пластичної деформації заготовки [22]. Принципова схема ланцюга електромагнітної установки показана на рисунку 1.6. Установка складається з підвищувального трансформатора ТР, випрямляча В,

конденсаторної батареї С, комутувального пристрою - розрядника Р та індуктора І. Заряд конденсаторної батареї здійснюється через трансформатор і випрямляч. Потім здійснюється розряд через розрядник на індуктор, унаслідок чого через індуктор проходить імпульсний струм, який призводить до виникнення навколо його витків потужного загасаючого електромагнітного поля. Вплив електромагнітного поля індуктора з електромагнітним полем наведених струмів спричиняє появу пандемоторних сил, що деформують заготовку.

Таким чином, електрична енергія перетворюється на механічну роботу при деформуванні заготовки [60]. Для магнітно-імпульсного деформування листових заготовок застосовують плоскі спіральні індуктори (рисунок 1.8). Методом МІОМ можна отримувати деталі площею до 0,2 м<sup>2</sup>, зі сталі, латуні, алюмінію, магнієвих та інших сплавів [17]. Рекомендується використовувати метали з високою провідністю, такі як мідь, алюміній і латунь [23]. Мінімальна товщина листа обмежується умовами просочування магнітного поля і розплавлення металу, що деформується, і становить 0,1 - 0,2 мм. Максимальна товщина обмежується міцністю індуктора [11] і варіюється від 1,2 до 5 мм. Ступінь витяжки МІОМ варіюється в діапазоні  $k = D/d = (1,16 \div 1,43)$  залежно від товщини матеріалу [14]. Застосування електромагнітного поля як джерела енергії зумовлює деякі специфічні недоліки методу та накладає суттєві обмеження. Ефективність методу МІОМ залежить від питомого опору оброблюваного матеріалу [22]. Питомий опір не має бути нижчим, ніж 15 мкОм×см [20]. Матеріали з недостатньо високою електричною провідністю (наприклад, вуглецеві та корозійностійкі сталі) деформують через передавальне середовище або "супутник" [17].

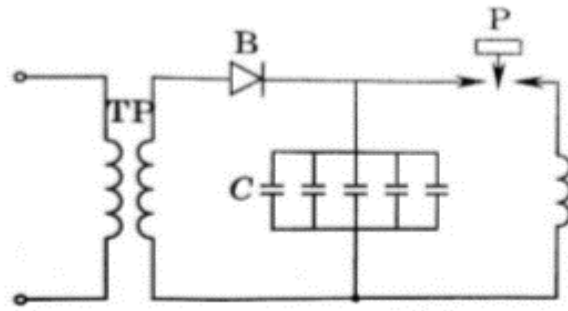


Рисунок 1.7 – Принципова схема ланцюга електромагнітної установки

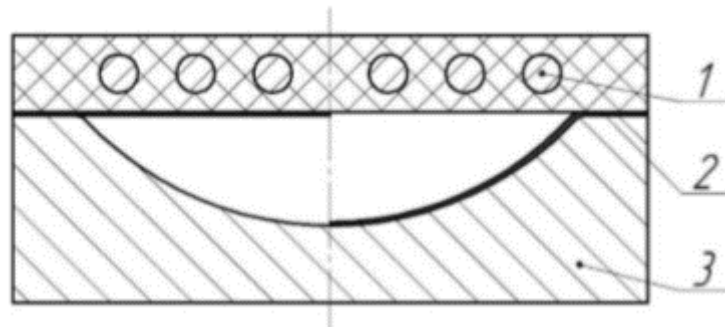


Рисунок 1.8 – Схема магнітно-імпульсної обробки листового металу: 1 – спіральний індуктор; 2 – листовий метал; 3 – матриця

Під час деформування заготовки в металеву матрицю може виникнути ефект "магнітної подушки", за якого зворотний тиск не дасть змоги заготовці прийняти точну форму матриці [22]. Стиснення магнітного поля спричиняє наведення струму на поверхні заготовки, зверненої до матриці, що спричиняє інтенсивне нагрівання поверхні заготовки і може призвести до її оплавлення [11]. Обидва ефекти суттєво впливають на вибір товщини заготовки, не даючи змоги деформувати особливо тонколистові метали. До недоліків МІОМ також відносять трудомісткість і складність виконання глибокої витяжки. Для здійснення цієї операції заготовку попередньо обробляють кількома індукторами, форма кожного з яких відповідає зміненій формі заготовки [20].

Магнітно-еластоімпульсне штампування (МЕІШ) також ґрунтується на перетворенні електромагнітної енергії в змінне поле і, по суті, є окремим випадком МІОМ із застосуванням "супутника". Принципову схему МЕІШ наведено на рисунку 1.9. Під час розряду конденсаторної батареї на плоский

індуктор 1 по спіралі індуктора протікає сильний імпульсний струм, який створює в зазорі між індуктором і рухомим елементом 2 з добре провідного матеріалу імпульсне магнітне поле. Рухомий елемент з великою швидкістю переміщується до еластичного блоку 3. Під час удару здійснюється формозміна заготовки 4 за формою матриці 5 [25].

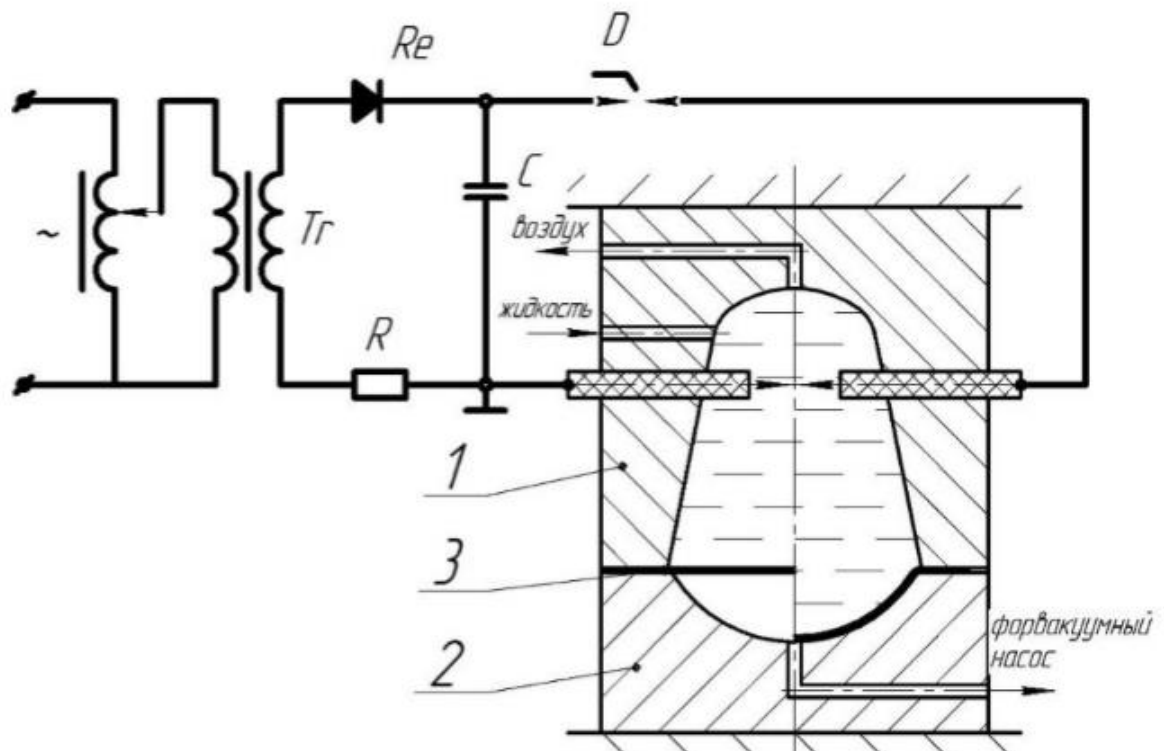


Рисунок 1.9 – Схема магнітно-еластоімпульсної обробки листового металу: 1 – плоский спіральний індуктор; 2 – рухомий елемент; 3 – еластичний блок (поліуретан); 4 – листова заготовка; 5 – матриця; 6 – контейнер

Метод МЕІШ дає змогу отримувати деталі від 100 до 200 мм у плані, з матеріалів товщиною від 0,02 – 0,05 мм до 1,0 – 1,5 мм [5, 17]. Ступінь витяжки МЕІШ, також, як і МІОМ, варіюється в діапазоні  $k = D_3 d / = (1,16 \div 1,43)$ . Використання проміжного еластичного середовища дає змогу формозмінювати матеріали як з високою, так і з низькою електропровідністю і дозволяє нівелювати ефект "магнітної подушки", проте загалом метод МЕІШ володіє тими ж недоліками, що і МІОМ. Головним недоліком методу є неможливість

отримання глибоких формовок через руйнування еластичного середовища, оскільки в процесі формоутворення заготовки, вона щоразу повинна приймати його форму [21].

### **1.10. Витяжка із застосуванням енергії електричного розряду**

Електроімпульсні технології ґрунтуються на електрогідравлічному ефекті (ЕГЕ) – комплексі фізичних явищ, пов'язаних із високовольтним розрядом у рідині та перетворенні електричної енергії в механічну [20]. Під час електрогідроімпульсного (ЕГІ) витягування одна з половин штампа замінюється передавальним середовищем і є універсальним інструментом [10]. При цьому механічний вплив на заготовку здійснюється саме передавальним середовищем і збудженими в ньому інтенсивними пружнопластичними хвилями [18]. Принципова схема ланцюга ЕГІ установки показана на рисунку 1.10. Розрядний ланцюг передбачає собою коливальний контур, утворений ємністю конденсаторної батареї, індуктивністю провідників і опором каналу розряду.

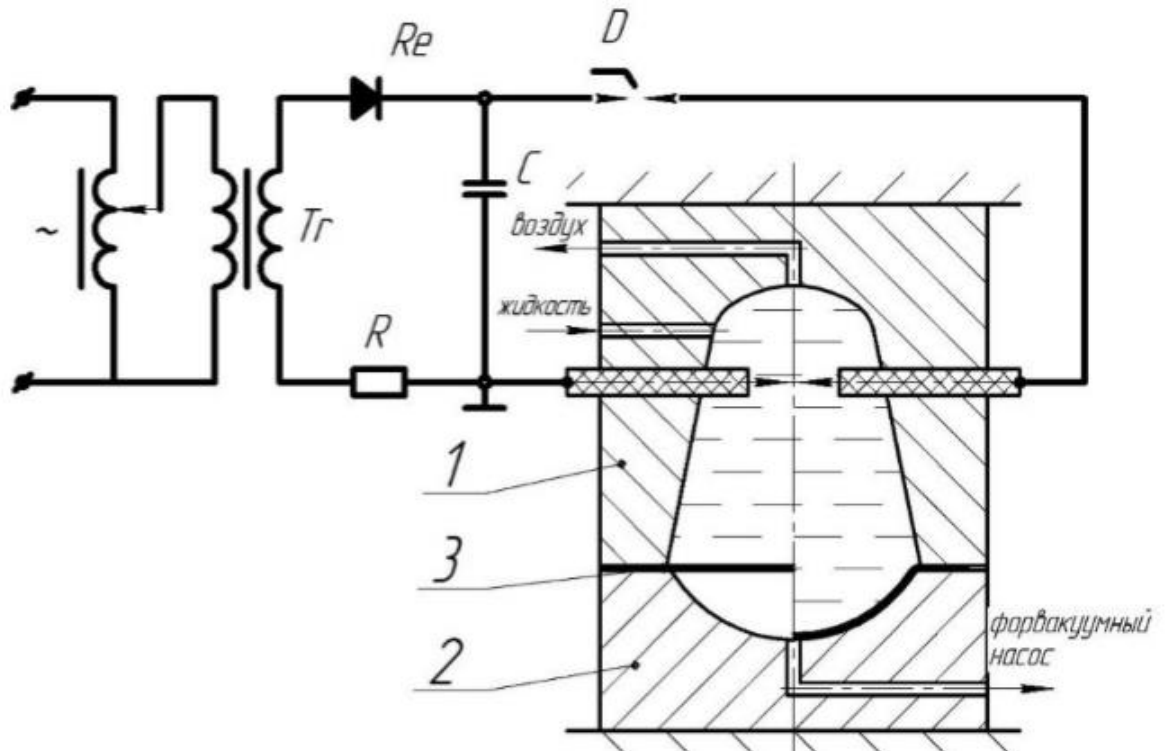


Рисунок 1.10 – Принципова схема ланцюга ЕГІ установки: D – розрядник; C – конденсаторна батарея; R – обмежувальний опір; Tr – трансформатор; Re – випрямляч

У конденсаторній батареї до заданої величини накопичується електрична енергія. При замиканні розрядного контуру напруга подається на електроди, розташовані в рідині. У міжелектродному проміжку починає текти струм, провокуючи вибухове скипання рідини та утворення каналу розряду. Утворюється низькотемпературна плазма високого тиску, яка розширюється і здійснює корисну механічну роботу. Після першого - основного гідравлічного удару плазма стискається, створюючи другий - кавітаційний удар [22]. Розряд завершується приблизно за 100 мкс, при цьому температура може підніматися до  $(20 - 40) \cdot 10^3$  К, а тиск може досягати 100 – 1000 МПа [22]. ЕГІ витяжка найефективніша за дрібносерійного та одиничного виробництва заготовок від декількох мм до 800 мм у плані з листових матеріалів товщиною від 0,15 – 0,25 мм до 3 - 6 мм. Ступінь витяжки перебуває в межах  $k = D \cdot d / \delta = (1.2 \div 1.5)$  [11].



ЕГІ витяжка має низку переваг, порівняно з іншими методами. На відміну від квазістатичних методів обробки металів тиском підвищується точність виготовлених деталей через зниження пружинення [27]. Відсутність одного з жорстких інструментів спрощує і здешевлює оснащення, дає змогу застосовувати багатомісне оснащення і дає можливість суміщення операцій в одному штампі [25]. Характер прикладання тиску впливає на сам механізм деформації і деякі властивості металу [25]: зняття викривлень кристалічної решітки, вирівнювання і зняття спотворень кристалічної решітки, вирівнювання і релаксація внутрішніх напружень сприяє підвищенню пластичності та підвищенню граничного ступеня деформації. Під час пластичної деформації одночасно відбуваються як зміцнювальні, так і розуміцнювальні процеси, але за високих швидкостей деформування (30 – 300 м/с) розуміцнювальні процеси відстають, що призводить до динамічного зміцнення металів, підвищуються межа міцності та плинності [19, 28]. Як і для інших імпульсних методів, для процесу ЕГІ витяжки характерна інерційність фланця, що впливає на втрату стійкості та процес складкоутворення.

### 1.11. Порівняльна класифікація технологічних можливостей методів виготовлення деталей із тонколистових металів

У даній роботі наведені технологічні особливості і розглянутих вище процесів витяжки тонколистових деталей (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація технологічних можливостей методів виготовлення деталей із тонколистових металів

Схема витягування	Технологічні можливості процесів								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Витягування в жорсткому штампі	К	--	(1-10)10 <sup>8</sup>	10-1000	0,2-0,4	1,4-2,2	1	-	+
Ротаційне витягування або токарно-тискова	О, Д	--	--	до 4000- 6000	0,25- 0,8	1,25- 1,43	0,2- 0,3	-	+

обробка									
Гідравличне витягування	О	5-25	$(1-10)10^6$	200-800	0,1-0,5	2,1- 2,7	0,1- 0,2	-	+
Квазістатичне витягування еластичними середовищами	О	5-60	$(1-10)10^6$	20-300	0,02- 0,05	1,5- 2,2	0,05- 0,1	-	+
Ударно-імпульсне витягування еластичними середовищами	О	25- 300	60-1000	50-800	0,4-0,5	1,31- 1,43	0,1- 0,2	+	-
Магнітно-імпульсна (МІОМ)	О	2-80	10-25	25-200	0,1-0,2	1,16- 1,43	0,1- 0,2	+	-
Магнітно-еласто-імпульсна (МЕІШ)	О	10- 350	50-1000	50-200	0,02- 0,05	1,16- 1,43	0,1- 0,2	+	-
Електро-гідро-імпульсна (ЕГІШ)	О, Д	10- 1000	1-1000	50-800	0,15- 0,25	1,2- 1,5	0,1- 0,2	+	-

Умовні позначення: 1 – серійність виробництва; 2 – амплітуда тиску, МПа; 3 – тривалість тиску, мкс; 4 – габаритний розмір деталей у плані, мм; 5 – мінімальна товщина листового металу, мм; 6 – ступінь витяжки  $k = D_3/d$ ; 7 – відносна вартість технологічного оснащення, якщо порівняти з вартістю жорсткого штампа; 8 – ефект пружності заготовки; 9 – інерційність фланця. "К" – великосерійне виробництво, "Д" – дрібносерійне виробництво, "О" – одиничне виробництво, "-" – наявність негативного ефекту, "+" – наявність позитивного ефекту або відсутність негативного.

### 1.12. Обґрунтування вибору прийнятої для дослідження технології

Представлений вище огляд літературних даних показав, що наразі не існує технології, яка дала б змогу виготовляти деталі з тонколистових і особливо тонколистових металів належної якості без значних трудовитрат і за відносно низької вартості виробництва. Більшість розглянутих методів не дають можливості реалізувати витяжку тонколистового металу без утворення

тріщин, складок, руйнування заготовки або оснащення, або вимагає високотехнологічного дорогого обладнання. Електрогідроімпульсний (ЕГІ) метод позбавлений більшості недоліків відомих квазістатичних та імпульсних методів, наприклад, не обмежений електропровідністю металу або граничним навантаженням, яке може витримати робочий інструмент у вигляді еластичного блоку, як у випадку МІОМ і МЕІШ. У тих випадках, коли формоутворення заготовки необхідно провести за кілька переходів, на відміну від інших методів ЕГІ не вимагає додаткового оснащення, а здійснюється шляхом декількох послідовних розрядів конденсаторної батареї. ЕГІ технологія являє собою порівняно простий метод холодного деформування, є гнучкою в управлінні параметрами [49, 50, 97] і порівняно легко піддається інтенсифікації. У зв'язку з перерахованим вище було обрано технологію електрогідроімпульсного витягування-формування як найбільш придатну для подальшої інтенсифікації та розширення технологічних можливостей процесу.

### **1.13. Відомі технологічні схеми електрогідроімпульсної витяжки-формування**

За минулі десятиліття було вивчено і розроблено безліч технологічних процесів, заснованих на ЕГЕ. Умовно можна виділити процеси, засновані на ініційованих високовольтних розрядах, які зазвичай здійснюють за допомогою введення в міжелектродний проміжок провідника у вигляді перемички – зволікання (малюнок 1.10, а) [14] і вільні електричні розряди (рисунок 1.10, б - е) [18]. Дослідження вибуху дротиків у воді [14] показали, що дана схема дає змогу знизити робочу напругу, забезпечує управління формою й амплітудою генерованих хвиль тиску та підвищує ККД іскрового проміжку. Електрогідрравлічний удар, що виникає при цьому, не відрізняється від утвореного звичайними засобами [13]. Головним недоліком цієї схеми є необхідність заміни зволікання після кожного розряду і витрати на матеріал перемички

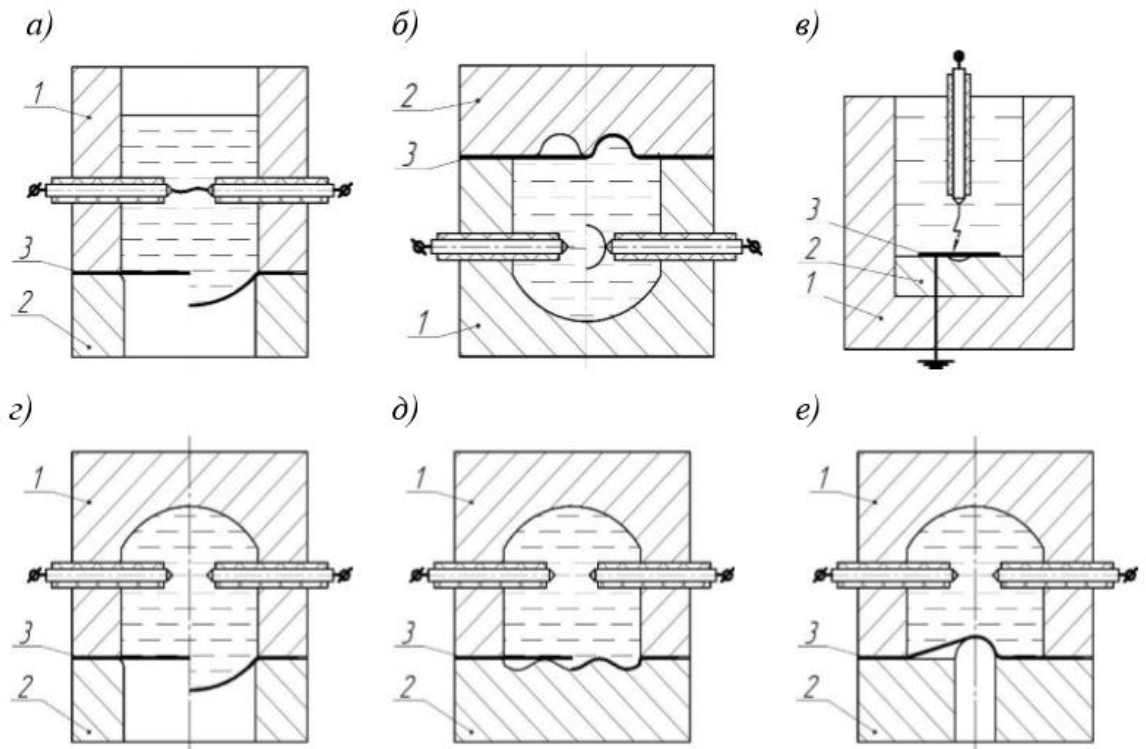


Рисунок 1.11 – Технологічні схеми електрогідроімпульсного витягування-формування: а – із застосуванням ініціювального дротика у відкритій розрядній камері; б – метання рідини, нижнє розташування камери відносно заготівлі; в – саморозряд між електродом і заготівлею; г – витягування-формування у відкриту матрицю; д – витягування-формування в закриту матрицю; е – витягування на пуансон: 1 – розрядна камера; 2 – матриця; 3 – тонколистова заготівля

До схем формоутворення з використанням вільного електричного розряду відносять: схему метання рідини (рисунок 1.11, б), розряд у рідині між електродом і заготівлею (рисунок 1.11, в), розряд у рідині між двома електродами, причому електроди можуть розміщуватися як у відкритому (рисунок 1.11, а), так і закритому резервуарі (рисунок 1.11, г). Найчастіше застосовуються схеми витяжки-формування в закритому резервуарі без ініціювання розряду дротиком. Серед таких технологічних схем варто відзначити витяжку-формування у відкриту матрицю (рисунок 1.11, г), у закриту матрицю (рисунок 1.11, д) і на пуансон (рисунок 1.11, е). Також слід

розрізняти схеми навантаження з верхнім (рисунок 1.11, а, г, д, е) і нижнім розташуванням розрядної камери відносно заготовки (рисунок 1.11, б). На основі ЕГІ технологій постійно розробляються нові інтенсифіковані технологічні процеси, що свідчить про гнучкість процесу і відносну простоту інтенсифікації. Приклади подібної інтенсифікації – комбіновані статико-імпульсні методи [27], засновані на послідовному наборі матеріалу заготовки на пуансон і впливом імпульсного навантаження (див. рисунок 1.12, а, б). У деяких схемах також застосовують канавки різних форм і розмірів для резервування металу на фланцевій частині заготовки. Однак зазначені інтенсифіковані методи вирізняються складністю конструкції і не завжди ефективні в усуненні типових проблем, що виникають під час витяжки-формування тонколистового металу.

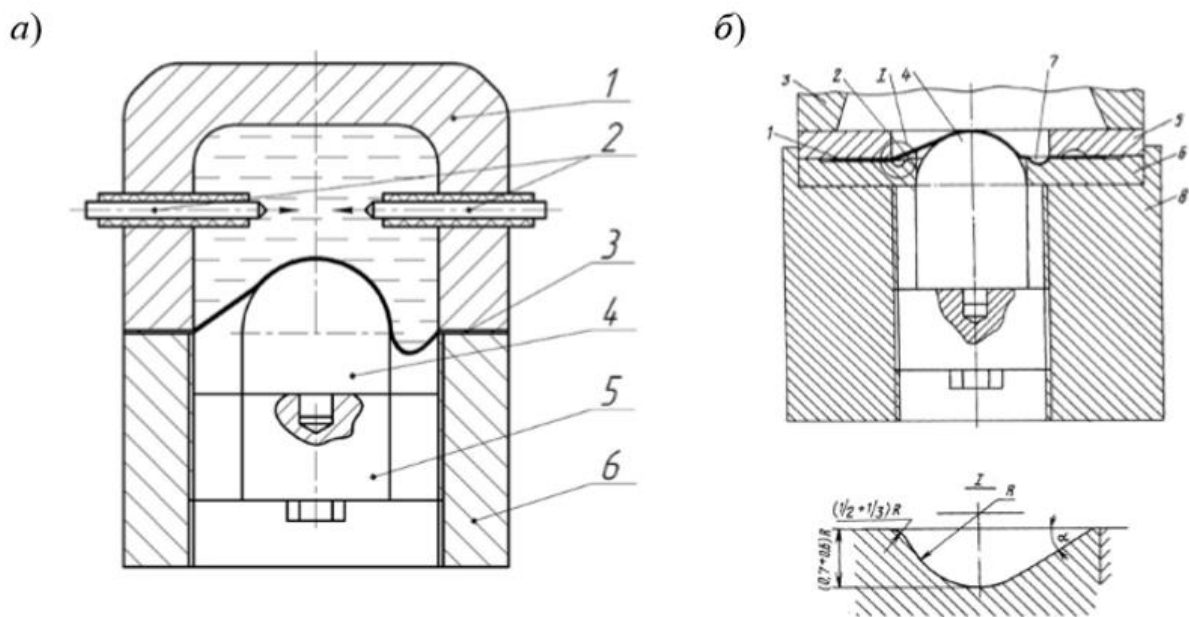


Рисунок 1.12 – Технологічні схеми інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування К.І. Поздова: а – глибока статико-імпульсна витяжка [101]; б – статико-імпульсна витяжка з резервуванням матеріалу в кільцевих канавках на фланці: 1 – листова заготовка; 2 – вставка; 3 – розрядна камера; 4 – пуансон; 5 – верхній диск; 6 – нижній диск; 7 – виїмка; 8 – корпус

### **1.14. Типові дефекти, що виникають під час електрогідроімпульсного витягування**

У процесі витяжки і витяжки-формування тонколистового й особливо тонколистового металу можуть виникати такі дефекти, характерні не тільки для імпульсних, а й для квазістатичних процесів:

1. Складкоутворення на фланцевій і вільній частині заготовки [27]. Втрата стійкості у вигляді складкоутворення (рисунок 1.13, а) на фланцевій частині заготовки виникає внаслідок складних пластичних деформацій, характерних для процесів витяжки [14]. Поява складок пояснюється тим, що в процесі витяжки елементи фланця зазнають радіальних розтягувальних напружень, тангенціальних стискальних напружень, напружень вигину, які виникають у процесі переміщення фланця крайкою матриці, а також напружень тертя, спричинених ковзанням фланця поверхнею формуютьовального інструменту. Утворення складок веде до збільшення опору витягуванню і порушує звичний хід процесу. Для витяжки квазістатичними методами також характерне утворення складок і на вільній частині заготовки, оскільки гофрований метал фланця частково витягується в порожнину матриці. У разі імпульсного навантаження, внаслідок інерційності фланця, процес складкоутворення сповільнюється.

2. Порушення суцільності. Підвищення опору витягці, а також надмірне стоншення матеріалу заготовки може призвести до розриву заготовки поблизу донної частини (рисунок 1.13, в). Порушення суцільності матеріалу заготовки також може бути результатом впливу надмірного рівня тиску, якщо йдеться про імпульсне навантаження.

3. Фестоноутворення. Для листового металу характерна анізотропія механічних властивостей, унаслідок якої, у витягнутих тонколистових деталях спостерігається відхилення форми зовнішнього периметра фланця від круга, тобто фестоноутворення (малюнок 1.13, б). Однак, якщо центральна частина

заготовки набуває необхідної форми та розмірів, це не завжди призводить до браку [27].

4. Розцентрування й одностороннє утягування. Для усунення розглянутих типових дефектів часто застосовують інтенсифікацію відомих традиційних методів, але слід зазначити, що подібні рішення часто значно ускладнюють оснащення і не завжди бувають ефективні.

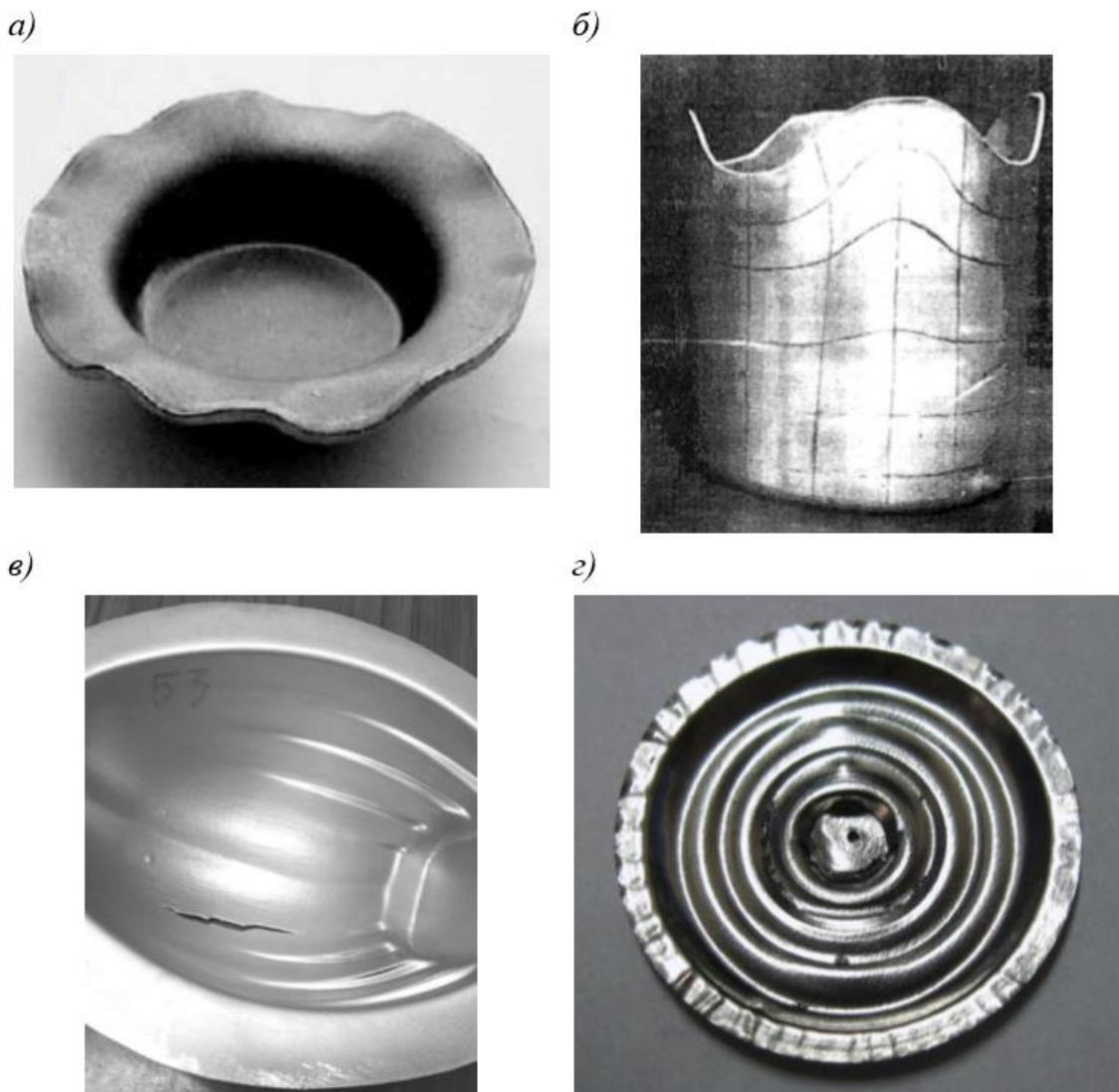


Рисунок 1.13 – Приклади витяжки листових заготовок: а - латунь Л63; б – банкова стрічка 3401; в – алюміній АД1М завтовшки 1 мм; г – сплав ЗJ53 завтовшки 0,3 мм

Під час витяжки-формування листових заготовок у закриту матрицю імпульсними методами поряд із розглянутими дефектами також можуть виникнути такі: - недоштампівка рельєфу матриці за недостатнього рівня амплітудного тиску; - відскок і зворотний прогин донної частини заготовки від дна матриці за передозування енергії (рисунок 1.13, г).

Питання щодо запобігання виникненню зазначених дефектів залишається невирішеним [26], тому дослідження процесу ЕГІ витяжки-формування тонколистових металів є актуальним завданням.

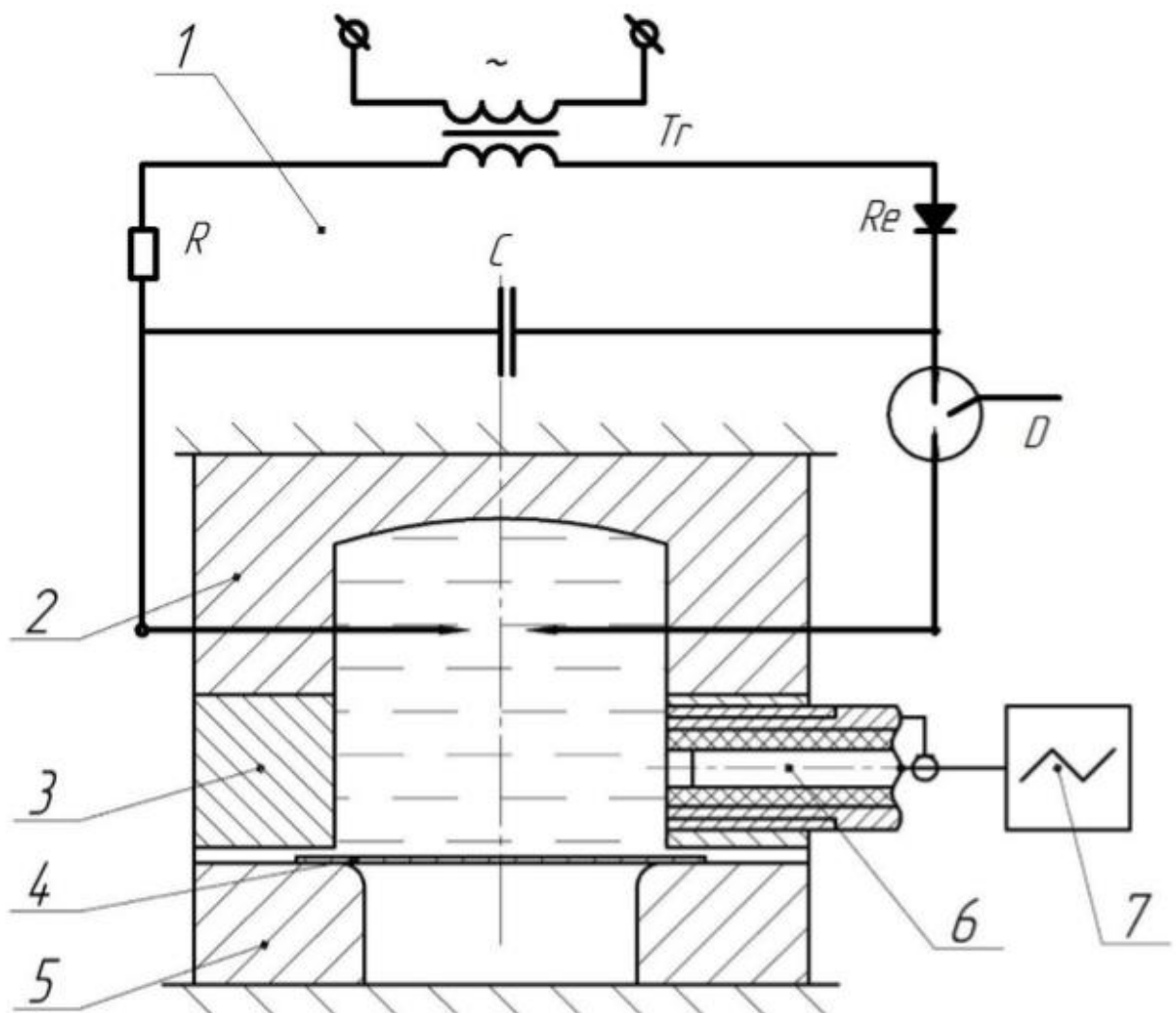


Рисунок 1.14 – Схема ЕГД витяжки листового металу, що містить у собі датчик для вимірювання імпульсного тиску: 1 – ЕГД установка; 2 – розрядна камера; 3 – вкладка з п'єзоелектричним датчиком; 4 – листова заготовка; 5 – матриця; 6 – датчик для вимірювання тиску; 7 – осцилограф



### 1.15. Обґрунтування вибору прийнятої для дослідження технології

Представлений вище огляд літературних даних засвідчив, що наразі не існує технології, яка дала б змогу виготовляти деталі з тонколистових і особливо тонколистових металів належної якості без значних трудовитрат і за відносно низької вартості виробництва. Більшість розглянутих методів не дають можливості реалізувати витяжку тонколистового металу без утворення тріщин, складок, руйнування заготовки або оснащення, або вимагає високотехнологічного дорогого обладнання.

Електрогідроімпульсний (ЕГІ) метод позбавлений більшості недоліків відомих квазістатичних та імпульсних методів, наприклад, не обмежений електропровідністю металу або граничним навантаженням, яке може витримати робочий інструмент у вигляді еластичного блоку. У тих випадках, коли формоутворення заготовки необхідно провести за кілька переходів, на відміну від інших методів ЕГІ не вимагає додаткового оснащення, а здійснюється шляхом декількох послідовних розрядів конденсаторної батареї. ЕГІ технологія являє собою порівняно простий метод холодного деформування, є гнучкою в управлінні параметрами [19] і порівняно легко піддається інтенсифікації.

У зв'язку з перерахованим вище було обрано технологію електрогідроімпульсного витягування-формування як найбільш придатну для подальшої інтенсифікації та розширення технологічних можливостей процесу.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1. Аналіз технологічності деталі

Під технологічністю слід розуміти таку сукупність властивостей і конструктивних елементів, які забезпечують найпростіше й економічне виготовлення деталей за дотримання технічних та експлуатаційних вимог до них.

Основними показниками технологічності листових холодноштампувальних деталей є:

- 1) найменша витрата матеріалу;
- 2) найменша кількість операцій і їхня низька трудомісткість;
- 3) відсутність подальших механічних операцій;
- 4) найменша кількість необхідного обладнання та виробничих операцій;
- 5) найменша кількість оснащення при скороченні витрат і термінів підготовки виробництва;
- 6) збільшення продуктивності окремих операцій і цеху в цілому.

Загальним результативним показником технологічності є найменша собівартість штампованих деталей. Одним із найважливіших питань, що передують технологічним розрахункам, є виявлення здатності металу виконувати штампувальні операції або визначення його відносної штампуваності. Під штампуваністю розуміють здатність листового металу піддаватися різним операціям штампування. Штампуваність залежить від низки показників: механічних властивостей, пластичності, модуля пружності, структури металу і хімічного складу.

Для детального розроблення беремо одну деталі, креслення якої представлено на рисунку 2.1.

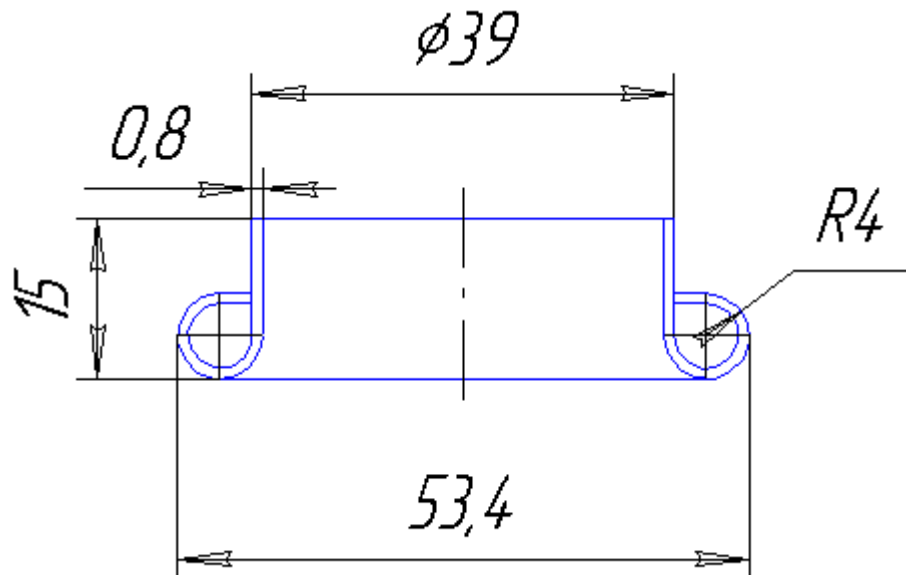


Рисунок 2.1 – Насадок випускної труби

Деталь "Насадок випускної труби" є тілом обертання простої форми, порожниста. З огляду на товщину склянки (0,8 мм) і механічні властивості матеріалу – сталі 08кп, доходимо висновку, що дану деталь можна отримати такими операціями, як: витягування, вирубвання, пробивання, відбортовування, завивка. Основною вимогою до деталей, що виготовляються витяжкою, є наявність плавних сполучень між стінками, фланцем і дном деталі. У [11] наведені найменші радіуси сполучень деталей, що виготовляються витяжкою без додаткового калібрування. Радіуси заокруглення у фланця мають бути якомога більшими, а радіуси заокруглення у дна можуть бути взяті більшими. Проаналізувавши розміри заданої деталі, доходимо висновку, що розміри радіусів заокруглення технологічно здійсненні. Оскільки  $S \leq 0,05d$ , то витяжку виконуємо в стрічці з вирізом проміжків  $\frac{1}{4}$ , с.134/.

## 2.2. Розробка креслення штамповки

Пропонована до детального розроблення деталь "Насадок випускної труби" є технологічною у виготовленні і тому, приймаю її до розроблення без змін.

Більшість деталей, які отримують методом холодного тиску в листовому штампуванні, можуть бути виготовлені кількома способами. При цьому необхідні операції для штампування заданої деталі можуть виконуватися на відповідних окремих штампах (диференційований спосіб штампування) або на суміщених чи послідовних штампах (концентрований спосіб штампування).

Перед розглядом варіантів технологічних процесів, що конкурують, потрібно встановити, які чинники визначають побудову процесу і які з них найважливіші: заготівля, спосіб одержання базового конструктивного елемента деталі, спосіб формоутворення інших конструктивних елементів деталі, спосіб одержання заданих фізичних, механічних властивостей деталі та автоматизації процесу. Кожен із цих чинників має властиві особливі ознаки - форма і відносні розміри первинної заготовки, спосіб виконання операції, конструктивні особливості штампів, режими оброблення тощо. комбінуючи ці ознаки і чинники, можна отримати різні рішення. У великосерійному виробництві необхідно прагнути до мінімальних витрат матеріалу, до найменшої кількості штампувальних операцій завдяки використанню і впровадженню в проєкті сумісного і послідовного процесу штампування, для підвищення продуктивності і стійкості штампів.

Для представлених деталей пропоную по одному варіанту виготовлення, який відрізняється від базового і є найбільш вдалим.

За основними кількісними та якісними показниками (коефіцієнт використання металу, кількість операцій і обладнання, трудомісткість виготовлення, складність обладнання, стійкість робочого інструменту тощо), які отримаємо в результаті подальших розрахунків, зробимо на їх основі порівняння оптимальності двох запропонованих варіантів виготовлення. Результуючим показником є собівартість, а не трудомісткість виготовлення деталі. Оптимальний варіант технологічного процесу повинен забезпечувати надійне виготовлення деталі в повній відповідності до вимог креслення (якість деталі) за найменшої її вартості (ефективність виробництва).

Остаточний вибір зробимо після розгляду розкрою.

### 2.2.1. Розробка маршрутної технології (вибір переходів штампування)

Варіант виготовлення деталі "Насадок випускної труби"

1. Надрізка стрічки, витяжка, пробивання отвору в донній частині під відбортовку, вирубка заготовки зі смуги.
2. Відбортовка за зовнішнім і внутрішнім контурами.
3. Завивка.

### 2.2.2. Визначення форми і розмірів заготовки

Існує три методи розрахунку: аналітичний, графічний і графоаналітичний. Усі вони прийнятні для будь-якого виду штампувального виробництва. Однак перевагу слід віддати першому як найбільш універсальному і доступному для технолога і конструктора. До безперечної його переваги належить можливість використання сучасної обчислювальної техніки. Він же вирізняється вищою точністю. Основним правилом для визначення вихідної заготовки аналітичним методом є рівність об'ємів заготовки і готової деталі, оскільки в процесі деформування об'єм металу залишається постійним.

Визначимо розмір заготовки для деталі "Насадок випускної труби".

Початковою заготовкою для витяжки деталі типу порожнистого циліндра є коло. У цьому випадку, тобто під час витяжки без потоншення стінок, зміною товщини стінок нехтуємо і визначаємо розмір заготовки за рівністю площі поверхні заготовки і готової деталі з припуском на обрізку.

$$D_{заг} = 1,13\sqrt{F} = 1,13\sqrt{\sum f}, \quad (2.1)$$

де  $D_{заг}$  - діаметр заготовки без урахування потоншення стінок матеріалу, мм;

$F$  - площа поверхні готової деталі;

$f$  - сума площ окремих елементів поверхні деталі, з урахуванням припуску на обрізку,  $\text{мм}^2$ .

Для визначення площі поверхні деталі розіб'ємо деталь на окремі елементарні поверхні (див. рисунок 2.2).

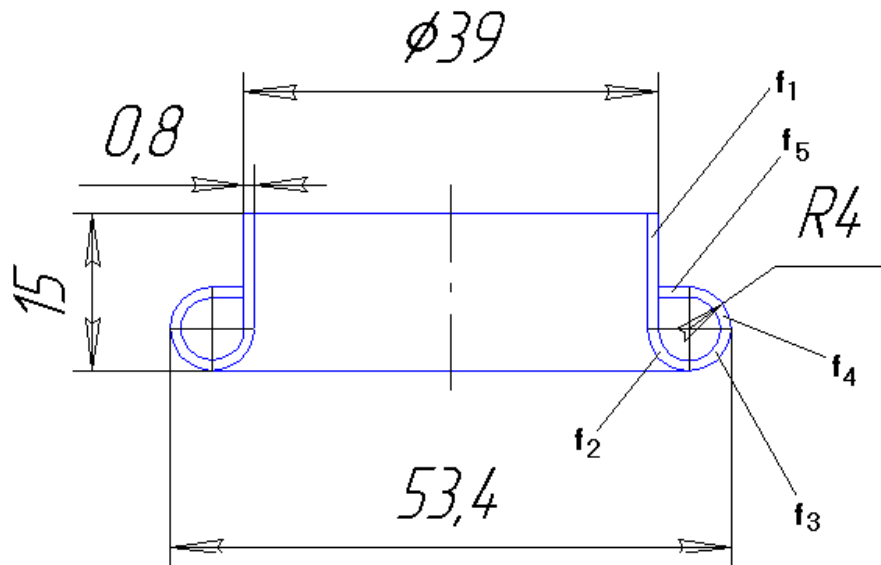


Рисунок 2.2 – Розрахунок діаметра заготовки

Визначимо площі елементарних поверхонь:

$$f_1 = \pi d_2 h = 1347,7 \text{ мм}^2$$

$$f_2 = \pi(dL - 2rh) = 617,0 \text{ мм}^2$$

де  $L = 0,017r\alpha = 4,89 \text{ мм}^2$

$$f_3 = \frac{\pi}{4}(2\pi d_1 r - 8r^2) = 781,26 \text{ мм}^2$$

$$f_4 = \frac{\pi}{4}(2\pi d_1 r - 8r^2) = 996,69 \text{ мм}^2$$

$$f_5 = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) = 424,2 \text{ мм}^2$$

Тоді підставляючи у формулу (2.1) отримаємо

$$D_{заг} = 1,13\sqrt{1347,7 + 617 + 781,26 + 996,69 + 424,2} = 74,3 \text{ мм}$$

Оскільки перші операції виконуються в стрічці, і під час штампування передбачено вирізку, то фактичний розмір заготовки беруть більшим за розрахунковий на величину припуску на кільцевий відхід під час вирізки.

Тоді фактичний діаметр заготовки буде

$$D_{з.ф.} = D_з + \epsilon \quad (2.2)$$

$$\epsilon = 2,5 \text{ мм} [12]$$

$$D_{з.ф.} = 74,3 + 2,5 = 76,8 \text{ мм}$$

### 2.2.3. Розкрій вихідного матеріалу

Економія металу і зменшення відходів у холодному листовому штампуванні мають вельми важливе значення, особливо у великосерійному і масовому виробництві, оскільки за великих масштабів виробництва навіть незначна економія металу на одному виробі дає в підсумку велику економію. Економія металу в холодному штампуванні досягається шляхом:

1. найбільш доцільного розкрою листів на штучні заготовки або смуги з найменшими відходами;
2. найбільш економного розкрою смуг і розташування вирізаних деталей на смузі;
3. зменшення втрат металу на перемички;
4. застосування безвідходного і маловідходного розкрою;
5. підвищення точності розрахунку розміру заготовок і зменшення припусків на обрізку;
6. використання відходів для виготовлення інших деталей;
7. запобігання браку деталей, що штамнуються, а також зниження норми втрат під час налагодження та встановлення штампів тощо. розкрій матеріалу характеризується показником коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) [11]:

$$\eta = \frac{n \cdot F_{дет}}{F_{заг}} 100\%, \quad (2.3)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт використання металу (КВМ);

$n$  - кількість деталей, одержуваних із вихідної заготовки;

$F_{дет}$  - площа поверхні деталі;

$F_{заг}$  - площа поверхні вихідної заготовки.

Визначимо КВМ для деталі "Насадок випускної труби".

Ширина стрічки для розкрою з вирізкою проміжків визначається за формулою

$$B = A + 2a = (1,0 \div 1,05)(D_3 + \epsilon) + 2a \quad (2.4)$$

де  $\epsilon$  - припуск на відрізок;

$D_3$  - розрахунковий діаметр заготовки;

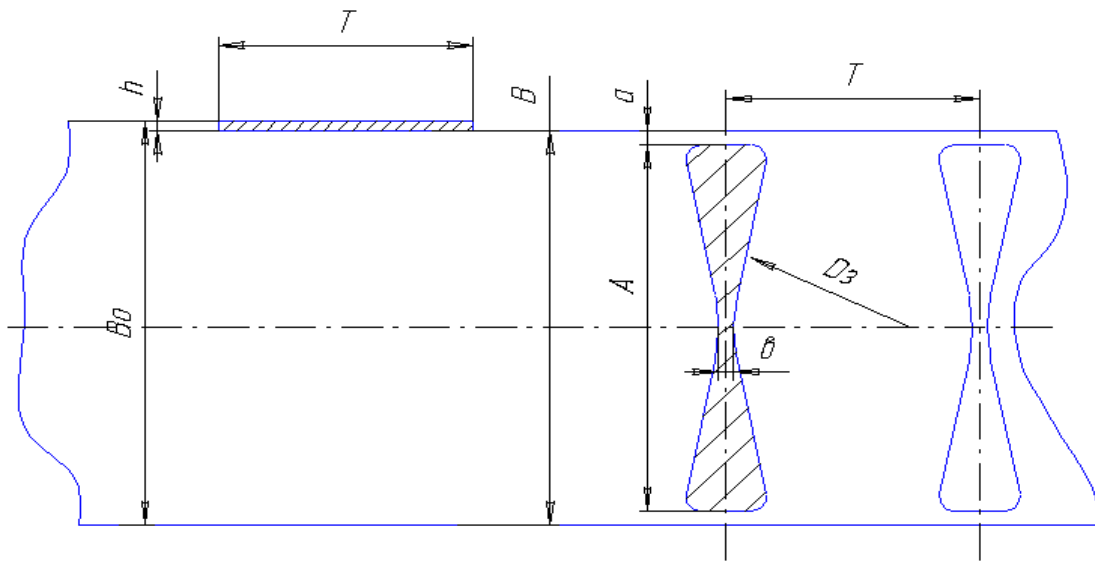


Рисунок 2.3 – Розкрій стрічки

Шаг подачі:

$$T = D_{зф} + \epsilon \quad (2.5)$$

де  $D_{зф}$  - фактичний діаметр заготовки.

площа заготовки -  $F_{заг} = \frac{\pi D_{зф}^2}{4} = 4632,46 \text{ мм}^2$ .



Величини перемичок під час послідовного витягування дорівнюють  $e = 3,0$   $a = 3,0$  для діаметра заготовки більше 30 мм і під час витягування з вирізами [12].

Підставляючи значення у формулу (2.6) отримаємо:

$$B = 1(74,3 + 2,5) + (2 \cdot 3) = 82,8 \text{ мм}$$

Підставляючи значення у формулу (2.7) отримаємо

$$T = 76,8 + 3 = 79,8 \text{ мм}$$

Ширину кромки, що зрізається бічним кроковим ножом, залежно від товщини металу приймаємо  $h = 1,5$  мм

Тоді ширина стрічки:  $B_o = B + h = 82,8 + 1,5 = 84,3$  мм

За стандартним рядом чисел підбираємо стрічку шириною ДСТ 503-81.

Визначимо ширину вирізаної частини А (див. рисунок 2.3):

$$A = B - 2a \quad (2.8)$$

тоді  $A = 82,8 - (2 \cdot 3) = 76,8$  мм

визначимо КВМ під час штампування матеріалу в стрічці.

$$\eta = \frac{0,785 \cdot D_{заг}^2}{(D_{заг} + b)B_n} \cdot 100\% = \frac{0,785 \cdot 76,8^2}{(76,8 + 3) \cdot 85} \cdot 100\% = 69\%.$$

Визначимо КВМ у разі виготовлення з листа

І лист  $0,8 \times 600 \times 1200$  (S×B×L) сталь 08кп (ГОСТ 19904-74)

1) поперечний розкрій

$$2) \quad n_1 = \frac{B}{T} = \frac{600}{79,8} = 7;$$

$$3) \quad n_2 = \frac{L}{B_o} = \frac{1200}{82,8} = 14;$$

$$\eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 7 \cdot 14}{600 \cdot 1200} \cdot 100\% = 67,56\%;$$

4) поздовжній розкрій

$$n_1 = \frac{L}{T} = \frac{1200}{79,8} = 14;$$

$$n_2 = \frac{B}{B_0} = \frac{600}{82,8} = 7;$$

$$\eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 14 \cdot 7}{600 \cdot 1200} \cdot 100\% = 63,05\%;$$

II лист 0,8×710×1420 сталь 08кп (ГОСТ 19904-74):

1) поперечний розкрій

$$2) \quad n_1 = \frac{B}{T} = \frac{710}{79,8} = 8;$$

$$n_2 = \frac{L}{B_0} = \frac{1420}{82,8} = 17;$$

$$\eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 8 \cdot 17}{710 \cdot 1420} \cdot 100\% = 62,49\%;$$

3) поздовжній розкрій

$$n_1 = \frac{L}{T} = \frac{1420}{79,8} = 17;$$

$$n_2 = \frac{B}{B_0} = \frac{710}{82,8} = 8;$$

$$\eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 17 \cdot 8}{710 \cdot 1420} \cdot 100\% = 62,49\%;$$

III лист 0,8×800×1600 сталь 08кп (ГОСТ 19904-74):

1) поперечний розкрій

$$2) \quad n_1 = \frac{B}{T} = \frac{800}{79,8} = 10;$$

$$3) \quad n_2 = \frac{L}{B_0} = \frac{1600}{82,8} = 19;$$

$$4) \quad \eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 10 \cdot 19}{800 \cdot 1600} \cdot 100\% = 68,76\%;$$

5) поздовжній розкрій

$$6) \quad n_1 = \frac{L}{T} = \frac{1600}{79,8} = 20;$$

$$7) \quad n_2 = \frac{B}{B_0} = \frac{800}{82,8} = 9;$$

$$8) \quad \eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 20 \cdot 9}{800 \cdot 1600} \cdot 100\% = 65,14\%;$$

IV лист  $0,8 \times 1000 \times 2000$  сталь 08кп (ГОСТ 19904-74):

1) поперечний розкрій

$$2) \quad n_1 = \frac{B}{T} = \frac{1000}{79,8} = 12;$$

$$n_2 = \frac{L}{B_0} = \frac{2000}{82,8} = 24;$$

$$\eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 12 \cdot 24}{1000 \cdot 2000} \cdot 100\% = 66,71\%;$$

3) поздовжній розкрій

$$4) \quad n_1 = \frac{L}{T} = \frac{2000}{79,8} = 25;$$

$$5) \quad n_2 = \frac{B}{B_0} = \frac{1000}{82,8} = 12;$$

$$6) \quad \eta = \frac{F_{заг} \cdot n_1 \cdot n_2}{B \cdot L} \cdot 100\% = \frac{4632,46 \cdot 25 \cdot 12}{1000 \cdot 2000} \cdot 100\% = 69\%.$$

Результати розрахунків зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1– розкрій листового матеріалу (КВМ)

Тип розкрію	Розмір листа			
	600×1200	710×1420	800×1600	1000×2000
поперечний	60%	62,49%	68,76%	66,71%
поздовжній	67,56%	62,49%	65,14%	69%

Аналізуючи наведені в таблиці 2.1 розрахункові дані, можна зробити висновок, що оптимальний розкрій із запропонованих листових матеріалів буде у разі використання листа  $0,8 \times 1000 \times 2000$  сталь 08кп (ДЕСТ 19904-74) з поздовжнім розкромом, КВМ=69%.

### 2.2.4. Аналіз напружено-деформованого стану

Витяжка є однією з найпоширеніших і вивчених операцій листового штампування. Аналіз процесу витяжки є в роботах С. І. Губкіна, І. А. Норіцина, Л.А. Шофмана та ін.

Нижче, з урахуванням наявних робіт, викладено аналіз операції витяжки циліндричної деталі "Насадок випускної труби". Схему витяжки представлено на рисунку 2.4

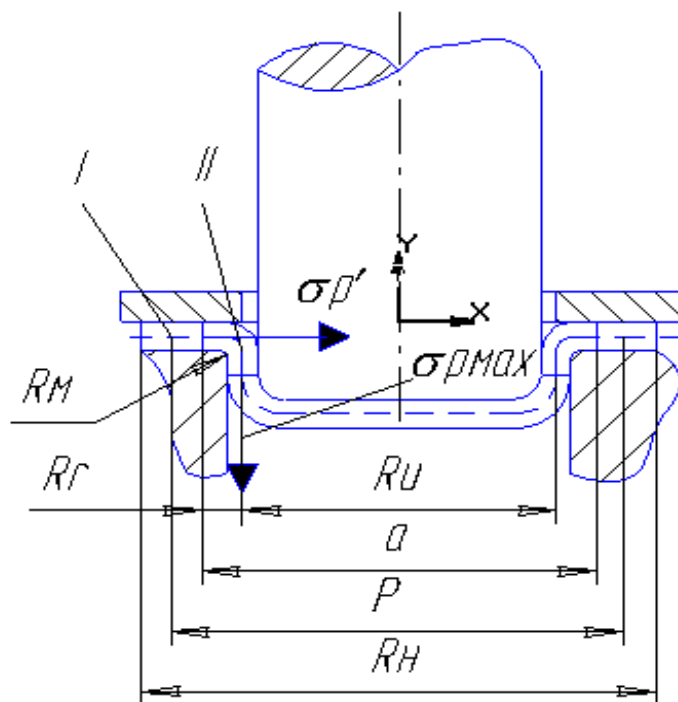


Рисунок 2.4 – Схема витяжки

Під час витяжки пластичну деформацію отримує частина заготовки (фланець), що знаходиться на плоскому торці матриці та на її заокругленій кромці, а інша частина заготовки деформується пружно або отримує невеликі пластичні деформації. Розглянемо процес деформування плоскої круглої заготовки під час витяжки циліндричної склянки (перший перехід витяжки).

Під дією пуансона середня частина заготовки вдавлюється в отвір матриці. Внаслідок суцільності заготовки переміщення її середньої частини

спричиняє появу розтягувальних напружень, що діють у радіальних напрямках у фланці. Одночасно виникають стискальні напруги, що діють у тангенціальних напрямках. Якщо прийняти, що деформування фланця відбувається без наявності нормальних і дотичних напружень на поверхні заготовки, тобто без притискання, то схема напруженого стану у вогнищі деформації буде плоскою, а деформування фланця - аналогічним до деформування круглої пластинки з круглим отвором, до контуру якого прикладено розтягувальні напруження (через осьову симетрію деформування дотичні напруження, а напруження є головними нормальними напруженнями). У цьому разі може бути використано рівняння рівноваги для плоского завдання в полярній системі координат.

Оскільки на переході від фланця до денця напруга під час витяжки не повинна перевищувати межі плинності, то можна визначити теоретичну величину граничного коефіцієнта витяжки, що визначається як відношення діаметра заготовки до діаметру склянки, що витягується.

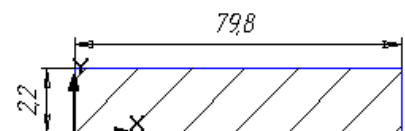
Однак наведений аналіз розподілу напружень у вогнищі деформації неповністю відображає реальні умови деформації заготовки під час витяжки. На розподіл напружень додатково впливають також тертя під притиском, тертя на заокругленій кромці матриці, зміцнення металу в процесі холодної деформації.

### 2.2.5. Розрахунок технологічних операцій

Розрахунок технологічних операцій. Розрахунок технологічних операцій для деталі "Насадок випускної труби"

1) Різання кроковим ножом (див. рисунок 2.9).

Визначимо зусилля під час різання бічним ножом:



$$P_{\text{нож}} = LS\sigma_{\text{ср}}k \quad (2.6) \quad \text{Рисунок 2.5 – Габарити заготівлі}$$

Визначимо зусилля під час різання бічним ножом

де  $L$  – довжина відрізка, який відрізається, мм;

$k$  – поправочний коефіцієнт

$S$  – товщина заготівлі, мм;

$\sigma_{cp}$  – опір металу зрізу, МПа;

тоді

$$P_{нож} = 82 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 1,25 = 20500 \text{ Н} = 20,5 \text{ кН}$$

### 1) Надрізання

Форма надрізаної частини має вигляд (рисунок 2.10).

### 2) Визначимо зусилля надрізання

$$P_{надр} = LS\sigma_{cp}k \quad (2.7)$$

де  $L$  – довжина ділянки, що розрізається, мм;

$k$  – поправочний коефіцієнт

$S$  – товщина заготівлі, мм;

$\sigma_{cp}$  – опір металу зрізу, МПа;

тоді

$$P_{надр} = 178,39 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 1,25 = 44597,5 \text{ Н} = 44,6 \text{ кН}$$

Зусилля прижиму

$$P_{прж} = LSq_{прж} \quad (2.8)$$

тоді  $P_{прж} = 178,39 \cdot 0,8 \cdot 6 = 856,2 \text{ Н} = 0,856 \text{ кН}$

Зусилля прошовхування

$$P_{прот} = 0,1P_{надр} \quad (2.9)$$

тоді  $P_{прот} = 0,1 \cdot 44,6 = 4,46 \text{ кН}$

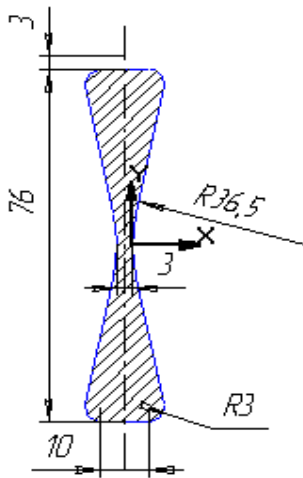
Тоді сумарне зусилля надрізання

$$P_{надр\Sigma} = P_{надр} + P_{прж} + P_{прот} \quad (2.10)$$

Підставивши дані, отримуємо

$$P_{надр\Sigma} = 44,6 + 0,856 + 4,46 = 49,9 \text{ кН}$$

### 3) Витяжка з фланцем



Для того щоб отримати задану деталь (див. рисунок 2.1), необхідно попередньо виконати витяжку з фланцем.

Діаметр фланця можна визначити з готової деталі, виконавши розгортку завитої частини, див. рисунок 2.6

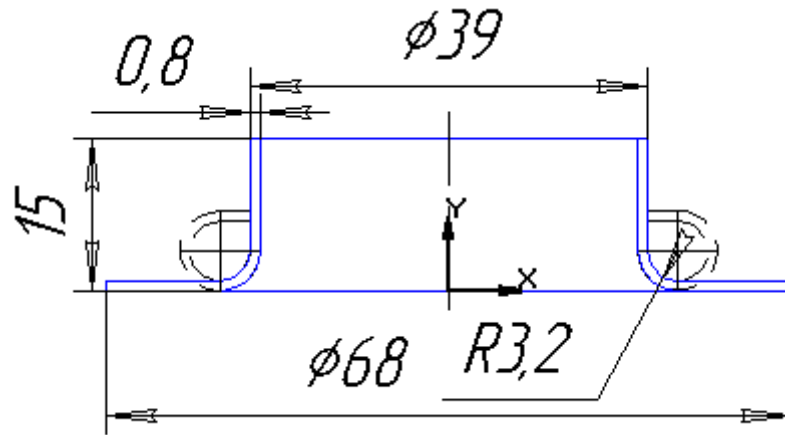


Рисунок 2.2 – Розгорнутий фланець

Висоту 15 мм можна отримати попередньою витяжкою, потім пробиванням отвору і подальшим відбортовуванням (див. рисунок 2.7).

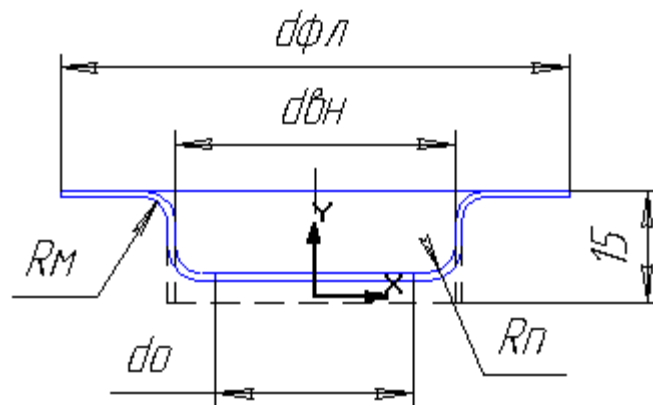


Рисунок 2.7 – Схема попередньої витяжки і відбортовки

Визначимо глибину попередньої витяжки

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{нар}} - (2S) = 39 - (2 \cdot 0,8) = 37,4 \text{ мм}$$

$$d_{\text{сп}} = 38,2 \text{ мм}$$

Приймаємо для сталі 08кп  $K_{\text{відб}} = 0,72$  [11]

Тоді діаметр технологічного отвору буде

$$d_o = d_{cp} \cdot k_{відб} \quad (2.11)$$

тоді, підставивши значення, отримаємо

$$d_o = 38,2 \cdot 0,72 = 27,5 \text{ мм}$$

Визначимо висоту борта, яку можна отримати за допомогою  $d_o = 27,5 \text{ мм}$

[11]

$$H_{відб} = H_o - H_e = \frac{d_{cp} - d_o}{2} - 0,72S - 0,43r_n \quad (2.12)$$

тоді, підставивши значення, отримаємо

$$H_{отб} = \frac{37,4 - 27,5}{2} - 0,72 \cdot 0,8 - 0,43 \cdot 3 = 3,1 \text{ мм}$$

5) Відбортовка внутрішня.

Отже, глибина попередньої витяжки буде

$$H_e = H_o - H_{отб} \quad (2.13)$$

$$H_e = 15 - 3,1 = 11,9 \text{ мм}$$

Деталь після витяжки матиме вигляд

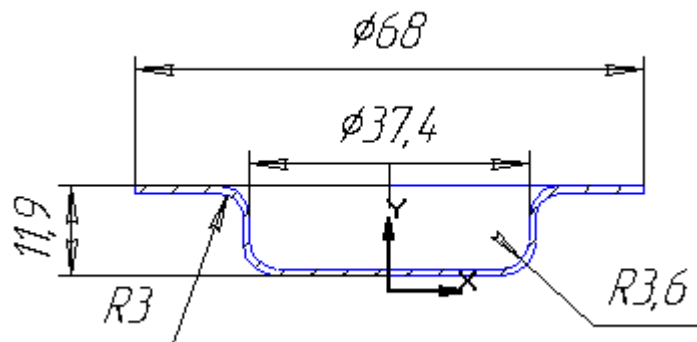


Рисунок 2.8 – Деталь після витяжки

Визначимо зусилля витяжки

$$P_{вит} = \pi d S \sigma_e R_\phi \quad (2.14)$$

де  $\sigma_e$  - межа міцності, МПа;

$R_\phi$  - коефіцієнт для витяжки деталей із фланцем [10]



оскільки відношення  $\frac{d}{d_{cp}} = \frac{68}{38,2} = 1,78$ , а  $m_1 = \frac{d_1}{D_3} = \frac{38,2}{76,8} = 0,49$ , то

$$R_\phi = 0,95$$

тоді

$$P_{\text{вит}} = \pi 38,2 \cdot 0,8 \cdot 380 \cdot 0,95 = 34658,5 \text{ Н} = 34 \text{ кН}$$

Зусилля притискання (стор.174, [3])

$$Q = 0,25\pi [D_3^2 - (d_1 + 2r_m)^2] q \quad (2.15)$$

де  $q$  – тиск притискання, МПа;  $q = 0,15 \div 0,25$  МПа

$$Q = 0,25\pi [76,8^2 - (38,2 + 2 \cdot 3)^2] 0,15 = 464,7 \text{ Н} = 0,46 \text{ кН}$$

Сумарне зусилля витяжки

$$P_{\text{вит}\Sigma} = P_{\text{вит}} + Q \quad (2.16)$$

$$P_{\text{вит}\Sigma} = 34,6 + 0,46 = 34,46 \text{ кН}$$

#### 4) Пробивання

Визначимо зусилля, необхідне для пробивання отвору діаметром 27,5 мм

$$P_{\text{проб}} = \pi \cdot d \cdot S \cdot \sigma_{cp} \cdot k \quad (2.17)$$

де  $k$  - коефіцієнт, що враховує заступлення ріжучих крайок інструменту,

$$k = 1,25;$$

$d$  - діаметр отвору, що пробивається, мм;

$S$  - товщина штампуваного матеріалу, мм;

$\sigma_{cp}$  - опір зрізу,  $\sigma_{cp} = 25 \text{ МПа}$

Визначаємо зусилля зняття матеріалу з пуансона

$$P_{cn} = k_{cn} \cdot P_{\text{проб}}, \quad (2.18)$$

де  $k_{cn}$  - коефіцієнт, що визначається залежно від типу штампа і товщини матеріалу  $k_{cn} = 0,06$ ; [12];

$P_{проб}$  - зусилля пробивання, кН.

Тоді, згідно з формулою (2.21):

$$P_{сн} = 0,06 \cdot 6,8 = 0,4 \text{кН}$$

Визначаємо зусилля проштовхування

$$P_{прот} = k_{прот} \cdot P_{проб} \cdot n \quad (2.19)$$

де  $k_{прот}$  - коефіцієнт проштовхування  $k_{прот}=0,05$ ; [11];

$n$  - кількість деталей у шийці матриці,

$$n = \frac{h}{S} = \frac{2}{0,8} = 2,5 \text{шт}$$

Тоді, згідно з формулою (2.22):

$$P_{прот} = 0,05 \cdot 6,82,5 = 0,85 \text{кН}$$

Сумарне зусилля пробивання буде

$$P_{проб\Sigma} = P_{проб} + P_{сн} + P_{прот} \quad (2.20)$$

тоді

$$P_{проб\Sigma} = 6,8 + 0,4 + 0,85 = 8,05 \text{кН}$$

5) Відбортовка внутрішня;

Схему відбортовки зображено на малюнку 2.9. Застосуємо відбортовку циліндричним пуансоном.

Визначимо зусилля відбортовки:

$$P_{відб/вн} = 1,1\pi S \sigma_{\epsilon} (d_{ср} - d_o) \quad (2.21)$$

Підставивши значення у формулу (2.24) отримаємо

$$P_{відб/вн} = 1,1\pi 0,8 \cdot 380(38,2 - 27,5) = 11240,8 \text{Н} = 11,2 \text{кН}$$

## 6) Відбортовка зовнішня

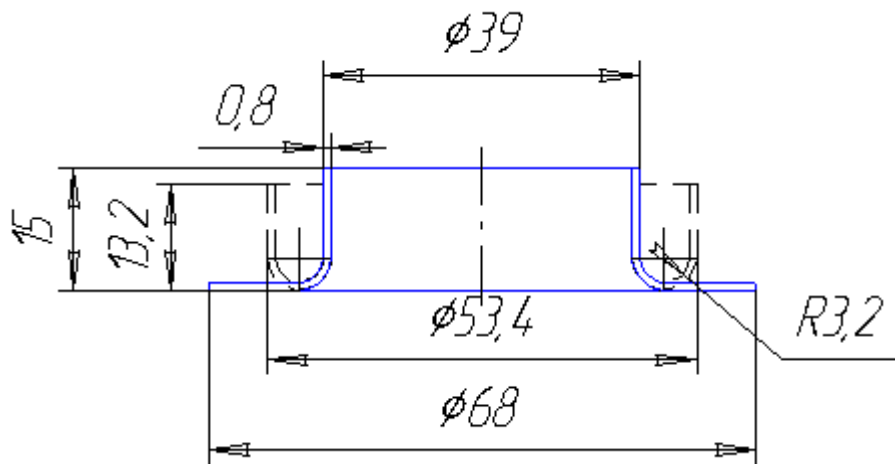


Рисунок 2.9 – Деталь після відбортовки

Щоб отримати заготовку, необхідно провести попереднє відбортовування за зовнішнім діаметром фланця. Виходячи з рівності площ, визначаємо, що відбортовку необхідно зробити на висоту 13,2 мм.

Визначимо зусилля зовнішнього відбортовування [11]

$$P_{отб/нар} = 1,25\pi S \sigma_g R \quad (2.22)$$

де  $R$  - коефіцієнт, що наближено дорівнює 0,2-0,3

$$P_{отб/нар} = 1,25\pi 0,8 \cdot 380 \cdot 0,3 = 358,14H = 0,35кН$$

## 7) Завивка

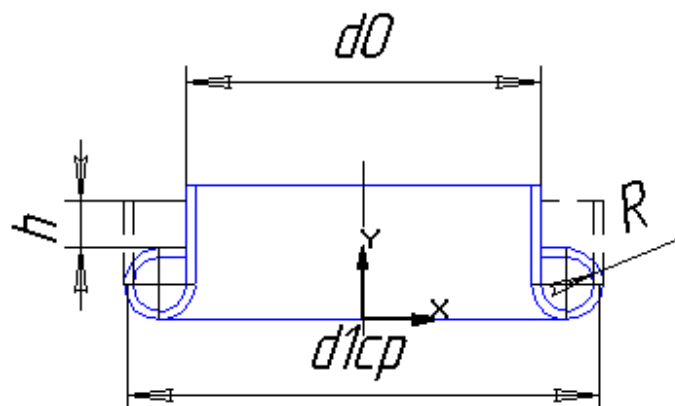


Рисунок 2.10 – Завивка

Під час завивки (рисунок 2.10) відбувається розтягнення металу від до  $\pi d_{1cp}$  до  $\pi d_0$ . Допустиме розтягнення визначається відносним подовженням  $\delta\%$ . Тому умовою завивки є

$$100 \frac{d_{1cp} - d_0}{d_0} \leq 0.75\delta \quad (2.23)$$

Отже, умова завивки виконується.

Визначимо зусилля завивки  $P_{завивки} = 0,59кН$ .

### 2.2.6. Вибір пресового обладнання

Для правильного вибору технологічного обладнання виходимо з таких положень:

1. технологічне зусилля операції або штампа, що поєднує кілька операцій або переходів, має бути дещо меншим за зусилля обладнання;
2. робота на цій операції штампа повинна забезпечуватися потужністю обладнання
3. розміри столу і закритої висоти штампового простору повинні забезпечувати установку і закріплення штампа;
4. величина ходу повзуна повинна відповідати технологічній операції; зручність і безпека обслуговування преса повинні відповідати вимогам техніки безпеки.

Вибір обладнання для деталі "Насадок випускної труби".

Пропонований варіант виготовлення деталі:

Різання бічним ножом, надрізка, витяжка, пробивання, вирубка зі стрічки.

$$\sum P = P_{\text{нож}} + P_{\text{надр}\Sigma} + P_{\text{вит}\Sigma} + P_{\text{проб}\Sigma}$$

$$\sum P = 20,5 + 49,9 + 34,46 + 8,05 = 112,9 \text{кН}$$

Операція відбортовка зовнішня і внутрішня

$$\sum P_{\text{отб}} = P_{\text{отб/вн}} + P_{\text{отб/нар}}$$

$$\sum P_{\text{отб}} = 11,2 + 0,35 = 11,55 \text{кН}$$

Операція завивка

$$P_{\text{завивки}} = 0,59 \text{кН}$$

Вибираємо обладнання

Таблиця 2.2 – Характеристики пресів

Номер операції	Зусилля пресу $P_{\text{ном}}$ кН	Модель пресу	Хід пресу мм	Частота обертання $\text{мин}^{-1}$	Закрита висота пресу
1	630	КД2128	10-100	90	340
2	250	КД2124	5-65	120	250
3	250	КД2124	5-65	120	250

### 2.2.7. Розрахунок трудомісткості виготовлення деталі

Трудомісткість визначаємо за загальномашинобудівними нормативами [7].

Розрахунок трудомісткості для деталі "Насадок випускної труби".

Пропонований варіант штампування деталі зі стрічки

Стрічка сталевая -  $Q = 50 \text{ кг}$ ;  $B_0 = 85 \text{ мм}$ ;  $S = 0,8 \text{ мм}$

Крок просування –  $T = 79,8 \text{ мм}$

Кількість деталей зі стрічки  $n = \frac{l}{T} (\text{шт})$ ;

Довжина стрічки  $l = \frac{Q}{q} (\text{м})$ ;

$q$  - вага 1 пог. метра стрічки в кг;

$$q = B_0 \times S \times 100 \times \gamma (\text{кг});$$

$$q = 8,5 \cdot 0,08 \cdot 100 \cdot 7,8 = 0,53 \text{ кг};$$

$$l = \frac{50}{0,53} = 94,3 \text{ м};$$

$$n = \frac{94,3}{0,0798} = 1181 \text{ штука};$$

$z$  – кількість деталей за один хід пресу,  $z=1$ .

Таблиця 2.3 – Розрахунок часу вирубки заготовки

	Прийоми роботи	№ карти	Позиція індекс	Основний час в хв.	Допоміжний час в хв.
1	Взяти рулон і встановити в пристосування та заправити кінець стрічки в штамп	33	1г		$t_1=4,4$
2	Включити хід преса	1	7а		$t_2=0,022$
3	Штамповати	2	27б	$t_0=0,011$	
4	Просунути стрічку на крок	21	5г		$t_3=0,0102$
5	Зняття відштампованої стрічки	34	1а		$t_4=0,4$

$$T_{ум} = \left[ \frac{(t_0 + t_2)n + t_1 + t_3(n-1) + t_4}{nz} \right] * k$$

$$T_{ум} = \left[ \frac{(0,011 + 0,022) * 1181 + 4,4 + 0,0102(1181 - 1) + 0,4}{1181 * 1} \right] * 1,15 = 0,05$$

*Відбортовка із заготовки*

Таблиця 2.2 – Розрахунок часу відбортовки заготовки

	Прийоми роботи	№ карти	Позиція індекс	Час в хв.	
				$T_0$	$T_B$
1	Взяти заготовку, змастити з одного боку	4	2а		$t_1=0,03$
2	Установити заготовку в штамп	14	5в		$t_2=0,031$
3	Увімкнути хід преса	1	3а		$t_3=0,012$
4	Штамповать	2	37б	$t_0=0,011$	
5	Вийняти деталь зі штампа, відкласти в ящик	56	5г		$t_4=0,036$

$$T_{ум} = (t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \cdot k$$

$$T_{ум} = (0,011 + 0,031 + 0,012 + 0,036) \cdot 1,13 = 0,101 \text{ мин.}$$

*Завивка із заготовки*

Таблиця 2.5 – Розрахунок часу завівки заготовки

	Прийоми роботи	№ карти	Позиція індекс	Час в хв.	
				T <sub>О</sub>	T <sub>В</sub>
1					
2	Установити заготовку в штамп	14	5в		t <sub>1</sub> =0,031
3	Увімкнути хід преса	1	3а		t <sub>2</sub> =0,012
4	Штампувати	2	37б	t <sub>0</sub> =0,011	
5	Вийняти деталь зі штампа, відкласти в ящик	56	5г		t <sub>3</sub> =0,036

$$T_{ум} = (t_0 + t_1 + t_2 + t_3)k$$

$$T_{ум} = (0,031 + 0,012 + 0,036) \cdot 1,13 = 0,089 \text{ мин.}$$

Сумарна трудомісткість для пропонованого варіанта складає

$$\sum T_{ум} = 0,05 + 0,101 + 0,089 = 0,23 \text{ мин}$$



### **3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА**

#### **3.1 Дослідження процесу тонколистового витягування-формування у закриту матрицю**

У цьому параграфі за допомогою розроблених комп'ютерних моделей будуть проведені порівняльні розрахунки відомих процесів квазістатичного та імпульсного витягування, які дадуть змогу розглянути чинники, що впливають на ймовірність виникнення різних типів браку під час витяжці-формуванні тонколистового металу. Буде розглянуто вплив характеру деформування імпульсних і квазістатичних процесів, а також вплив форми і тривалості імпульсу тиску ЕГІ процесу на витяжку-формування тонколистових металів у закриту матрицю.

#### **3.2. Вплив швидкості деформування на процес тонколистового витягування-формування в закриту матрицю**

На прикладі розрахунків квазістатичного та імпульсноговитяжки-формування в закриту матрицю досліджено вплив швидкості деформування на якість одержуваних деталей. Комп'ютерні розрахунки проводилися на прикладі квазістатичного витяжки-формування в жорсткий штамп і ЕГІ витяжки-формування заготовок із латуні Л68 товщиною 0,24 мм у матрицю сферичної форми. Зазор між матрицею і притиском приймався фіксованим і становив  $1,05h_0$ , де  $h_0$  - товщина матеріалу вихідної заготовки, глибина матриці - 35 мм.

Геометричні моделі для витяжки-формування сферичних деталей у жорсткому інструментальному штампі та ЕГІ методом представлені на рисунку 3.1. Квазістатичне навантаження для витяжки-формування в жорсткому штампі задавалося поступальним рухом пуансона.

Згідно з роботами [15] для заготовки з латуні Л68 із заданими характеристиками та геометрією, динамічне розв'язання сходиться до квазістатичного за тривалості розрахунку від 2800 мкс.

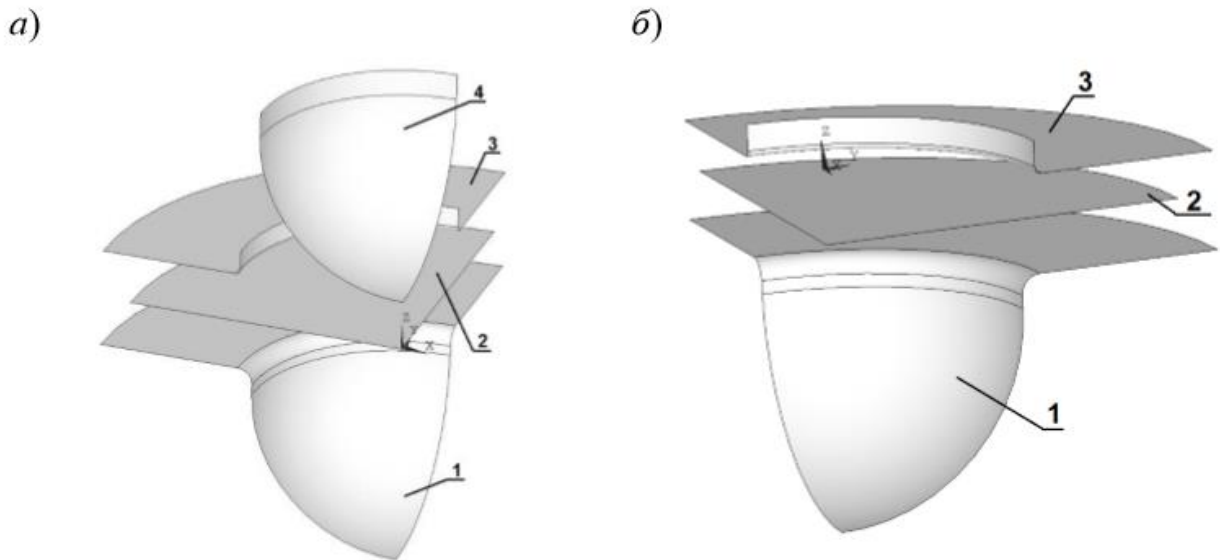


Рисунок 3.1 – Геометричні моделі жорсткого інструментального штампа (а) і оснащення для ЕГІ витяжки-формування в сферичну матрицю (б) до встановлення зазорів: 1 – матриця; 2 – листова заготовка; 3 – притиск; 4 – пуансон

Імпульсний тиск задавався рівномірно за площею вільної частини заготовки залежністю. Розглядався варіант імпульсу тиску з відносним часом наростання тиску  $t^* = 0,1$  за характеристичної тривалості тиску  $\theta = 1200$  мкс. На рисунку 3.2 показано заготовку після витяжки в жорсткому інструментальному штампі з патерном, що визначає проблемні зони вздовж прогину заготовки.

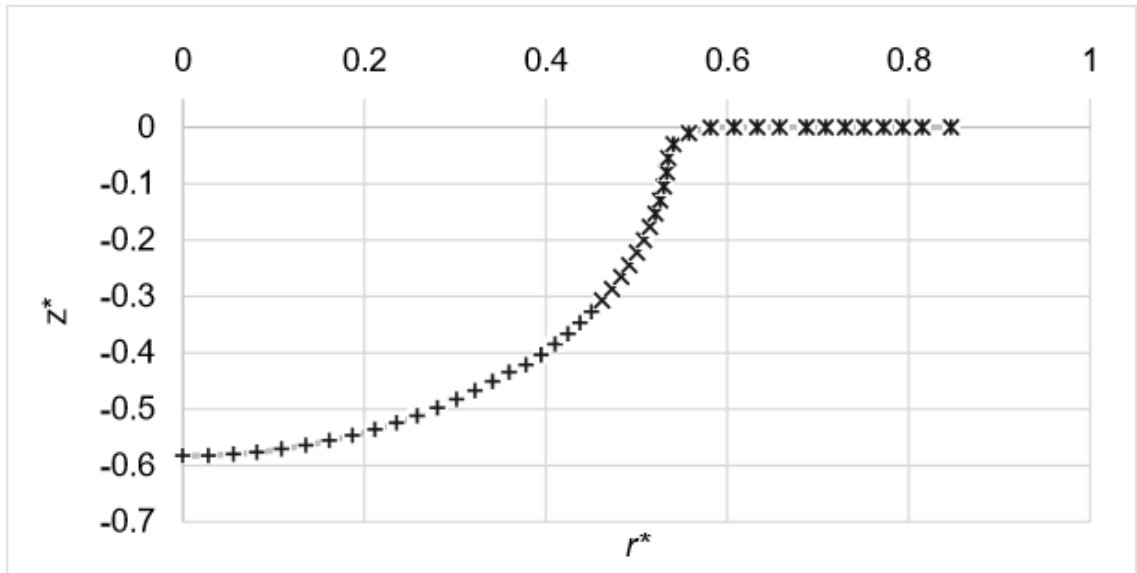


Рисунок 3.2 – Заготівля після витяжки-формування в жорсткому інструментальному штампі: KE модель (а) і крива з розподілом зони вздовж прогину (б): "+" - нормальна формозміна; "X" - ризик складкоутворення; "Ж" – складкоутворення

З рисунка видно, що під час витяжки-формування в жорсткому штампі спостерігається утворення складок на фланці та їхній перехід на циліндричну частину деталі, незважаючи на збільшений діаметр заготовки і жорстке затискання фланця. Також розрахунки показали, що, після зняття навантаження, спостерігається відхід купольної частини заготовки від дна матриці завдяки пружинінню, що зі свого боку позначається на точності деталі (рисунок 2.34).

На рисунку 3.3 також показано графік зміни величини ефективної пластичної деформації в часі в центрі заготовки, отриманої квазістатичною витяжкою-формуванням у жорсткому штампі. У момент часу 2800 мкс задавалася зупинка пуансона і його подальший підйом. Підйом графіка пластичних деформацій у період часу після 2800 мкс обумовлюється пружиненням заготовки. Ефект пружності також можна спостерігати на графіку зміни відносного прогину заготовки, що витягується. Зростання значень пластичних деформацій у період після 2800 мкс на третину від колишніх

значень свідчить про значний вплив ефекту пружності на процес квазістатичного витягування-формування.

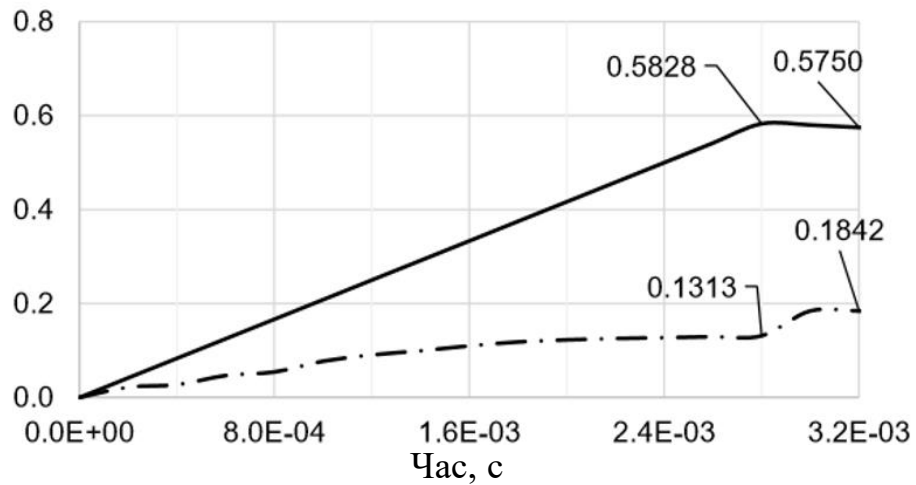


Рисунок 3.3 – Суміщений графік залежності ефективної пластичної деформації в центрі заготовки та зміни відносного прогину заготовки в часі під час витяжки-формування в жорсткому штампі: -- відносний прогин центру заготовки; -- ефективна пластична деформація

На рисунку 3.4 показано заготовку після ЕГІ витяжки-формування з патерном, що визначає проблемні зони вздовж прогину заготовки. Для цього варіанта розрахунку величина амплітудного тиску і його тривалість були підібрані таким чином, щоб листова заготовка заповнювала рельєф сферичної матриці без недоштаповки або зворотного прогину донної частини. З малюнка видно, що зона ймовірного утворення складок зосереджена на фланці та переходить на вільну частину заготовки меншою мірою, ніж під час витягування-формування в жорсткому штампі, тобто інерційність фланця сприяє уповільненню складкоутворення.

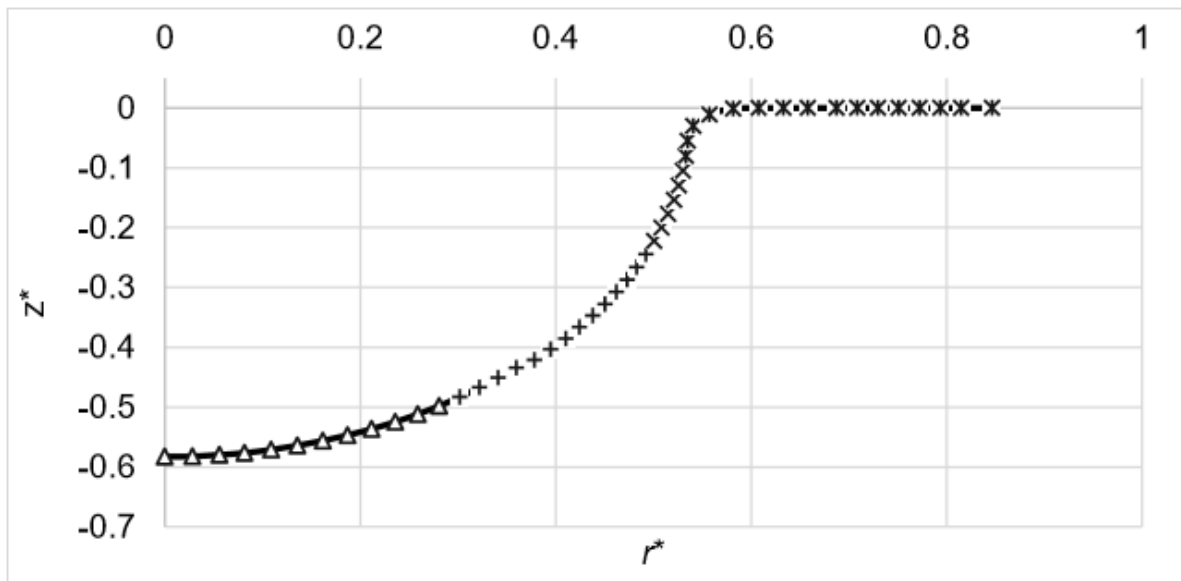


Рисунок 3.4 – Заготовки після ЕГІ витяжки-формування за оптимального рівня енергії: KE модель (а) і крива з розподілом зони вздовж прогину (б): "+" - нормальна формозміна; "X" - ризик складкоутворення; "Ж" – складкоутворення

Зміна розмірів заготовки за рахунок пружинення, як порівняти з квазістатичним витяжкою-формуванням, у жорстких штампах відсутня.

На рисунку 3.4 показано графік зміни величини ефективної пластичної деформації в часі в центрі заготовки, отриманої імпульсною витяжкою-формуванням. Як видно з малюнка, ЕГІ витяжка-формування сприяє більшим пластичним деформаціям, ніж за квазістатичного. Також можна відзначити відсутність пружинення заготовки. Розрахунки показали, що для квазістатичного процесу характерне пружинення заготовки і зміна розмірів після зняття навантаження.

У разі ЕГІ витяжки-формування, за оптимального рівня тиску, пружинення і зміна розмірів заготовки відсутні. Також зазначено, що інерційність фланця під час ЕГІ витяжки-формування сприяє уповільненню складкоутворення. Іншими словами, порівняно з витяжкою-формуванням у жорсткий інструментальний штамп, метод ЕГІ витяжки-формування дає змогу отримати більш точну деталь.

### 3.3. Вплив форми і тривалості імпульсу тиску на процес витяжки-формування в закрити матрицю

На ЕПІ витяжку-формування значний вплив мають амплітуда і тривалість імпульсу тиску, які визначаються параметрами розрядного контуру. Зміна одного або обох параметрів навантаження суттєво впливає на процес.

Згідно з відомими даними [21], імпульс тиску може досягати 130 – 150 мкс. Зазначена тривалість складається з часу наростання тиску та часу падіння, за який амплітудний тиск  $p_0$  падає до нуля. Згідно з роботою [8] частиною часу падіння можна знехтувати, оскільки він не впливає на пластичну деформацію. Виходячи з вищесказаного, можна прийняти таке поняття, як нормальна або середня тривалість тиску близько 100 мкс. Варіюючи параметри, можна отримати короткий імпульс із тривалістю близько 10 мкс і тривалий імпульс близько 1000 мкс і більше. Крім загальної тривалості тиску також можна варіювати час наростання до амплітудного значення. Змінюючи параметр відносного часу наростання  $t^*$ , можна отримати графік із різким наростанням амплітудного значення (рисунок 3.5, а), графік із пологим наростанням амплітудного значення (рисунок 3.5, с), а також проміжні форми (наприклад, рисунок 3.5, в). У зв'язку з цим можна ввести поняття імпульсу з крутим фронтом ( $t^*=0.1$ ), імпульсу із середнім фронтом ( $t^* = 0.3$ ) та імпульсу з пологим фронтом ( $t^* = 0.5$ ) залежно від швидкості наростання амплітудного тиску. Вплив форми і тривалості імпульсного тиску досліджували на прикладі ЕПІ витяжки-формування заготовки з латуні Л68 (0,24 мм) у сферичну матрицю і заготовки з алюмінію 5754 у циліндричну матрицю з плоским дном. Глибина матриць у максимальній точці становила 25 мм.

Під час проведення чисельного експерименту оцінювали вплив на результати розрахунків таких параметрів: - тривалості імпульсу тиску  $\theta$ , що дорівнює 10, 100, 1000 і 2500 мкс; - відносного часу наростання імпульсу тиску, прийнятого  $t^* = 0.1$  і  $t^* = 0.5$ ; - величини амплітудного значення імпульсу тиску  $p_0$ .

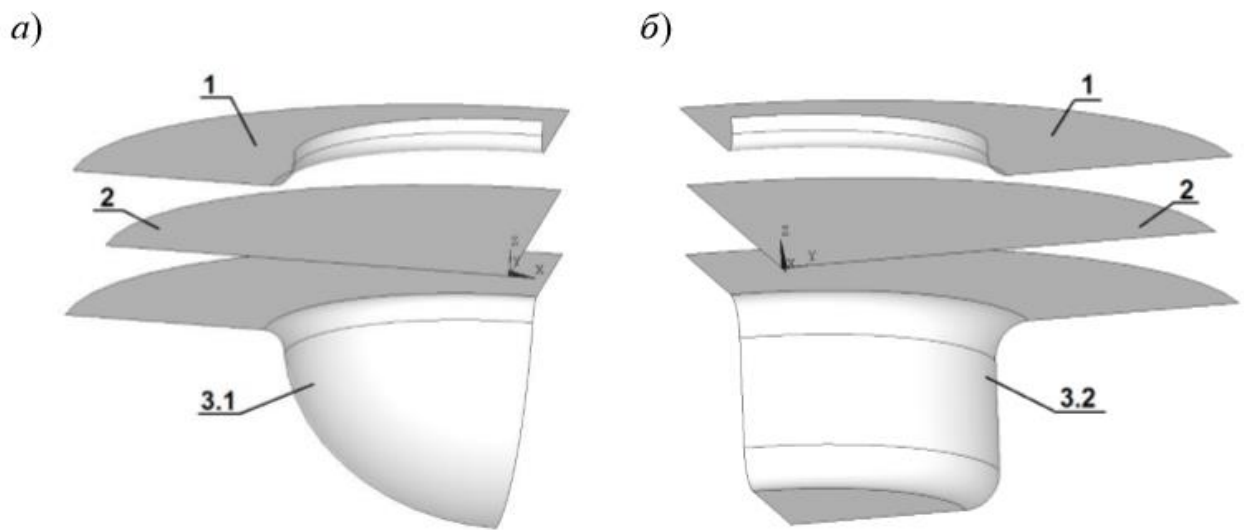


Рисунок 3.5 – Геометричні моделі ЕГІ витяжки-формування: а – у сферичну матрицю; б – у матрицю з плоским дном: 1 – притискач; 2 – листова заготовка; 3.1 – сферична матриця; 3.2 – матриця з плоским дном

*Імпульс тиску тривалістю 10 мкс*

Як показали розрахунки, незалежно від вибору матеріалу, його товщини, діаметра заготовки і форми матриці, за цієї тривалості тиску не відбувається заповнення форми матриці. Обидві заготовки прагнуть до кінчної форми, як показано на рисунках 3.6 - 3.7. Підвищення рівня амплітудного тиску не сприяє збільшенню заповнюваності матриць. Передозування тиску викликає відскік заготовки від дна матриці.

Значне підвищення амплітудного тиску супроводжується тріщиноутворенням і може спровокувати розрив металу. Поблизу заокруглення кромки матриці видно локалізовану зону руйнування через деформації, викликані кінцевою швидкістю поширення пластичних хвиль у матеріалі.

Видно, що за такої тривалості імпульсу тиску, збільшення відносного часу наростання тиску  $t^*$  не впливає на кінцеву форму заготовки та заповнюваність матриці під час деформування як заготовки з латуні Л68 завтовшки 0,24 мм, так і заготовки з алюмінію 5754 завтовшки 1 мм.

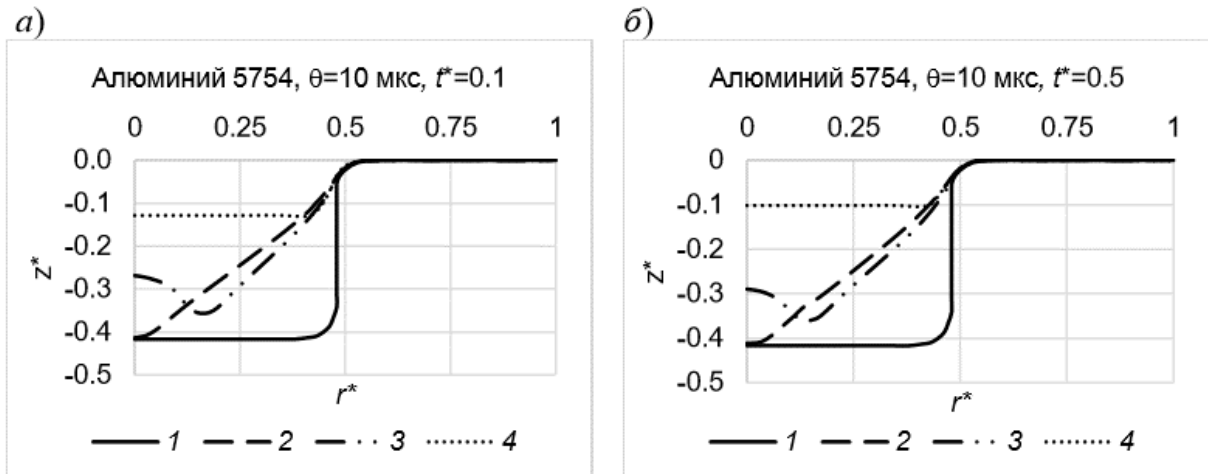


Рисунок 3.6 – Криві відносного профілю заготовки з алюмінію 5754,  $\theta = 10$  мкс:  $t^* = 0,1$  (а) і  $t^* = 0,5$  (б): 1 – профіль матриці; 2 – торкання дна матриці (недоштамповка); 3 – зворотний прогин за малого передозування; 4 – профіль заготовки до моменту руйнування за значного передозування

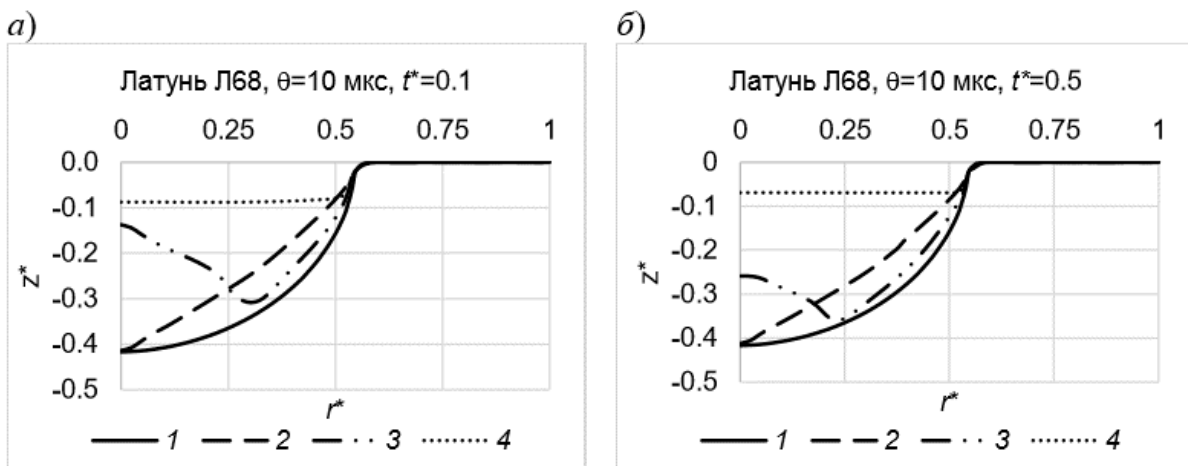


Рисунок 3.7 – Криві відносного профілю заготовки з латуні Л68,  $\theta = 10$  мкс:  $t^* = 0,1$  (а) і  $t^* = 0,5$  (б): 1 – профіль матриці; 2 – торкання дна матриці (недоштамповка); 3 – зворотний прогин за малого передозування; 4 – профіль заготовки до моменту руйнування за значного передозування

Також слід зазначити, що під час витяжки-формування заготовки за короткого імпульсу тиску існує ризик руйнування матеріалу заготовки вздовж заокруглення кромки матриці навіть без передозування енергії, що може бути



спричинено малою товщиною матеріалу. За тривалості тиску 10 мкс неможливо заповнити рельєф матриці.  $\theta$  – імпульс тиску тривалістю 100 мкс

Розрахунки показали, що за тривалості тиску 100 мкс, форма заготовки трохи заокруглюється, однак, повного заповнення матриці також не відбувається (рисунки 3.8 – 3.9). Також можна відзначити збільшення зони Wrinkling tendency, як порівняти з розрахунком за тривалості імпульсу 10 мкс.

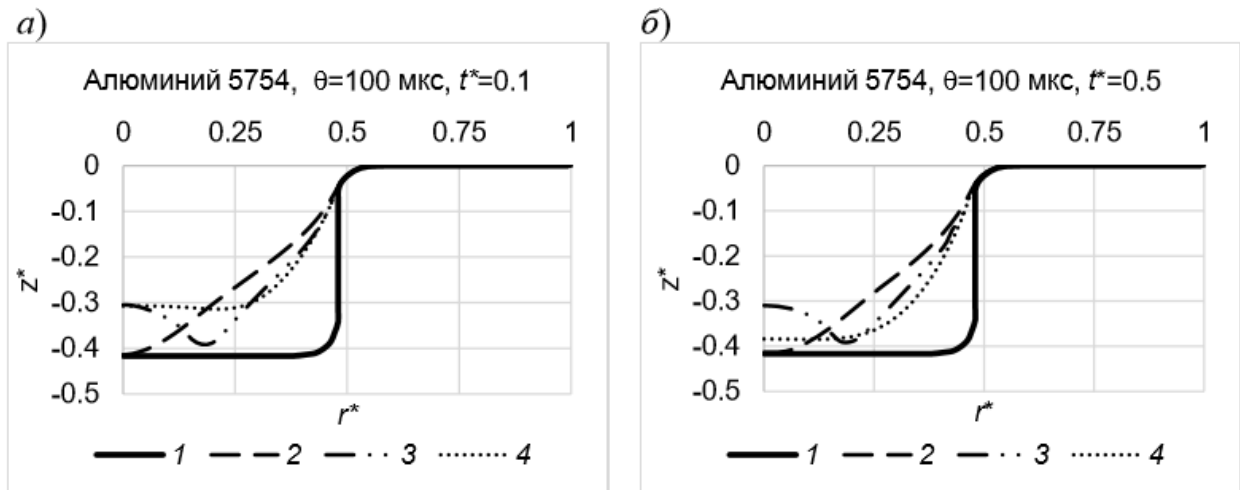


Рисунок 3.8 – Криві відносного профілю заготовки з алюмінію 5754,  $\theta = 100$  мкс:  $t^* = 0,1$  (а) і  $t^* = 0,5$  (б): 1 – профіль матриці; 2 – торкання дна матриці (недоштамповка); 3 – зворотний прогин за малого передозування; 4 – профіль заготовки до моменту руйнування за значного передозування

На цей ефект не впливає геометрія заготовок і оснащення, але він пов'язаний зі збільшенням тривалості дії навантаження. При збільшенні амплітудного тиску також, як і при короткому імпульсі, з'являється ймовірність відскоку заготовки від дна матриці.

Значне передозування енергії може призвести до розриву матеріалу заготовок унаслідок локалізації пластичних деформацій через кінцеву швидкість поширення пластичних хвиль. Зона руйнування матеріалу зміщується на циліндричну частину заготовки.

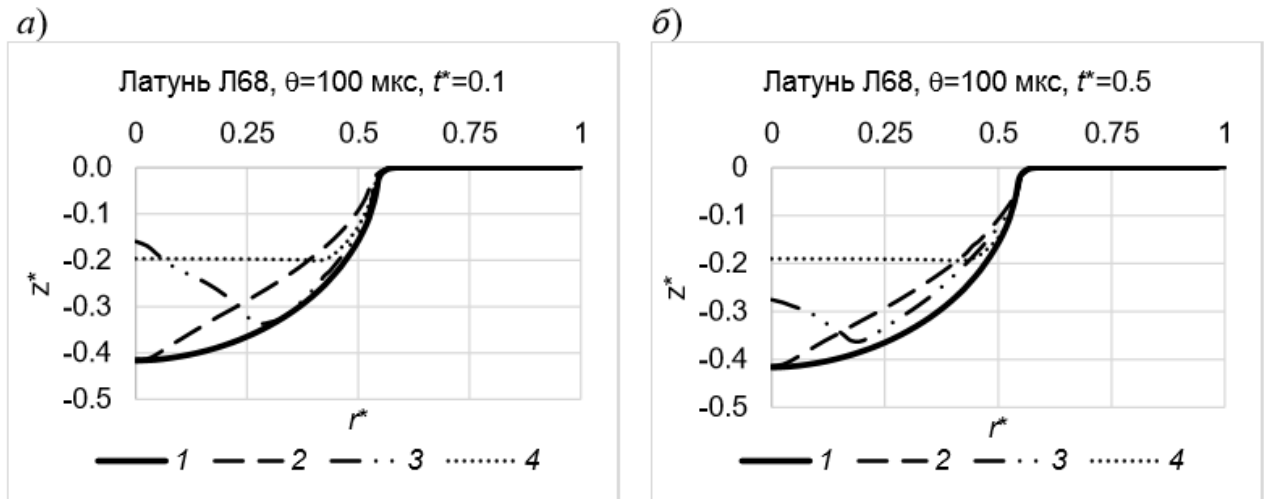


Рисунок 3.9 – Криві відносного профілю заготовки з латуні Л68,  $\theta = 100$  мкс:  $t^* = 0,1$  (а) і  $t^* = 0,5$  (б): 1 – профіль матриці; 2 – торкання дна матриці (недоштамповка); 3 – зворотний прогин за малого передозування; 4 – профіль заготовки до моменту руйнування за значного передозування

За такої тривалості імпульсу тиску, збільшення відносного часу наростання тиску  $t^*$  не чинить істотного впливу на кінцеву форму заготовки, а заповнити рельєф матриці також не представляється можливим.

#### *Імпульс тиску тривалістю 1000 мкс*

За такої тривалості тиску заокруглюється форма одержуваної деталі та підвищується заповнюваність форми матриці, особливо в разі вибору відносного часу наростання  $t^*=0,5$  (рисунки 3.10 - 3.11). Збільшення амплітудного тиску за такої тривалості імпульсу також може спричинити відскік заготовки від дна матриці, однак за деяких умов згодом зворотний прогин заготовки може розгладитися та набути форми дна матриці в другій половині дії імпульсу тиску (рисунок 3.11). Значне передозування тиску, як і за коротших імпульсів, призводить до руйнування металу заготовки.

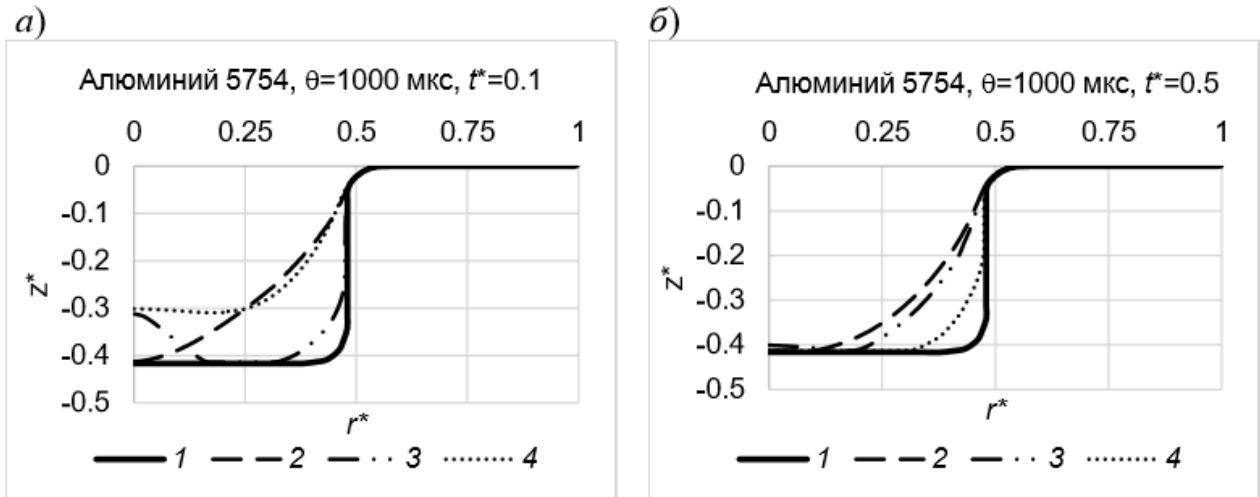


Рисунок 3.10 – Криві відносного профілю заготовки з алюмінію 5754,  $\theta = 1000$  мкс:  $t^* = 0,1$  (а) і  $t^* = 0,5$  (б): 1 – профіль матриці; 2 – торкання дна матриці (недоштамповка); 3 – зворотний прогин за малого передозування; 4 – профіль заготовки до моменту руйнування за значного передозування

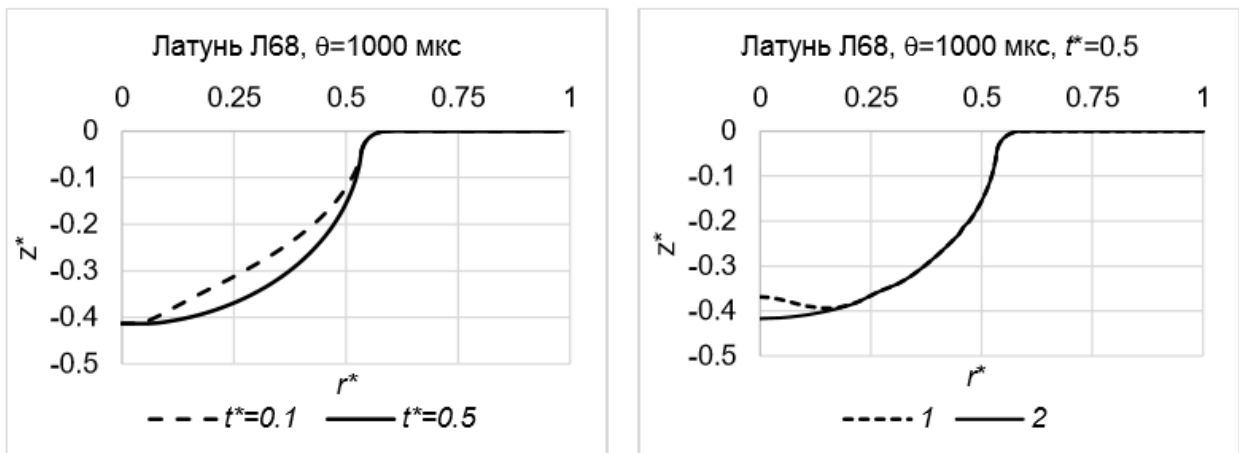


Рисунок 3.11 – Криві відносного профілю заготовки з латуні Л68, отримані без передозування енергії,  $\theta = 1000$  мкс

Якісну оцінку заповнюваності матриці визначали за параметром  $\xi$ , який обчислювали за формулою. За максимального заповнення профілю матриці параметр  $\xi \rightarrow 1$ . У таблицях 3.1 – 3.3 наведено значення параметра, що визначає заповнення матриці  $\xi$  залежно від тривалості тиску  $\theta$ , і відносного часу наростання  $t^*$  для заготовок з алюмінію 5754 і латуні Л68.

Таблиця 3.1 – Параметр заповнення  $\xi$  циліндричної матриці глибиною 25 мм для заготовки з алюмінію 5754

	10 мкс	100 мкс	1000 мкс	2500 мкс
$t^* = 0,1$	0,779	0,794	0,809	0,831
$t^* = 0,5$	0,785	0,809	0,834	0,847

Таблиця 3.2 – Параметр заповнення  $\xi$  циліндричної матриці глибиною 15 мм для заготовки з алюмінію 5754

	1000 мкс	2500 мкс
$t^* = 0,1$	0,846	0,858
$t^* = 0,5$	0,958	0,990

Таблиця 3.3 – Параметри заповнення  $\xi$  сферичної матриці для заготовки з латуні Л68

	10 мкс	100 мкс	1000 мкс	2500 мкс
$t^* = 0,1$	0,906	0,934	0,950	0,952
$t^* = 0,5$	0,908	0,944	0,989	0,991

Таким чином, шляхом варіювання величини амплітудного тиску, відносного часу наростання і характеристичної тривалості імпульсу тиску, було розглянуто вплив форми імпульсу тиску на процес ЕГІ витяжки-формування в закриті матриці різної форми заготовок з латуні Л68 і алюмінію 5754, а також розглянуто вплив параметрів навантаження на ймовірність виникнення браку. Розрахунки показали, що збільшення тривалості імпульсу сприятливо позначається на процесі витяжки заготовок, даючи змогу домогтися повнішого заповнення форми матриці. При збільшенні тривалості тиску також знижуються вимоги до точності дозування енергії, оскільки зменшується ймовірність відскоку матеріалу від дна матриці і подальшого руйнування. Крім того, під впливом більш тривалого імпульсу реалізується підтяжка фланця в порожнину матриці.

Зміни фронту тиску також виявляються істотними при використанні більш тривалого імпульсу. Використання пологого фронту з часом наростання тиску  $t^*=0,5$  дало змогу домогтися найбільш повного заповнення форми матриці, як порівняти з  $t^*=0,1$ . Варто зазначити, що для заготовки з алюмінію 5754 за тривалості тиску в 2500 мкс динамічне рішення збігається до квазістатичного і, відповідно, призводить до прояву ефекту пружності. Для заготовки з латуні Л68 зазначена тривалість у 2500 мкс не призводить до подібного сходження. Тому збільшення тривалості тиску рекомендується проводити до певної межі, тобто до сходження динамічного рішення до квазістатичного.

### 3.4. Проектування інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування

Пропонована інтенсифікована технологія (рисунок 3.12) передбачає використання інерційного розгладжувача замість традиційного фіксованого притиску. Це рішення спрямоване на усунення шкідливого впливу складкоутворення на процес витяжки-формування і збільшення ступеня витяжки за рахунок додаткового використання ресурсу пластичності фланця заготовки.

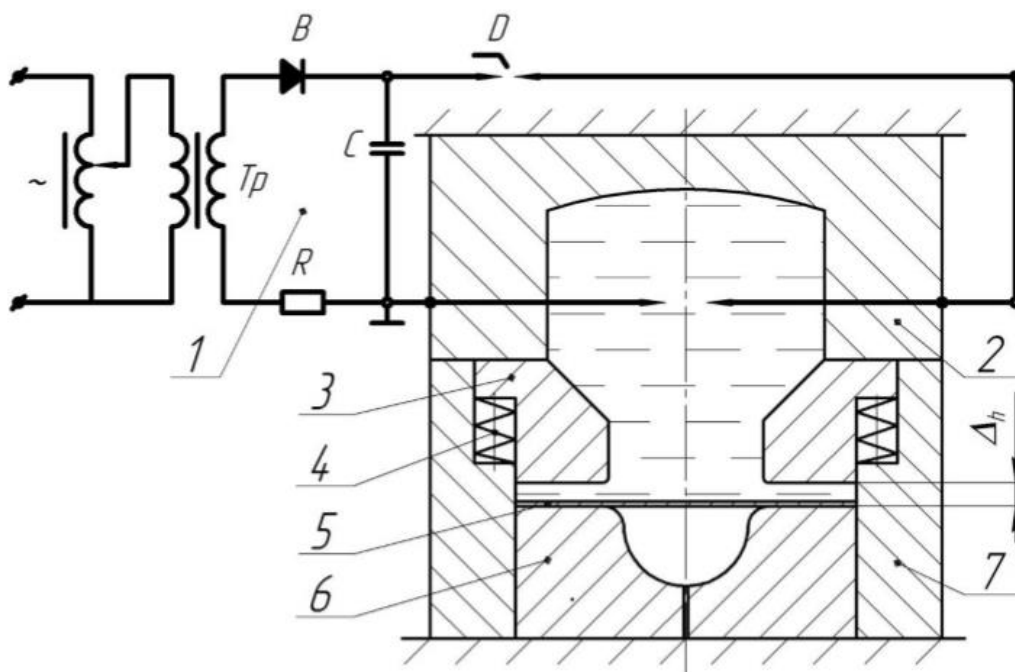


Рисунок 3.12 – Схема інтенсифікованої ЕГД витяжки-формування з додатковим використанням ресурсу пластичності фланця заготовки: 1 – ЕГД-установка; 2 – розрядна камера; 3 – інерційний розгладжувач; 4 – пружний елемент; 5 – листова заготівля; 6 – формозмінювальна матриця; 7 – зовнішня обойма; D – розрядник; C – конденсаторна батарея; R – обмежувальний опір; Tг – трансформатор; Re – випрямляч

Технологічне оснащення складається з розрядної камери 2 з електродною системою, що містить позитивний і негативний електроди, з'єднані конденсаторною батареєю C, джерелом високовольтного живлення і розрядником D; інерційного розгладжувача 3, пружного елемента 4, матриці 6 і зовнішньої обойми 7. В обойму встановлюється матриця і пружний елемент. Заготовку з листового металу встановлюють на матрицю і фіксують розгладжувачем, який підтримується пружним елементом таким чином, що між розгладжувачем і матрицею створювався збільшений зазор  $\Delta_n$ . Розрядну камеру з електродною системою заповнюють робочою рідиною. Пристрій розміщують між плитами гідравлічного преса.

Також існує варіант запропонованої схеми з нижнім розташуванням розрядної камери відносно заготовки, проте основний принцип дії та конструкція технологічного пристрою не мають суттєвих відмінностей. Етапи формозміни детально представлено на рисунку 3.13. Початкове положення заготовки та оснащення показано на рисунку 3.13, а. Витяжка заготовки здійснюється таким чином: під час розряду конденсаторної батареї, між електродами утворюється канал розряду і низькотемпературна плазма високого тиску. Розширення плазми зі свого боку утворює хвилю тиску, яка впливає на центральну частину листової заготовки (рисунок 3.13, б), витягаючи метал всередину матриці. Під дією навантаження фланець також частково зміщується до центру. Завдяки розтягувальним напруженням у радіальному напрямку і стискальним напруженням у тангенціальному на фланцевій частині заготовки утворюються складки заввишки, меншій за величину зазору (рисунок 3.13, в),

які перешкоджають течії металу і ускладнюють подальшу формозміну. Той самий імпульс тиску, що впливає на заготовку, також діє на інерційний розгладжувач. Оскільки розгладжувач значно перевищує заготовку за масою, то розганяється повільніше і починає рухатися з деяким запізненням (рисунок 3.13, г). Інерційний розгладжувач розганяється, після чого вдаряє по фланцевій частині заготовки і тим самим усуває складки, що утворилися.

Після удару об заготовку відбувається відскік, і розгладжувач повертається у вихідне положення за допомогою пружного елемента (рисунок 3.13, д). Оскільки складки на фланці усунуто, відбувається додаткова формозміна заготовки. Під час наступних розрядів процес повторюється без перевстановлення заготовки, незалежно від кількості використуваних імпульсів тиску. Пропонована інтенсифікована ЕГІ витяжка-формування залежить від безлічі чинників: схеми навантаження, типу матриці, товщини заготовки, маси розгладжувача, форми і тривалості тиску, величини початкового зазору та ін. Створення комп'ютерної моделі досліджуваного процесу вимагає попередніх розрахунків, де зазначені чинники будуть розглянуті окремо і в комплексі.

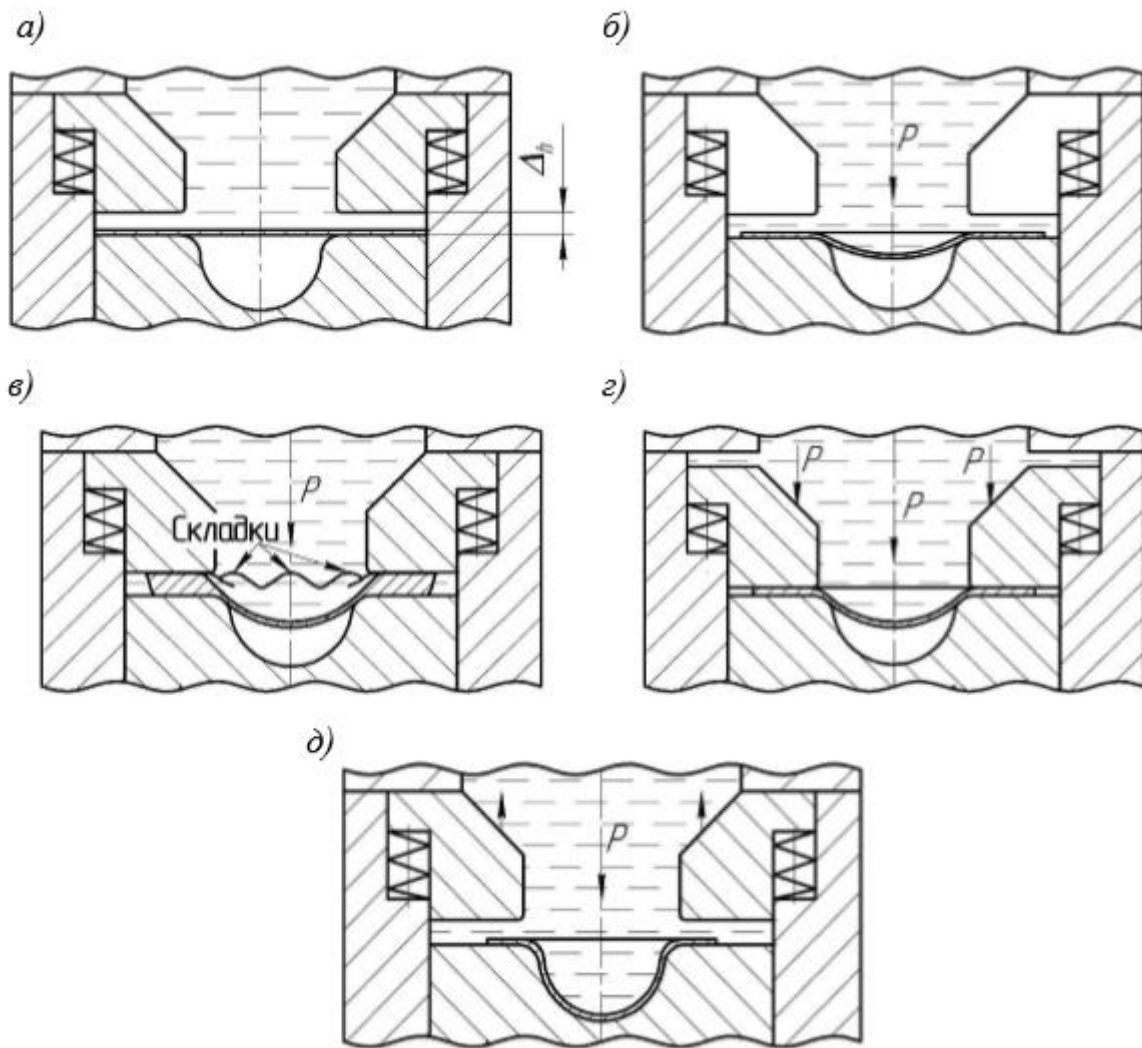


Рисунок 3.13 – Етапи формозміни за пропонованою інтенсифікованою схемою: а – вихідне положення заготовки та оснащення; б – формозміна центральної частини заготовки; в – утворення складок на фланцевій частині заготовки, порушення течії металу; г – рух інерційного розгладжувача та розгладжування гофрів на фланці; д – додаткова формозміна заготовки без опору гофрів

З урахуванням усіх розглянутих раніше завдань, пов'язаних із комп'ютерним моделюванням, було створено розрахункові моделі досліджуваного процесу, які враховують низку фізико-механічних особливостей процесів, дають змогу варіювати ключові параметри процесу, доволі прості у заданні початкових даних, і водночас дають змогу отримати результати з прийнятною для інженерних розрахунків точністю.



За основу взято схему навантаження з верхнім розташуванням розрядної камери відносно заготовки. Основні зміни комп'ютерної моделі досліджуваного процесу від традиційної ЕГІ витяжки-формування полягають у тому, що фіксований притискач замінюється рухомим інерційним розгладжувачем, який може вільно переміщуватися за віссю  $z$  (за віссю дії навантаження).

При створенні розрахункової моделі, виходячи з умов симетрії, необхідно і достатньо розглядати одну четверту заготовки, матриці і розгладжувача. На рисунку 3.14 представлено 1/4 моделі інтенсифікованої ЕГІ витяжки, обмежену площинами симетрії із заданими граничними умовами. Модель складається з чотирьох основних елементів, позначених на малюнку: 1 – листова заготовка, 2 – матриця, 3 – інерційний розгладжувач, 4 – обмежувач. На рисунку 3.29 показано геометрію моделі з відкритою матрицею; для розрахунку інших технологічних ЕГІ процесів форму матриці можна змінювати.

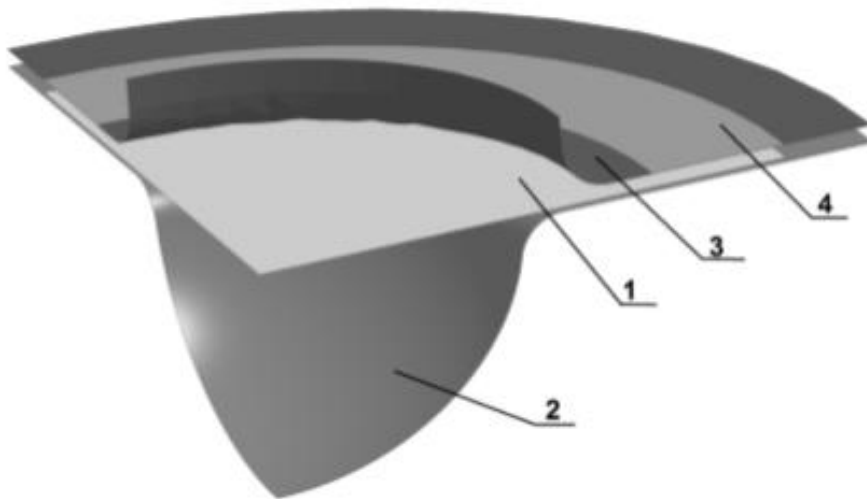


Рисунок 3.14 – Геометрична модель інтенсифікованої ЕГІ витяжки тонколистового й особливо тонколистового металу: 1 – листова заготовка; 2 – матриця; 3 – інерційний розгладжувач; 4 – обмежувач

Усі елементи моделі представлені багат шаровими моментними оболонками. Матеріал оснащення приймали жорстким, для заготовки обирали

модель з використанням інтегрального коефіцієнта динамічності для врахування впливу швидкостей деформування. Заготівлю розбивали на трикутні елементи. Обирали контактні умови для забезпечення найкращих умов взаємодії заготовки та жорсткого інструменту. Контактним алгоритмом враховувалася товщина оболонок, а також перешкоджалося проникненню заготовки в інструмент.

### **3.5 Ефективність ЕГІ витяжки-формування**

Ефективність пропонованого методу витяжки, як порівняти з традиційним ЕГІ методом, показано на прикладі порівняльних розрахунків процесу ЕГІ витяжки-формування тонколистових круглих у плані заготовок із латуні Л68 товщиною 0,24 мм у відкриту матрицю, а також натурних експериментів. Комп'ютерні розрахунки дали змогу зафіксувати момент взаємодії розгладжувача з фланцем заготовки та усунення складок і показали можливість одержання деталей більшої висоти (на 24,1 %) із меншим стоншенням у центральній частині (на 2,1 %). Результати комп'ютерних розрахунків підтверджені експериментально. На рисунку 3.15 наведено приклади отриманих заготовок із латуні Л68, отриманих методом традиційного та інтенсифікованого ЕГІ витяжки-формування. Максимальна висота деталей з латуні Л68, отриманих методом традиційної ЕГІ витяжки-формування, становила 22,1 мм. У разі завдання більш високого рівня енергії відбувалося порушення суцільності купола заготовки (рисунок 3.15, б). Метод інтенсифікованої ЕГД витяжки-формування дозволив отримати деталі з висотою купола 27,5 мм без руйнування матеріалу (рисунок 3.15, в).



Рисунок 3.15 – Заготовки з латуні Л68, отримані методом ЕГІ витяжки-формування: а – традиційна ЕГІ на межі можливостей; б – традиційна ЕГІ за передозування енергії; в – інтенсифіковане ЕГІ витяжка-формування

Таким чином, метод інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування з додатковим використанням ресурсу пластичності фланця дає змогу отримати деталі більшої висоти без додаткового стоншування та усуває складки, що утворилися на фланці, що робить пропонований метод ефективнішим, якщо порівнювати його з традиційною ЕГІ витяжкою-формуванням.

### **3.6. Технологічні можливості ЕГД витяжки-формування**

Технологія інтенсифікованої ЕГД витяжки-формування з додатковим використанням ресурсу пластичності фланця і якість одержуваних деталей комплексно залежать від величини заданого зазору між матрицею і розгладжувачем ( $\Delta h$ ), маси розгладжувача ( $M_{Pa}$ ) і товщини матеріалу заготовки

( $h_0$ ). Збільшення початкового зазору  $\Delta h$  між матрицею і розгладжувачем веде до збільшення висоти складок, які утворюються в першій половині процесу формоутворення. Якщо висота складок на фланці заготовки досягає деякого критичного значення, то їх повне усунення за допомогою удару розгладжувача може виявитися неможливим.

З іншого боку, якщо величина зазору  $\Delta h$  є недостатньою, розгладжувач не має необхідного простору для відскоку, відбувається кілька затухаючих ударів об фланець, потім зупинка розгладжувача, після чого процес деформації не відрізняється від традиційної ЕГІ витяжки-формування з жорстким доробком. Також на час розгону і силу удару розгладжувача (тобто здатність усунення складок) безпосередньо впливає маса розгладжувача. Недостатня маса призводить до того, що розгладжувач починає рухатися з незначним запізненням, б'ється об фланець заготовки серією з кількох коротких ударів з відскоками, які можуть перешкоджати формоутворенню. Надлишкова маса призводить до того, що розгладжувач починає рухатися зі значним запізненням, б'ється об фланець після зупинки заготовки, через що не відбувається додаткової формозміни, а отже, можливе жолоблення та навіть порушення суцільності фланця.

У зв'язку з перерахованим вище, для оптимізації технології проводилися комп'ютерні розрахунки, де варіювалася величина зазору, маса розгладжувача, а також використовувалися заготовки з металів різних марок і товщини.

У таблицях представлено розрахунок досліджуваного процесу витяжки-формування листових заготовок з латуні Л68 (таблиця 3.4). У чисельних експериментах зазор між матрицею і розгладжувачем варіювався в діапазоні від  $1,05h_0$  до  $2,6h_0$ , маса розгладжувача варіювалася в діапазоні  $M_{Pa} = (10 - 1000) \times M_z$ , де  $M_z$  – маса заготовки.

Таблиця 3.4 – Результати чисельних експериментів для латуні Л68

$M_{Pa}$	$1,05h_0$	$1,1h_0$	$1,2h_0$	$1,4h_0$	$1,6h_0$	$1,8h_0$	$2h_0$	$2,2h_0$	$2,4h_0$	$2,6h_0$
----------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	--------	----------	----------	----------

10×Мз	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр	Пр
50×Мз	Пр	Пр	О	О	О	О	О	О	О	О
100×Мз	Пр	Пр	О	О	О	О	О	О	О	О
200×Мз	Пр	Пр	+	+	+	+	+	+	Ск	Ск
300×Мз	Пр	Пр	+	+	+	+	+	+	Ск	Ск
500×Мз	Пр	Пр	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
1000×Мз	Пр	Пр	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1

Умовні позначення: "Пр" – ефект притискання і деградація процесу до рівня традиційної ЕГІ витяжки-формування; "О" – серія множинних ударів розгладжувача об фланець і перешкода формоутворенню; "Ск" – утворення складок великої висоти, що не розгладжуються; "<1" – удар розгладжувача після зупинки заготовки, додаткова формозміна відсутня; "+" – процес витяжки-формування відбувається з додатковим формоутворенням і усуненням складок.

На основі комп'ютерних розрахунків було сформульовано рекомендовані діапазони значень товщини металу заготовки, величини зазору між матрицею і розгладжувачем, величина маси розгладжувача і параметри навантаження:

1. Товщина матеріалу:  $h_0 \in [0,2...1]$  мм;
2. Зазор між матрицею і розгладжувачем:  $\Delta_h = (1,2...2,2)h_0$ ;
3. Маса розгладжувача:  $M_{pa} = (200...300)Mз$ ;
4. Рекомендовані параметри навантаження заготовки: -

Тривалість імпульсу:  $\theta > 1000$  мкс. Час наростання:  $t^* = 0,5$ . У зазначеному діапазоні значень параметрів пропонується технологія інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування дає змогу здійснити додаткову формозміну заготовки та усуває складки, що утворилися на фланці.

### 3.7. Висновки

1. Розроблено методику проектування процесів витяжки-формування листових металів на основі комп'ютерного моделювання, що дає змогу прогнозувати складкоутворення та порушення суцільності матеріалу, заповнення форми матриці та на основі цього проводити оцінку можливості виготовлення деталі обраним методом.

2. Запропоновано нову технологію інтенсифікованої витяжки-формування тонколистових металів за рахунок додаткового використання ресурсу пластичності фланця заготовки. В основі запропонованої технології заміна нерухомого притискача інерційним розгладжувачем і завдання збільшеного зазору між матрицею і фіксувальним елементом.

3. Методом ЕГІ витяжки-формування виготовлено низку зразків деталей з латуні Л68 і алюмінію 5754.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

У даній роботі проведено розробку ефективних конструкцій для отримання деталей з плоских заготовок на електрогідроімпульсних пресах і установках. Цей спосіб передбачає отримання деталей унаслідок виникнення високих тисків при імпульсному електричному розряді в рідині. Електрогідроімпульсна установка для обробки металів тиском є одночасно високовольтним пристроєм, джерелом шуму і джерелом електромагнітних випромінювань. У даній роботі ухвалено конструктивні рішення, які дадуть змогу захистити працівника від небезпечних чинників, що призводять до травматизму та професійних захворювань. Загалом розроблена конструкція задовольняє загальним вимогам безпеки до виробничого обладнання. Також було розроблено процес отримання деталі на кривошипному пресі. Штампуванням на пресах деталі виходять досить швидко. При штампуванні на пресах безліч варіантів розташування обладнання на цеховій ділянці.

Процес штампування на пресах істотно спрощується автоматичною подачею вихідних заготовок із бункерів у штампувальну зону. Небезпечні та шкідливі фактори, що виникають у ковальсько-штампувальному цеху, насамперед зумовлені застосуванням обладнання і робочими засобами. До основного штампувального обладнання відносять кривошипні преси, піч для загартування.

Крім основного обладнання в ковальсько-штампувальних цехах застосовують допоміжне (засоби механізації, підіймально-транспортне, вентилятори, повітрорудки, мастилоохолоджувальні пристрої) і контрольне (прилади контролю геометрії виробів, складу атмосфери).

### **4.1 Джерела небезпеки**

#### **4.1.1 Джерела механічної небезпеки**

Основне джерело механічної небезпеки в установці - захисний кожух, що опускається. Небезпека полягає в тому, що під час руху кожуха оператор може бути травмований. [16] Небезпеку становлять і частини установки, що обертаються (вал двигуна, шків, приводний ремінь), дотик до яких може призвести до травм.

#### **4.1.2 Джерела електричної небезпеки**

Основними джерелами електричної небезпеки є: високовольтне обладнання, двигун, силовий електричний кабель. Силовий електричний кабель підводить до високовольтного обладнання та електродвигуна струм напругою до 3 80В. Пошкодження ізоляції кабелю або двигуна може призвести до того, що неструмоведучі частини установки опиняться під напругою, дотик до них може призвести до електротравм.

Високовольтне обладнання (високовольтний трансформатор, імпульсні конденсатори, високовольтні комутатори тощо) володіють такими параметрами: напруга від 5 до 70 кВ, струм 10-250 кА. Неполадки в цьому обладнанні можуть призвести до короткого замикання, а також до того, що неструмоведучі частини можуть опинитися під напругою. Імпульсні конденсатори також небезпечні тим, що можуть деякий час зберігати електричний заряд або накопичувати його внаслідок впливу електромагнітних полів від атмосферної електрики або поруч діючих установок, що може призвести до ураження електричним струмом. [16]

#### **4.2. Заходи, проведені для повної або часткової ліквідації небезпечних виробничих факторів**

Для запобігання небезпеки травмування робітників унаслідок опускання (підняття) захисного кожуха, пульт керування установкою розташовується окремо від технологічного обладнання на відстані 3,5 метрів.



#### 4.2.1. Запобігання електричній небезпеці

Відносно електричної безпеки проведено заходи, передбачені загальними вимогами безпеки до виробничого обладнання, встановленими ДСТУ 12.2.003-86, а також правилами експлуатації електроустановок напругою вище 1000 В, технічними умовами безпеки під час роботи на електрогідроімпульсних установках для штампування металів. Згідно з вимогами цих документів, електрогідроімпульсні установки для обробки металів тиском оснащені спеціальними пристроями для безпечної роботи. Високовольтне обладнання електрогідроімпульсних пресів розміщено в окремих блоках, закритих металевими кожухами. Це зроблено з метою: унеможливлення доступу до високовольтного обладнання під час роботи, захисту персоналу, що обслуговує, у разі коротких замикань усередині самого обладнання або між високовольтними виводами, захисту від електромагнітного випромінювання.

На дверях кожухів встановлені кінцеві вимикачі, що відключають установку від мережі під час відкривання дверей. Внаслідок того, що під час вимкнення установки імпульсні конденсатори можуть певний час зберігати електричний заряд або ж, будучи незакороченими, накопичують його внаслідок впливу електромагнітних полів від атмосферної електрики або установок, які діють поряд, у розрядному контурі встановлені захисні блокування згідно з ДСТУ 12.2.007.3-86. З метою підвищення надійності закорочування і заземлення конденсаторів встановлено три паралельно приєднані блокування. Для отримання інформації про ввімкнення генератора, установку оснащено звуковою і світловою сигналізацією. Швидке зняття живлення з установки в аварійному режимі здійснюється за допомогою кнопки "Стоп". Електрообладнання та конструкції установок мають надійне заземлення згідно з ДСТУ 12.2.017-86. У низьковольтній частині електричної схеми для захисту електрообладнання від перенапруги встановлено пробивні запобіжники та

захисні ємності. В електрогідроімпульсних пресах для повного зняття напруги; установки встановлені пристрої, що вимикаються, з розщеплювачами. Горизонтальний і вертикальний струмопроводи, що знаходяться в розрядній камері, з'єднаній безпосередньо зі штампом, захищені ізоляторами (гума, поліуретан). Це перешкоджає проникненню струму в неструмоведучі частини штампа.

На дверях кожухів встановлені кінцеві вимикачі, що відключають установку від мережі під час відкривання дверей. Внаслідок того, що під час вимкнення установки імпульсні конденсатори можуть певний час зберігати електричний заряд або ж, будучи незакороченими, накопичують його внаслідок впливу електромагнітних полів від атмосферної електрики або установок, які діють поряд, у розрядному контурі встановлені захисні блокування згідно з ДСТУ 12.2.007.3-86. З метою підвищення надійності закорочування і заземлення конденсаторів встановлено три паралельно приєднані блокування. Для отримання інформації про ввімкнення генератора, установку оснащено звуковою і світловою сигналізацією. Швидке зняття живлення з установки в аварійному режимі здійснюється за допомогою кнопки "Стоп". Електрообладнання та конструкції установок мають надійне заземлення згідно з ГОСТ 12.2.017-86. У низьковольтній частині електричної схеми для захисту електрообладнання від перенапруги встановлено пробивні запобіжники та захисні ємності. В електрогідроімпульсних пресах для повного зняття напруги; установки встановлені пристрої, що вимикаються, з розщеплювачами. Горизонтальний і вертикальний струмопроводи, що знаходяться в розрядній камері, з'єднаній безпосередньо зі штампом, захищені ізоляторами (гума, поліуретан). Це перешкоджає проникненню струму в неструмоведучі частини штампа.

#### **4.2.2. Шум на робочому місці**

Робота електрогідроімпульсної установки, що працює за принципом міжелектродного проміжку, супроводжується інтенсивним шумом, величина якого за великих потужностей розряду стає неприпустимою з погляду безпеки обслуговуючого персоналу. Цей шум має характер вибуху. Засоби і методи захисту підрозділяються на засоби методи колективного захисту та індивідуального захисту (ДСТУ 12.1.029-80). Найефективнішим заходом боротьби з шумом є звукоізоляційний захист елементів і вузлів, що видають цей шум. Прес встановлюється в окремому приміщенні. Звуки, що супроводжують процес формоутворення, ізолюються розрядними камерами. Пульт управління пресом винесено на 3,5 метра від джерела шуму. Як індивідуальні засоби захисту застосовуються протишумові навушники, вкладиші (біруші), шоломи тощо. [18] Максимальний рівень звуку в момент проходження імпульсу не перевищує 125 децибел під час вимірювань на тимчасовій характеристиці "Імпульс". Імпульси подаються з частотою 5-6 імпульсів на годину. Загальний рівень шуму на робочому місці для цього цеху не повинен перевищувати нормативів - 85 децибел.

#### **4.2.3. Випромінювання на робочому місці**

Електрогідроімпульсна обробка металів супроводжується електромагнітним випромінюванням, інтенсивність якого зростає з підвищенням потужності розряду. Напруженість електромагнітного поля досягає 25 В/м. Перебування в полі напруженістю до 5 В/м допускається протягом робочого дня. Для послаблення дії електромагнітного виробництва.

Електрогідроімпульсне обладнання поділяють на преси, що потребують окремих приміщень, і установки, які можуть встановлюватися в загальному приміщенні. Цей поділ викликаний різним рівнем створюваного під час їхньої роботи шуму, який визначається величиною енергії в імпульсі. Преси з енергією в імпульсі до 25 кДж можуть бути встановлені в загальному приміщенні. Норма допустимого рівня шуму для робочого місця

встановлюється за ДСТУ 12.1.003-86. Такі преси не потребують спеціального фундаменту і встановлюються на підлозі цеху без закріплення. Тильна сторона пресів повинна мати обмежений доступ, тому преси доцільно встановлювати біля стін цеху. Якщо такої можливості немає, то з тильного боку встановлюється постійна огорожа. З погляду техніки безпеки розташування ЕГІ пресів має задовольняти вимогам, що висуваються до ковальсько-пресового обладнання. Розміри виробничої площі, необхідні пресу ПЕГ-25, дорівнюють 12 м. Відстань від стін і перегородок визначається необхідними розмірами зони обслуговування з урахуванням розмірів дверей на кожухах агрегатів і приймається не менше 0,6 м. Відстань між ЕГІ пресами має бути не менше 1,5 м. У нашому випадку ці параметри становлять відповідно 1 м і 2,5 м. Оздоблення виробничого приміщення ЕГІ установок зроблено відповідно до ДСТУ 15548-35. Приміщення обладнане витяжною вентиляцією з п'ятикратним обміном повітря і освітленням лампами розжарювання освітленістю 60 лк (мінімально допустима освітленість дорівнює 50 лк). Електрогідроімпульсні преси належать до пресів з великими струмами замикання на землі. Опір замикальних пристроїв у будь-яку пору року має бути не більше 0,5 Ом. У нашому виробничому приміщенні ця умова виконана ( $K3Y=0,47$  Ом). Для забезпечення такого опору заземлювального контуру довелося зробити додаткові заземлювачі. Крім забезпечення безпеки людей, заземлення обмежує напругу в електроланцюгах і забезпечує функціонування релейного захисту. У загальних випадках кількість заземлювачів, їхні розміри та взаємне розташування визначають з урахуванням питомого опору ґрунту. [18].

#### **4.2.4. Пожежна безпека**

За ступенем пожежної небезпеки цех холодної обробки належить до категорії Д ("будівельні норми і правила П-М 2-72"), що характеризується неспалюваними речовинами і матеріалами в холодному стані. Імовірність виникнення пожежі в нашому випадку мала, але не слід нехтувати можливістю

її зниження. Причинами пожежі можуть бути несправності електрообладнання, такі як перевантаження проводів і коротке замикання. Перевантаження відбувається під час проходження струму, більшого за допустиму величину, а також через виникнення великих перехідних опорів. Основними причинами виникнення перевантажень є:

- заземлення у двох або декількох точках розрядного контуру;
- індуктивні та ємнісні зв'язки між окремими елементами генератора;
- електровибух провідників у технологічному вузлі;
- випромінювання електромагнітного поля елементами розрядного контуру.

Запобігання перевантаженню проводів забезпечується застосуванням стандартного кабелю, розрахованого на задану величину максимального струму, згідно з ДСТУ 18404-85. Запобігання неприпустимого нагрівання в місцях переходу струму з одного проводу на інший забезпечується застосуванням роз'ємів, рекомендованих нормами.

До заходів захисту від перевантажень також належать:

- правильний монтаж ланцюгів, машин і апаратів, відповідно до вимог улаштування електроустановок;
- застосування спеціальних автоматів, увімкнених послідовно в ланцюг; - застосування індуктивних датчиків тощо.

Пожежа може статися через коротке замикання. Для вимкнення живлення, у разі виникнення в електричних колах струмів неприпустимої величини, передбачено теплові реле у вигляді плавких запобіжників, розрахованих на певний струм. Пожежну небезпеку становить електроосвітлення в разі перегріву проводів і займання їхньої ізоляції. Займанню ізоляції проводів електроосвітлення запобігає встановлення запобіжників у ланцюзі освітлення. Імовірність пожежі (її виникнення і розповсюдження) знижується також завдяки тому, що приміщення цеху, в якому розташована наша установка, зроблене з вогнетривких матеріалів, а відстань до найближчої іншої установки 2,5 м. Джерелом виникнення пожежі

та підтримання реакції горіння на установці ПЕГ-25 є електричний струм, тому дільниця електрогідроімпульсного штампування обладнується засобами захисту від пожежі за ДСТУ 12.4.009-85. У наявності є вуглекислотні вогнегасники ОУ-2 за ДСТУ 7276-87 і ящик із піском об'ємом 1 м<sup>2</sup>. У цеху встановлено автоматичні комбіновані пожежні сповіщувачі.

### **4.3. Організаційні заходи**

Для запобігання і зниження травматизму та професійної захворюваності, поряд з технічними заходами, необхідні й організаційні. Особливості більшості ЕГІ пресів - наявність пульта керування. У зв'язку з цим, оператору необхідно переміщатися від пульта управління до технологічного вузла і назад під час штампування кожної деталі. Пульт управління преса з енергією менше 80 кДж розташовується в загальному приміщенні, в зоні обслуговування преса. Необхідно вжити заходів, що виключають у процесі роботи захаращення проходів заготовками і готовими деталями. До роботи на ЕГІ пресах допускаються спеціально підготовлені особи за фахом "штампувальник електрогідроімпульсними методами", які мають кваліфікаційну групу з техніки безпеки, відповідну III-У розряду, які вміють вести не тільки процеси штампування на обладнанні, а й проводити налагодження установок, які обслуговуються. Кожен оператор проходить 2-х тижневе стажування на ЕГІ установці під керівництвом досвідченого працівника. Практичне навчання здійснюється в індивідуальному порядку і проводиться безпосередньо на установці. Експлуатація ЕГІ пресів і установок вимагає щоденного огляду електрообладнання та періодичної заміни струмопроводів, їхніх ізоляторів тощо, що за нормального завантаження обладнання призводить до щоденного проведення робіт на струмоведучих частинах. "Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів" обумовлюють, що особи, які мають з техніки безпеки кваліфікаційну групу нижче III, не мають права проводити одноосібний огляд електроустаткування з розкриттям дверей або зняття кришок. Для

забезпечення безпечної роботи штампувальник повинен керуватися основними правилами: приступаючи до роботи після ремонту, перший пуск преса здійснюється після проходження інструктажу; перед першим пуском зовнішнім оглядом перевіряти справність верстата особам, які мають право на допуск до роботи; у процесі штампування здійснювати тільки операції, передбачені технологічною картою. Штампувальник може змінити режими обробки з пульта керування пресом; штампувальник повинен дотримуватися термінів профілактичних робіт з підтримання установки в справному стані; робота повинна проводитися на струмоведучих частинах тільки за умови повного зняття напруги; штампувальник повинен стежити за правильним зберіганням, станом і періодичністю перевірки захисних засобів (гумових килимків, діелектричних щитків).

#### **4.4. Техніка безпеки під час роботи в ковальсько-штампувальних цехах**

Комплекс заходів з охорони праці містить у собі насамперед підготовку та спорядження персоналу. Для цього на підприємствах необхідно проводити інструктаж. Відповідно до ДСТУ 12.0.004-79, обов'язковими інструктажами з безпеки праці є:

- вступний,
- первинний на робочому місці,
- повторний, - позаплановий і поточний

Усі відкриті рухомі та обертові частини устаткування, розташовані на висоті до 250 мм від рівня підлоги, якщо вони є джерелами небезпеки, повинні бути закриті суцільними або сітчастими огороженнями зі стороною осередків не більш як 10 мм. Огороження повинні підвішуватися на петлях, шарнірах. Ковальсько-штампувальні цехи відносяться до приміщень з підвищеною небезпекою, які характеризуються наявністю вогкості з відносною вологістю понад 75%, з високою температурою повітря, з підлогами зі струмопровідних

матеріалів. Суворо забороняється працювати в мокрому одязі та взутті, щоб уникнути ураження електричним струмом. Для захисту органів слуху рекомендується застосовувати спеціальні звукоізолюючі навушники. Забороняється відволікати робітника розмовами в момент закладання і виймання деталей з печі. Знімання та встановлення виробів масою понад 20 кг слід проводити тільки за допомогою навантажувального обладнання. Для боротьби з підвищеним рівнем шуму в приміщенні, крім захисних екранів і кожухів, необхідно застосовувати спеціальні звукоізолюючі навушники. Після завершення робіт приміщення і верстати повинні бути прибрані, (інструмент, металева стружка) і знеструмлені.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Роботу присвячено розв'язанню актуальної задачі, що має важливе значення для автомобіле-, приладо- і машинобудування і полягає в теоретичному й експериментальному обґрунтуванні технологічних параметрів деформування, які забезпечують підвищення ефективності процесу виготовлення осесиметричних деталей із тонколистових і особливо тонколистових металів. У процесі роботи були отримані основні результати та висновки:

1. Були розглянуті різні квазістатичні та динамічні методи витяжки-формування тонколистових і особливо тонколистових металів. Аналіз даних показав, що електрогідроімпульсне витягування-формування є одним з ефективних методів формозміни тонколистового металу. Цей метод вирізняється простотою технологічного оснащення, стислими термінами підготовки виробництва і легко піддається автоматизації та інтенсифікації. За рахунок зменшення ефекту пружинення, підвищується точність заготовок порівняно з квазістатичними методами витяжки формування.

2. Показано, що експериментальне дослідження ЕГІ витяжки-формування потребує спеціальної апаратури, затратне за часом і коштами, тому що на перебіг процесу впливає багато чинників: параметри розрядної камери, характеристики матеріалу заготовки та її геометрія, форма та тривалість імпульсу тиску і низка інших параметрів, що, своєю чергою, також визначає й науковість процесу. У зв'язку з цим доцільним є застосування переважно комп'ютерного моделювання з експериментальною верифікацією чисельних розрахунків.

3. Досліджено параметри імпульсного тиску в розрядній камері. Для комп'ютерних розрахунків ЕГІ витяжки-формування сформульовано універсальну залежність імпульсу тиску, за варіювання параметрів якої можна отримати залежності тиску від часу різних форм, характерних для ЕГІ процесів.

4. Досліджено вплив параметрів імпульсного тиску на процес ЕГД витяжки-формування в закрити матрицю. Показано, що збільшення тривалості імпульсу тиску дає змогу домогтися кращого заповнення матриці та вимагає менш точного дозування енергії порівняно з коротшими імпульсами. Отримані тенденції справедливі для металів різної товщини, що витягуються в матриці різних форм.

5. Запропоновано технологію інтенсифікованої ЕГІ витяжки-формування тонколистових металів за рахунок додаткового використання ресурсу пластичності фланця заготовки. В основі запропонованої технології заміна нерухомого притискача інерційним розгладжувачем і завдання збільшеного зазору між матрицею та фіксувальним елементом.

6 Ефективність цієї методики підтверджена комп'ютерною моделлю. Висота отриманих деталей була на 24,1% більшою, ніж у деталей, отриманих традиційною ЕГІ витяжкою-формуванням. Потоншення в центральній частині деталі знизилося на 2,1%.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aashish Rohatgi, Elizabeth V. Stephens, Ayoub Soulami, Richard W. Davies, Mark T. Smith. Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 211, Issue 11, November 2011, P. 1824 – 1833.
2. Aashish Rohatgi, Elizabeth V. Stephens, Richard W. Davies, Mark T. Smith, Ayoub Soulami, Said Ahzi. Electro-hydraulic forming of sheet metals: Freeforming vs. conical-die forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Issue 5, May 2012, P. 1070 – 1079.
3. Amir Hassannejadasl, Daniel E. Green, Sergey F. Golovashchenko, Javad Samei, Chris Maris, Numerical modelling of electrohydraulic free-forming and dieforming of DP590 steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 3, 2014, P. 391 – 404.
4. Dorel Banabic. *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. London – New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. 301 p.
5. Johnson G.R, Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Fract. Mech.*, 1985, vol. 21, No. 1, P. 31 – 48.
6. Keeler S.P. Rating the Formability of Sheet Metal // *Metal Progress*. 1966. Vol. 90 P. 148–153.
7. Marciniak Z., Kuczynski K. Limit strain in the process of stretch forming sheet metal, *International Journal of Mechanical Science*. 1967. Vol. 9. P. 609–620.
8. Nakazima K., Kikuma T. Forlimits under biaxial stretching of sheet metals. *Testu-to Hagane* 53:455–458(in Japanese), 1967.
9. Persy J.N. The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal. *Annals of CIPP*, 1980, vol. 29, N1, P. 131 – 132.

10. Yinfang Jiang, Yu Huang, Hua Jin, Yongyu Gu, Aiguo Ren, Liwei Huang, Xiaoming Qian. Research on precision control of sheet metal forming by laser shock waves with semi-die. *Optics & Laser Technology*, Volume 45, 2013, P. 598 – 604.
11. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хищенко. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
12. Бескаравайный Н.М. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах / Н.М. Бескаравайный, В.А. Поздеев. Киев: изд-во Наукова думка, 1981. 190 с.
13. Гидроударные прессы [электронный ресурс]: 2011. Режим доступа: <http://metal-work.ru/gidroudarnye.html> (22.01.15)
14. Гулый Г.А. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский. Киев: изд-во Наукова Думка, 1977. 174 с.
15. Стеблюк В.И., Марченко В.Л., Белов В.В., Гривачевский А.В. Холодная листовая штамповка. Киев : Вища школа, 1983. 280с.
16. Земцов М.И. Электрогидроимпульсная штамповка деталей из тонкостенных пространственных заготовок с совмещением операций / М.И. Земцов, С.М. Поляков // КШП.ОМД. 2007. №9. С. 34 – 38.
17. Ищенко Ж.Н. Исследование взрыва проволочек переменного сечения и произведенной ими деформации труб / Ж.Н. Ищенко // Разрядноимпульсная технология: сб. науч. ст. Киев, 1978. С. 137 – 144.
18. Качественный подход к выбору технологической системы изготовления сложно-рельефных деталей в современных условиях / Е.А. Фролов [и др.] // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. №46. С. 14 – 16.
19. Мазуровский Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке / Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев. Киев: изд-во Наукова думка, 1983. 192 с.
20. Панфилов Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме / Ю. Панфилов // Технологии в электронной промышленности. 2007. №3. С. 76-80.

21. Поздеев В.А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости / В.А. Поздеев. Киев: Наук. Думка, 1980. 192 с.
22. Расчет силовых и энергетических параметров при штамповке деталей на гидроударных установках / Ю.М. Свиридов [и др.] // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2013. № 1(34). С. 150 – 152.
23. Старков Н.В. Экспериментальное исследование пластичности конструкционных алюминиевых сплавов при импульсном электрогидравлическом нагружении / Н.В. Старков // КШП. ОМД. 2008. №5. С. 3-7.
24. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
25. Техничко-економические аспекты эффективности применения процессов пневмоударной листовой штамповки / Е.Н. Фролов [и др.] // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2011. №6(71). С. 119-122.
26. Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости: сб. научных трудов / под ред. Гулого Г.А. Киев: изд-во "Наукова думка", 1980. 220 с.
27. Фролов Е.А. Аналитическое исследование параметров прочности вытяжных операций пневмоударной штамповки / Е.А. Фролов, И.В. Манаенков, О.Г. Носенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. №62. С. 62 – 69.
28. Чачин В.Н. Листовая штамповка с использованием импульсных нагрузок / В.Н. Чачин [и др.]. Киев: УМК ВО, 1989. 108 с.

# Додатки

УДК 621.96

ПОМАЗАН А.В., магістрант гр. 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н. доцент Явтушенко А.В.

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ СЕРЕДНЬОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ХОЛОДНОГО ШТАМПУВАННЯ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізького  
національного університету, кафедра металургійних технологій, екології  
та техногенної безпеки*

Холодне штампування є одним з найбільш прогресивних технологічних методів виробництва. Воно має ряд переваг перед іншими видами обробки металів як в технічному, так і в економічному відношенні.

У технічному відношенні холодне штампування дозволяє отримувати деталі досить складних форм, виготовлення яких іншими методами обробки або неможливо або важко. Також, ми можемо отримати взаємозамінні деталі з досить високою точністю розмірів, переважно без подальшої механічної обробки, що здешевлює виріб.

Є чотири основних види деформацій холодно листового штампування: різання, згинання, витягування, формування. Процес різання штампами при вирубці, пробиванні в деякій мірі аналогічний процесу різання ножицями. У нашому випадку пуансон і матриця є, як би ножами замкнутої конфігурації і мають пов'язані ріжучі країки. Однак процеси різання істотно відрізняються.

Експериментально встановлено, що на початку вирубання – при незначному зануренні пуансона в метал – у різальних крайок пуансона і матриці виникають два самостійних сімейства кривих рівних деформацій – зрушень у вигляді овалів. При подальшому впровадженні пуансона криві зрушень, які виходять від ріжучих крайок, поширюються в глиб металу і деформацією охоплюється більший обсяг металу; криві рівних зрушень послідовно зустрічаються між собою, в результаті чого відбувається утворення сколюючих тріщин і роз'єднання металу. Ці криві обмежують зони деформації і глибину пошкодженого шару в вирубаному або пробитому зразку. Пошкоджений шар металу можна відпалювати або видаляти наступним зачищенням.

Відповідно трьом стадіями роз'єднання металу поверхня зрізу вирубанної деталі при нормальному зазорі буде мати три зони. Перша зона – злегка зігнута і закруглена з нижньої поверхні заготовці деталі. Друга зона – чисто зрізана ріжучими крайками матриці блискуча циліндрична смужка, ширина якої характеризує величину поглиблення пуансона до моменту утворення сколюючих тріщин. Третя зона – злегка шорстка конічна поверхня сколювання матового кольору. Ті ж зони, але тільки в зворотному порядку спостерігаються при пробиванні отвору

При нормальному зазорі між пуансоном і матрицею поверхні зсуву виникають у різальних крайок пуансона, збігаються з поверхнями зсуву і тріщинами, що виникли у різальних крайок матриці, і утворюють загальну криволінійну поверхню сколювання. При малому зазорі і великій товщині матеріалу поверхні зсуву, що йдуть від країв пуансона, не збігаються з поверхнями зсуву, що виникли у крайок матриці. Кільцева перемичка, що залишилася перерізується при подальшому зануренні пуансона з виникненням нових сколюючої тріщин, причому на деталі утворюється надрив і подвійний зріз з протягнутим задирком. Поверхня отвору виходить порівняно гладкою, лише в нижній часті утворюється невелике шорстке сколювання.

Для отримання якісної поверхні деталі, яка відрізається необхідно, щоб друга зона пластичної деформації була, як можна довша, а третя зона деформації метала, як можна коротша. Величини цих зон залежать від зазору між пуансоном і матрицею.

### Список використаних джерел

1. Стеблюк В.И., Марченко В.Л., Белов В.В., Гривачевский А.В. Холодная листовая штамповка. – Киев : Вища школа, 1983. 280с.
2. Калюжний В. Л. Аналіз схем холодного видавлювання вісесиметричних порожнистих виробів / В. Л. Калюжний, А. М. Потятиник // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк : НТУ, 2017. – № 59. – С. 137–143.
3. Справочник по оборудованию для листовой штамповки / Л.И.Рудман, А.И.Зайчук, В.Л.Марченко и др.; Под общ. ред. Л.И.Рудмана. – Киев : Техника, 1989. 231с.