

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут  
кафедра Технології виробництва літальних апаратів

«На правах рукопису»  
УДК 621.7

«До захисту допущено»  
В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Антон Лавріненко  
«  » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Технологія виробництва літальних апаратів»

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: Розробка технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм

Виконав:

студент 2 курсу, групи АТ-11мн

Михальчук Дмитро Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: ст.викл., к.т.н., Піманов Валерій Володимирович

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

## РЕФЕРАТ

Дана магістерська дисертація складається з 93 сторінок, в тексті зазначено 62 рисунки. В роботі було використано 48 найменувань бібліографічних посилань.

Метою роботи є розробка технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм з використанням процесів листового штампування.

Предметом дослідження є технологічні, конструктивні та фізико-механічні параметри процесів отримання конічних деталей за допомогою технологій з профільованими заготовками.

Було розроблено технологічний процес отримання деталі «Конус мідний» (проведений аналіз технологічності деталі та можливість її виготовлення операціями листового штампування, підібрано операції листового штампування для отримання деталі, проведено розрахунок вихідної заготовки, встановлено кількість та остаточну послідовність операцій, розраховано технологічні зусилля обраних операцій).

Було виконано чисельне моделювання, на основі методу скінчених елементів операцій роздача, обтиск та витягування деталі конічної форми (визначено НДС та встановлена залежність зусилля деформації від переміщення пуансона).

Розроблено експериментальні схеми для відпрацювання операцій проведеного моделювання.

Ключові слова: штампування, трубчаста заготовка, роздача, обтиск, витягування, метод скінчених елементів, кумулятивна воронка, конічні деталі, листове штампування.

## **ABSTRACT**

This master's thesis consists of 93 pages, the text contains 62 figures. The work was used 48 names of bibliographic references.

The purpose of the work is to develop the technology and design of a cumulative funnel for a 40 mm grenade launcher shot using sheet stamping processes.

The subject of the study is the technological, structural and physico-mechanical parameters of the processes of obtaining conical parts using technologies with profiled blanks.

The technological process of obtaining the "Copper Cone" part was developed (an analysis of the manufacturability of the part and the possibility of its production by sheet stamping operations was carried out, sheet stamping operations were selected for obtaining the part, the calculation of the initial workpiece was carried out, the number and final sequence of operations was determined, the technological efforts of the selected operations were calculated).

Numerical modeling was performed based on the method of finite elements of operations of distribution, crimping and extraction of a part of a conical shape (VAT was determined and the dependence of the deformation force on the movement of the punch was established).

Experimental schemes have been developed to work out the simulation operations.

Key words: stamping, tubular blank, dispensing, crimping, drawing, finite element method, cumulative funnel, conical parts, sheet stamping.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОСНТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ КУМУЛЯТИВНИХ ПРИПАСІВ.....	10
1.1 Загальні відомості про кумулятивний снаряд, складові снарядів та їх різновиди.....	10
1.2 Конструкція та особливості виготовлення кумулятивних воронок...	19
1.3 Огляд теоретичних та експериментальних досліджень процесу обтиску.....	27
1.4 Огляд теоретичних та експериментальних досліджень процесу роздачі.....	40
Висновки та встановлені задачі дослідження .....	45
РОЗДІЛ 2	
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	46
2.1 Вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.....	46
2.2 Розробка технології виготовлення кумулятивної воронки з трубчастої заготовки для гранатометного пострілу калібром 40 мм..	51
Висновки по розділу.....	54
РОЗДІЛ 3	
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ.....	55
3.1 Вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.....	55
3.2 Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу роздачі.....	57

3.3	Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу обтиску.....	63
3.4	Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу витягування.....	69
	Висновки по розділу	73
	РОЗДІЛ 4	
	КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	75
4.1	Проектування схеми оснащення для роздачі.....	75
4.2	Проектування схеми оснащення для обтиску.....	76
4.3	Проектування схеми оснащення для витягування.....	78
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	80
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
	ДОДАТОК 1.....	88

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МСЕ – метод скінченних елементів

НДС – напружено-деформований стан

КС – кумулятивний снаряд

ВР – вибухова речовина

$D_0$  – діаметр вихідної заготовки

$S_0$  – товщина вихідної заготовки

$S_n$  – товщина стінки n-го переходу;

$D_{\Pi}$  – діаметр пуансона

$r_{\Pi}$  – радіус пуансона

$r_m$  – радіус матриці

$P_{\text{деф}}$  – зусилля деформування

$\mu$  – коефіцієнт тертя

$\sigma_i$  – інтенсивність напружень

$\sigma_z$  – осьові напруження

$\sigma_{\theta}$  – тангенціальні напруження

$\sigma_r$  – радіальні напруження

$\varepsilon_i$  – інтенсивність деформацій

$\varepsilon_z$  – осьові деформації

$\varepsilon_{\theta}$  – тангенціальні деформації

$\varepsilon_r$  – радіальні деформації

## ВСТУП

**Актуальність.** Розробка нових технологій та конструкцій для зброї та боєприпасів є важливим завданням для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності військових сил. Удосконалення гранатометних пострілів, зокрема розробка нової кумулятивної ворони, може покращити бойові характеристики таких систем та забезпечити перевагу на полі бою. Розробка нових конструкцій та технологій у галузі військової техніки сприяє прогресу та інноваціям. Робота над кумулятивною воронкою для гранатометного пострілу калібром 40 мм може включати в себе використання новітніх матеріалів, розробку удосконалених методів виготовлення та інженерних рішень, що сприятиме просуванню галузі. Постійне покращення засобів боєприпасів має велике значення для безпеки військових та цивільних осіб. Розробка кумулятивної воронки для гранатометного пострілу може сприяти зниженню ризику для військових, забезпечуючи більш точне та потужне враження цілей. Розробка нової технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу є складною задачею, яка вимагає глибокого наукового дослідження та аналізу. Така робота може включати в себе аналіз існуючих технологій, матеріалів та конструкцій кумулятивних воронок, вивчення принципів їх дії та взаємодії з цілями. Це відкриває широкі можливості для наукових досліджень, зокрема в галузі балістики, механіки матеріалів, динаміки вибухових процесів та інших суміжних дисциплін. Успішна розробка нової технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу може мати великий практичний вплив. Вона може покращити бойові характеристики гранатометних систем, забезпечуючи більшу проникаючу здатність та ефективність враження цілей. Така розробка може бути корисною як для військових, так і для правоохоронних організацій, які використовують гранатометну зброю. Успішна розробка нової технології та конструкції

кумулятивної воронки може мати значний комерційний потенціал. Вона може зацікавити виробників військової техніки та боєприпасів, які можуть бути зацікавлені в удосконаленні своїх продуктів та отриманні конкурентних переваг на ринку. Отже, розробка технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм є актуальною з багатьох причин, включаючи військову потребу, науковий потенціал, практичну значимість, можливість комерціалізації та заповнення наукової прогалини.

**Об'єкт дослідження:** процеси поопераційних переходів формоутворення кумулятивної воронки із трубчатої заготовки з перемінною товщиною стінки.

**Предмет дослідження:** вплив конструктивних і технологічних факторів на закономірності формоутворення вісесиметричних виробів роздачею, обтиском та витягуванням з профільованої трубчатої заготовки.

**Мета дисертаційної роботи:** розробка технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм з використанням метода скінченних елементів у програмному комплексі DEFORM.

**Задачі дослідження:**

1. Провести аналіз існуючих кумулятивних боєприпасів і особливостей їх конструкцій.
2. Провести аналіз можливих існуючих технологій виготовлення кумулятивних воронок та методів технологічних розрахунків
3. Виконати вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.
4. Провести чисельне моделювання поопераційних переходів технологічного процесу за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі DEFORM 2D/3D.



5. Розробити експериментальне штампове оснащення для відпрацювання технологічних поопераційних переходів.

**Методи дослідження:** методом скінчених елементів використовуючи програмне забезпечення DEFORM виконується дослідження поопераційних переходів формозмінюючих операцій при отриманні мідної кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.

**Наукова новизна одержаних результатів :**

- Запропоновано конструкцію мідної кумулятивної воронки під гранатометний постріл калібром 40 мм з головним підривником.

- Вперше розроблено математичну модель для розрахунку технологічних та конструктивних особливостей формоутворення мідної кумулятивної воронки з попередньо профільованої трубчатої заготовки використовуючи метод скінчених елементів.

**Практичне значення отриманих результатів :**

За результатами проведеної роботи під серійне виробництво було розроблено технологію та штампове оснащення для виготовлення кумулятивної воронки під гранату до пострілу калібром 40мм стандарту НАТО з головним підривником.

**Особистий внесок здобувача:**

Проведено аналіз існуючих конструкцій боєприпасів з кумулятивною дією у тому числі для боєприпасів стандарту НАТО для гранатометів, досліджено особливості конструкції головних складових боєприпасів, які впливають на ефективність роботи боєприпасу, розглянуто основні способи формоутворення кумулятивних воронок; обрано оптимальну схему технологічного процесу виготовлення кумулятивної воронки; виконано чисельне моделювання в програмному комплексі DEFORM процесів поопераційних переходів та проведено аналіз результатів.

**Публікації:** Результатами досліджень були подані у вигляді 1 тез на конференцію.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОСНТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ КУМУЛЯТИВНИХ ПРИПАСІВ

### 1.1 Загальні відомості про кумулятивний снаряд, складові снарядів та їх різновиди.

Кумулятивний снаряд (КС) - артилерійський снаряд, в якому для ураження використовується заряд кумулятивної дії. Кумулятивний снаряд призначений для стрільби по танкам, БМП, БТР, а також залізобетонним спорудам [1].

Кумуляція (від лат. Curanlo - накопичую) - посилення дії вибуху в певному напрямку. Ефект кумуляції досягається шляхом створення заряду вибухової речовини (ВР) кумулятивної воронки, обернено зверненої у бік об'єкта, що уражається. Перерозподіл енергії вибуху та її концентрація у заданому напрямку лежить в основі кумулятивного ефекту. Якщо у заряді ВР встановити виїмку, а з іншого боку капсуль-детонатор так, щоб детонаційна хвиля йшла у бік поглиблення, то дія вибуху в напрямку осі виїмки значно збільшується. Це стається через те, що потік продуктів детонації, що виходить із поверхні виїмки розривного заряду, отримує певну спрямованість (по осі виїмки) у бік об'єкта ураження. Найбільш поширеними формами виїмки вважаються гіперболічна та конічна [1].

Кумулятивний ефект використовується в боєприпасах, у будівництві та гірничій промисловості, у дослідженнях властивості речовин при високих тисках. Кумулятивний ефект було відкрито у 1864 російським військовим інженером М.М. Боресковим, а 1865 капітан Д.І. Андрієвський використовував це явище коли створив капсуль-детонатор. Експеримент, дослідження кумулятивного ефекту проведено проф. М.Я. Сухаревським у 1923-1926. У 1945 М.А. Лаврентьєвим була розроблена гідродинамічна теорія кумуляції.

Отже, такі радянські вчені зробили внесок у теорію кумулятивного ефекту Є.І. Забабахін, Г.І. Покровський, Ф.А. Баум та ін.

Перші спроби створення кумулятивних снарядів на території СРСР були здійснені С.Н. Дядичевим у 1934 році. У 1938 році, під час Іспанської громадянської війни, такі снаряди вже активно застосовувалися. Широке використання кумулятивних снарядів всіма сторонами конфлікту було зафіксовано в часи Другої світової війни. Перший внутрішній зразок такого снаряда, що був використаний Радянською Армією, датується січнем 1942 року і був розроблений під керівництвом К.К. Снітко. Під час Великої Вітчизняної війни, кумулятивні снаряди отримали назви "бронепрожигающий" або "термітний" [2,3].

Кумулятивні снаряди бувають різних розмірів, включаючи малі та великі калібри. Розглянемо великокаліберні снаряди та їх комплектацію. Рисунок 1.1 демонструє великокаліберні снаряди радянського періоду та їх характеристики, представлені в таблиці 1.1. [3]

Табл. 1.1 Тактико-технічні характеристики радянських кумулятивних снарядів.

Тип кумулятивного снаряду	125-мм постріл ЗБК16 з кумулятивним снарядом ЗБК18М (1980 р.)	125-мм постріл ЗБК25 з тандемним кумулятивним снарядом ЗБК29М (~1990 р.)
Маса пострілу, кг	29	28.4
Маса снаряду з додатковим зарядом, кг	19	18.4
Початкова швидкість, м/с	905	915
Бронепробиття, мм	550	>650
Облицювання	Мідь	Мідь



125-мм постріл ЗБК16 з  
кумулятивним снарядом ЗБК18М  
(1980 р.)

125-мм постріл ЗБК25 з  
тандемним кумулятивним  
снарядом ЗБК29М (~1990 р.)

Рисунок 1.1 – Види радянських кумулятивних крупнокаліберних снарядів.

З часом конфігурація кумулятивних снарядів зазнала великих змін, це пов'язано з новітніми технологіями виготовлення листових деталей, та потребою у більш ефективній вогневій силі для пробиття броньованої сучасної техніки. На рис. 1.2 зображено крупнокаліберний кумулятивний снаряд китайського виробництва, 2018 рік [4].

На авіакосмічному салоні Чжухай-2018 продемонстрували 125-мм танковий снаряд з композитним дистанційним підривачем (composite detective proximity fuse). На рис.1.3 зображено зразок випробування снаряду на бронепробиття.

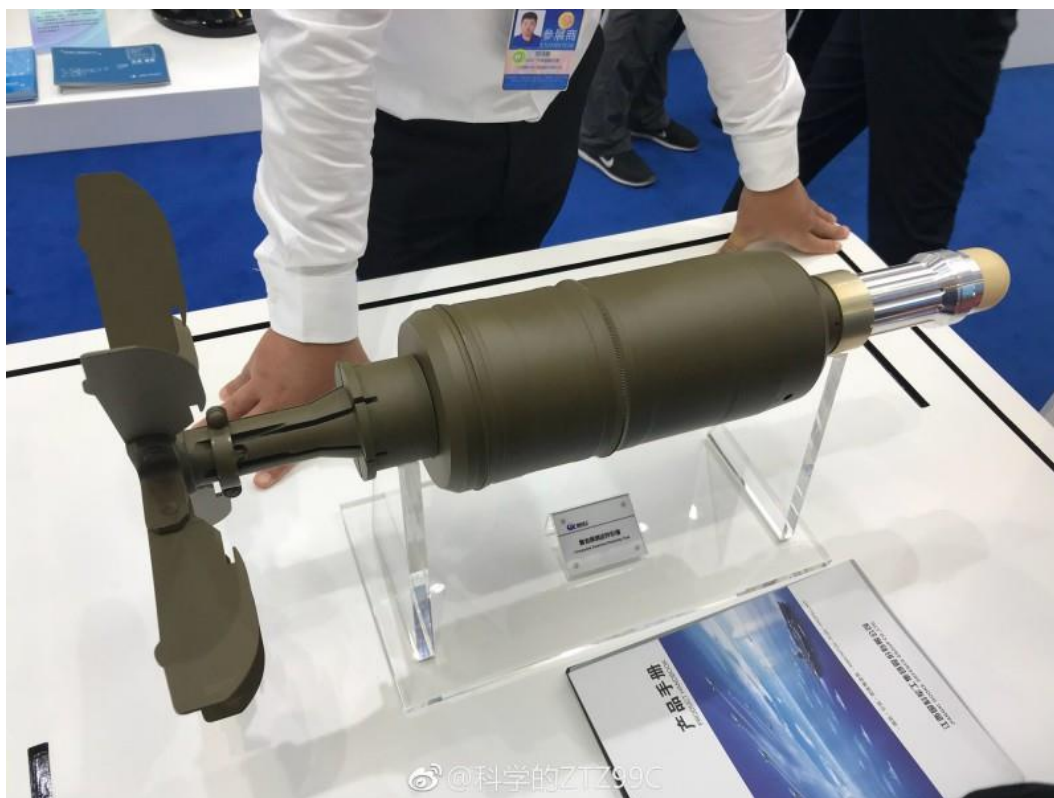


Рисунок 1.2 – Кумулятивный снаряд калибром 125 мм.

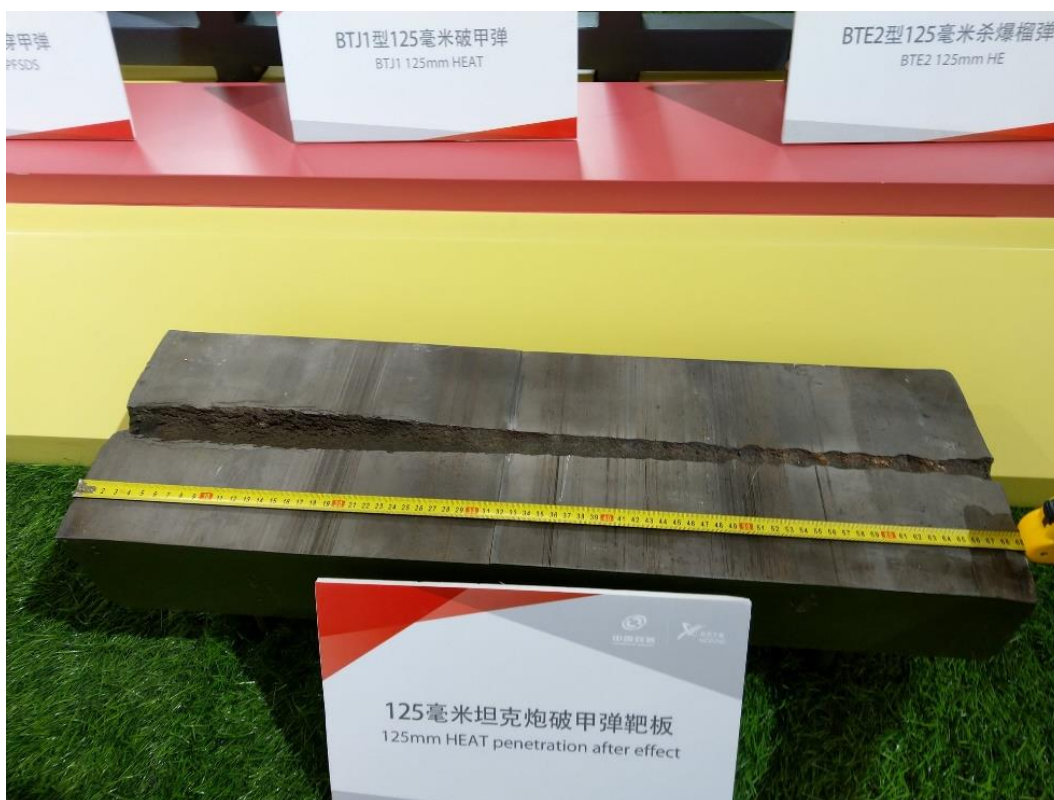


Рисунок 1.3 – Зразок бронепробиття кумулятивного снаряду 125 мм.

Ймовірно, новий підривник призначений для забезпечення оптимальної фокусної відстані (~3,5 калібру) при формуванні кумулятивного струменя при підриві до контакту з бронею. Можна припустити, що китайський кумулятивний снаряд з таким підривником матиме в 1,5 рази більшу бронепробивну здатність (понад 1200 мм). Бронепробивна здатність штатного китайського 125 мм кумулятивного снаряда – 700 мм [4].

Розглянемо приклади малокаліберних кумулятивних снарядів. Кумулятивні снаряди малого калібру мають низку властивих їм недоліків. Це включає невелику пробивну здатність та проблеми, пов'язані з впливом кутової швидкості снаряда на характер кумулятивного струменя. З цих причин так і не було створено вітчизняний 30-мм кумулятивний снаряд, хоча в інших країнах вони виробляються (наприклад, 30-мм кумулятивно-уламковий снаряд M789 фірми PRIMEX, США, рис. 1.4) [5].

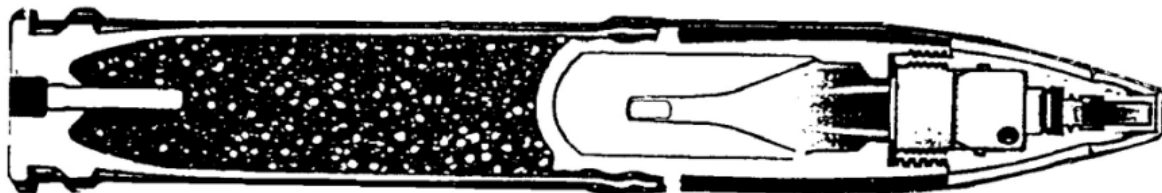


Рисунок 1.4 – Американський 30-мм кумулятивно-уламковий снаряд M789.

При переході до 40-мм калібру маса кумулятивного струменя значно збільшується, що частково знижує вплив попередньо перелічених складнощів. Потреба в гранатометах велика, оскільки ця зброя дозволяє ефективно вести вогонь по броньованим цілям та ворожій піхоті. Найбільш поширені 40-мм зразки зброї представлені на рис. 1.5. [2, 6].

В таблиці 1.2 вказані тактико-технічні характеристики зарубіжних гранатометів.



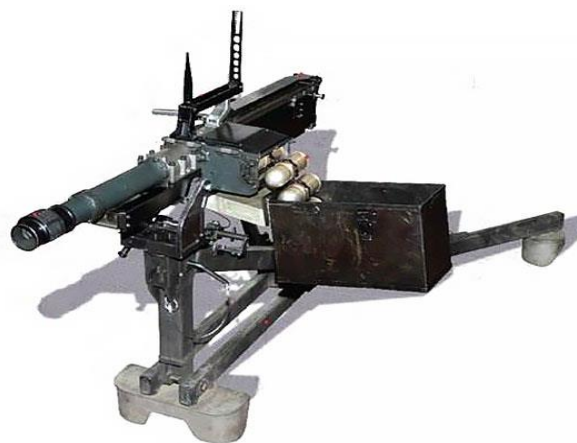
Mk 19



Baretta GLX-160



GL-06



УАГ-40



HK GMG

Рисунок 1.5 – Види гранатометів з калібром снаряду 40 мм.

Табл. 1.2. Тактико-технічні характеристики зарубіжних гранатометів

Країна виробник	США	Італія	Швейцаря	Україна	Німеччина
Тип	Mk 19	Baretta GLX-160	GL-06	УАГ-40	НК GMG
Калібр	40	40	40	40	40
Довжина ствола, мм	417	243	280	400	584
Макс. дальність стрільби, м	2200	1500	1500	2200	2200
Темп стрільби, пострілів/хв	360-390	-	-	400	350

Боєприпаси для гранатометів виробляються в широкому асортименті типів, структур та призначень. Серед найпоширеніших можна виділити:

- осколково-фугасна граната, що вражає ціль уламками внаслідок розриву корпусу гранати або за допомогою додаєтових уламків, забезпечуючи радіус ураження 5-10 м;

- кумулятивно-осколково-фугасна граната, що забезпечує бронепробиття 40-76 мм при куті зустрічі з ціллю 0° від нормалі, радіус ураження уламками до 5 м;

- граната з запальним та димоутворюючим зарядом;

- граната з освітлювальними засобами, що забезпечує підйом до висоти 183 м;

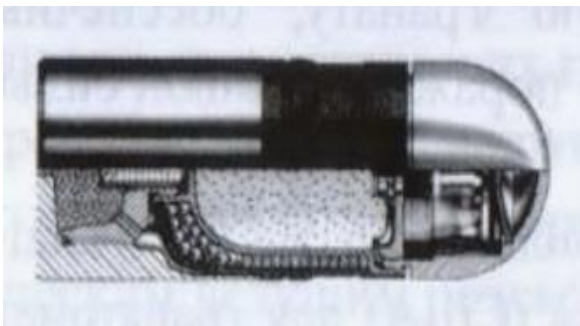
- граната з димоутворюючою сумішшю;

- навчальна граната.

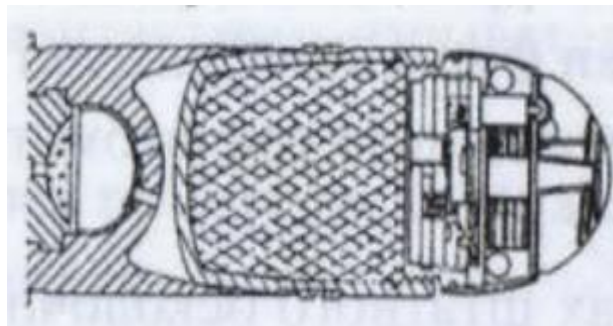
Базовим видом боєприпасу є осколково-фугасна граната, але в цьому проекті найбільший інтерес викликає кумулятивні снаряди калібром 40 мм.



На рис. 1.6 зображено типові конструкції пострілів калібром 40 мм для автоматичних ручних гранатометів різних країн [6].



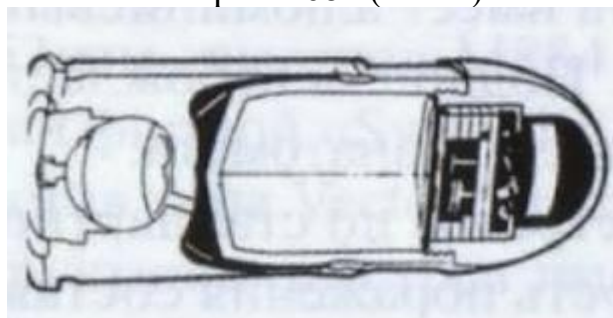
Постріл Diehl GmbH (Німеччина)



Постріл M684 (США)



Постріл S412 (Сінгапур)



Постріл M384 (США)



Постріл V40x53 (Україна)



Постріл M384 (США)

Рисунок 1.6 – Типові конструкції пострілів калібром 40 мм для автоматичних ручних гранатометів.

В залежності від специфічних технічних завдань, які потрібно вирішити з використанням кумулятивних зарядів, можуть бути використані облицювання різних форм. На рис. 1.7 продемонстровані різні форми облицювань кумулятивних воронок, що використовуються в практиці. Найпоширенішими для кумулятивних зарядів є прості геометричні форми облицювань (рис. 1.7, а-д) [6, 8, 10].

Циліндричні облицювання використовуються, коли необхідно отримати безградієнтний кумулятивний струмінь, в якому всі елементи рухаються з однаковою швидкістю (рис. 1.7, а). Застосування конічних облицювань дозволяє досягти максимальної глибини проникнення крізь перешкоди (рис. 1.7, б,к). Зазвичай кут  $2\alpha$  варіюється від  $30^\circ$  до  $60^\circ$ , причому оптимальні значення кута лежать в діапазоні  $40^\circ$ - $50^\circ$  [7, 8, 10].

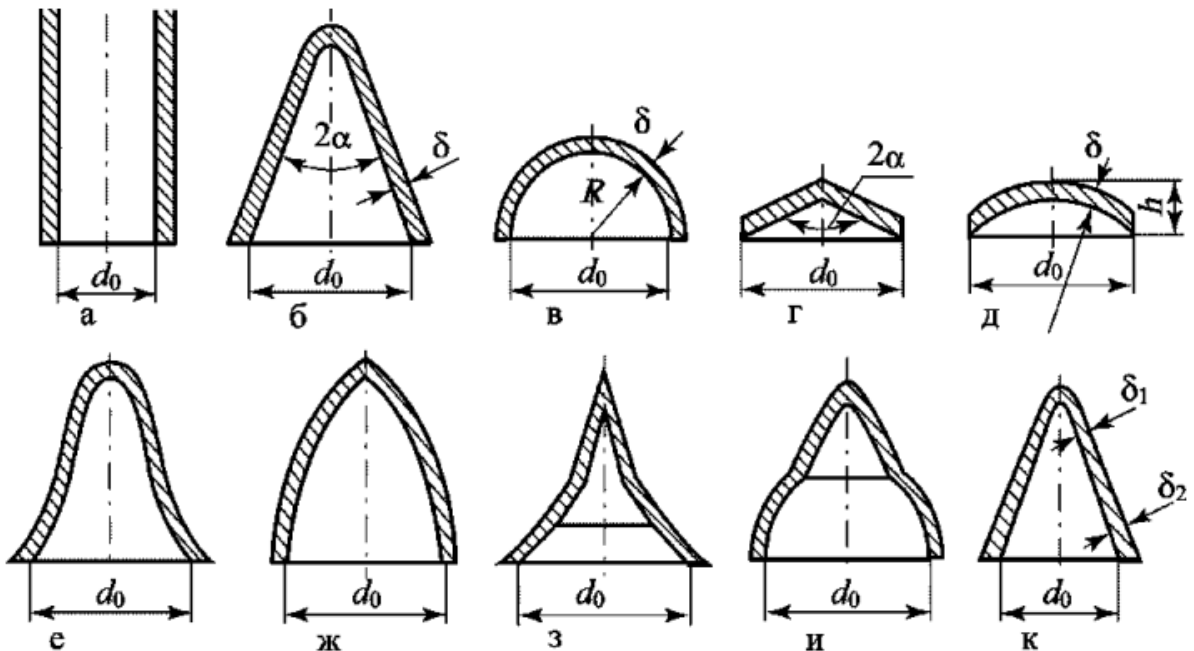


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення кумулятивних облицювань воронки різної форми

В конічних облицюваннях часто використовують технологію змінної товщини стінки (рис. 1.7, к). Це дозволяє підвищити градієнт швидкості та збільшити довжину кумулятивного струменя. Сферичні облицювання застосовуються, коли метою є отримання відносно великого діаметру отвору в перешкоді, але з меншою глибиною проникнення, ніж при використанні конічного облицювання. [6,8,9].

Облицювання з більш високими кутами  $2\alpha = 130^\circ \dots 150^\circ$  або сегменти сфери (рис. 1.7, г,д) не призначені для створення кумулятивного струменя, а

для формування щільного тіла з облицювання, відомого як "ударне ядро". Швидкість такого ядра зазвичай становить 2...3 км/с, і воно може поразити цілі на відстані до декількох десятків метрів. Рупороподібні та тюльпаноподібні облицювання (рис. 1.7, е,ж), які мають криволінійні формування воронок, розширюють можливості регулювання довжини струменя. Втім, їх основний недолік полягає в складності отримання подібних деталей. Комбіновані облицювання (рис. 1.7, з,и) використовуються для вирішення більш специфічних завдань. [6,8,10].

## **1.2 Конструкція та особливості виготовлення кумулятивних воронок.**

Кумулятивна воронка – це спеціально створена виїмка в розривному заряді кумулятивного снаряда. Принцип дії кумулятивної воронки полягає в концентрації потоку газів, що виникають при вибуху. Гази, що виходять перпендикулярно до бокових стінок виїмки, перетинаються з центральною частиною струменя, внаслідок чого вони зміщуються та концентруються, формуючи щільний, високошвидкісний, високотемпературний і високотисковий кумулятивний струмінь. На певній відстані від заряду, струмінь газів має мінімальний переріз, забезпечуючи максимальну пробивну дію. Це місце називається фокусом кумуляції. При вибуху, броня або інша перешкода проникається цим спрямованим і сконцентрованим газовим струменем, а не самою кінетичною енергією снаряда. За рахунок кумулятивної воронки, снаряди кумулятивної дії можуть пробити броню товщиною в 1-3 рази більше, ніж калібр самого снаряда. [7,8]

На рис. 1.8, 1.9 зображено як після вибуху капсуля-детонатора, що знаходиться на протилежній до виїмки стороні заряду, виникає детонаційна хвиля, яка переміщається вздовж осі заряду. [9]

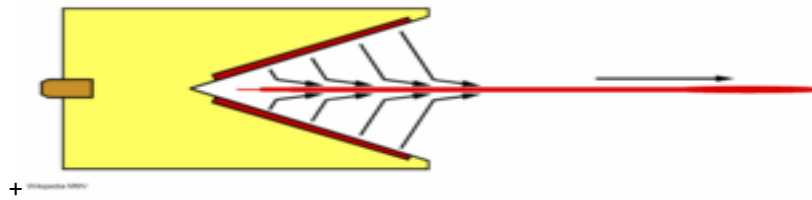


Рисунок 1.8 – Кумулятивний ефект.



Рисунок 1.9 – Схема утворення кумулятивного струменя

Коли хвиля розповсюджується до бічних утворюючих конуса облицювання, вона "сплескує" стінки облицювання одна на зустріч іншій. В результаті цього зіткнення, тиск у матеріалі облицювання різко зростає. Тиск вибухових продуктів може досягати порядку 1010 Па (105 кгс/см<sup>2</sup>), що значно перевищує границю текучості металу. Тому, рух металевго облицювання під впливом продуктів вибуху подібний до течії рідини, хоча це обумовлено не плавленням, а пластичною деформацією [9,11,12].

На рис. 1.10, 1.11 Подібно до рідини, метал облицювання формує дві зони. Більша частина маси (приблизно 70-90%) формує повільно рухаючийся "пест", тоді як менша частина маси (приблизно 10-30%) формує тонкий гіперзвуковий металевий струмінь, що переміщується вздовж осі симетрії заряду. Швидкість цього струменя залежить від швидкості детонації вибухової речовини та геометрії воронки [9,10,11].

Використовуючи воронки з малими кутами при вершині, можна досягти надзвичайно високих швидкостей, але це збільшує вимоги до якості виготовлення облицювання, оскільки зростає ймовірність передчасного руйнування струменя. У сучасних боєприпасах використовуються воронки зі складною геометрією (наприклад, експоненційні, сходинкові та інші) з кутами

в діапазоні 30-60 градусів. Швидкість кумулятивного струменя в таких випадках може досягати 10 км/с. [9,10,11].

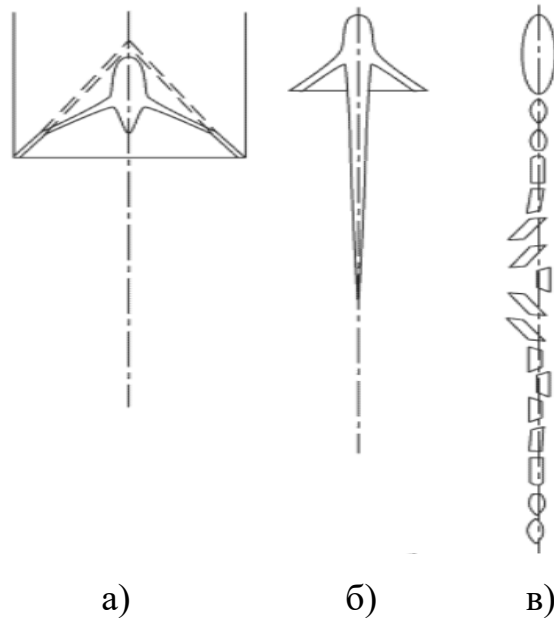


Рисунок 1.10 – Основні стадії формування у русі КС: утворення струї при обтиску воронки (а); розтягування струї внаслідок наявності градієнту швидкості (б); фрагментація (розрив) струї на окремі елементи у вільному польоті (в).

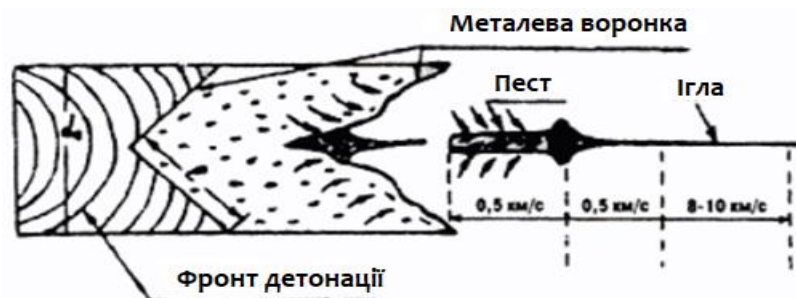


Рисунок 1.11 – Швидкість руху складових кумулятивної струї

Коли кумулятивний струмінь зустрічається з бронею, він розвиває дуже високий тиск, який на один-два порядки перевищує границю міцності металів. Тому струмінь взаємодіє з бронею згідно з законами гідродинаміки - при зіткненні вони поведуться як ідеальні рідини. Міцність броні в традиційному

розумінні в такому випадку майже не грає ролі, але основними стають показники щільності і товщини бронювання. [9,11].

Теоретична пробивна здатність кумулятивних снарядів пропорційна довжині кумулятивного струменя і квадратному кореню відношення щільності облицювання воронки до щільності броні. Практична глибина проникнення кумулятивного струменя в монолітну броню у існуючих боєприпасах варіюється в діапазоні від 1,5 до 4 калібрів [9,11].

На рис. 1.12 показано воронку з малим кутом розкриття (глибока виїмка), що забезпечує більш довгий і високошвидкісний струмінь. В такому випадку пробиття максимальне. Однак надто малий (гострий) кут призводить до занадто тонкого струменя, який швидко рветься на частини і менш стабільний. З іншого боку, при надто великому куті розкриття конуса більша частина його складу переходить у хвостову частину струменя, яка при меншій швидкості (близько 2 — 2.5 км/сек і навіть вище) більш стабільна на великих відстанях від заряду до перешкоди (від 100 і більше калібрів). Такі кумулятивні заряди називаються ударним ядром. [10,13].

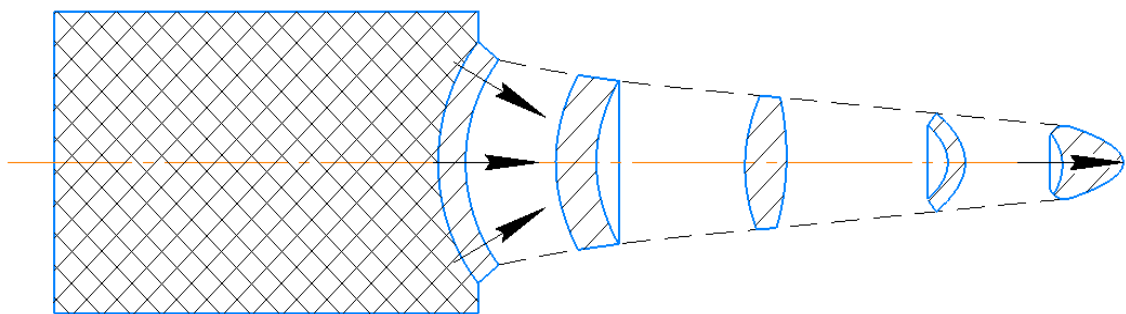


Рисунок 1.12 – Процес формування елемента "ударне ядро"

Оптимальне співвідношення товщини облицювання до її діаметра в кумулятивному заряді визначається індивідуально, залежно від конструкції. Занадто тонке облицювання створює тонкий струмінь, який швидко

розпадається, тоді як занадто товсте облицювання може перешкоджати формуванню кумулятивного струменя аж до неможливості створення кумулятивного ефекту. [9,10].

Коли кінчна воронка кумулятивного заряду згортається, швидкості окремих частин струменя виявляються різними, що приводить до розтягування струменя у польоті. Це означає, що навіть невелике збільшення відстані між зарядом і ціллю може збільшити глибину пробивання за рахунок подовження струменя. Однак при значних відстанях між зарядом і ціллю, безперервність струменя порушується, що знижує його бронебійність. Найбільший ефект досягається на так званій "фокусній відстані", для підтримання якої використовуються накінецьники різної довжини. [9,11].

Структурні характеристики кумулятивних зарядів визначаються особливостями їх конструкції та функціонального призначення. Виділяють вісесиметричні (або зосереджені) та плоскі (або подовжені) кумулятивні заряди. Основні структурні елементи кумулятивних зарядів включають заряд вибухової речовини з кумулятивною виїмкою, облицювання кумулятивної виїмки, корпус кумулятивного заряду та засіб ініціювання. [10,11,13].

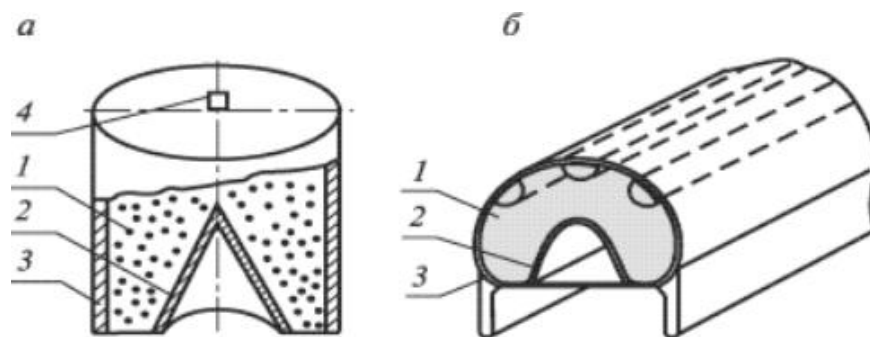


Рисунок 1.13 – Зосереджений (а) і подовжений (б) кумулятивні заряди.

В практичних застосуваннях особливо важлива направлена осьова кумуляція. Цей вид кумуляції можна досягти при вибуху вісесиметричних

зарядів (рис. 1.13, а), які мають облицювання різних геометричних форм (конус, напівсфера, парабола, гіпербола, тощо). Подовжені кумулятивні заряди з плоскою симетрією (рис. 1.13, б) мають кумулятивну виїмку, поперечний переріз якої може мати форму кута (клиноподібні облицювання), параболи, півкола (напівциліндричні облицювання, тощо). [9,11]

Загальний процес деформації металеві виїмки та формування кумулятивної струї можна побачити на рентгенівських знімках (рис. 1.14) для конічної (1.14,а) та полусферичної (1.14,б) форм облицювання. Ці зображення допомагають зрозуміти, як формується та розповсюджується кумулятивний струмінь при вибуху. [9,10,12]

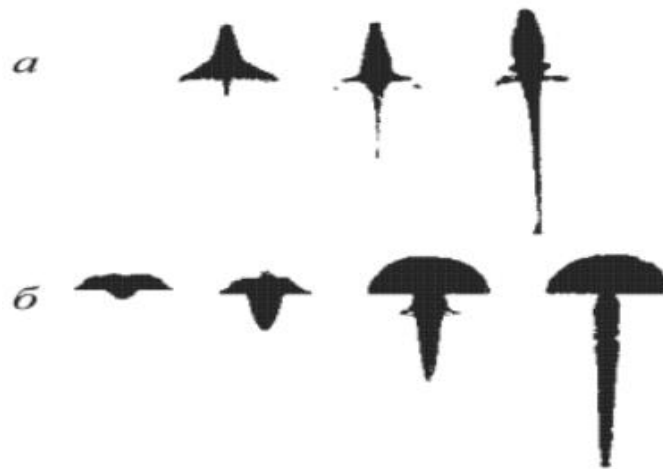


Рисунок 1.14 – Рентгенограми початкової стадії формування кумулятивної струї зарядами з конічним (а) та напівсферичним (б) облицюванням.

На рентгенівських знімках можна відстежити початковий момент процесу обтиску облицювання та рух струї у часі. Тиск продуктів детонації на облицювання може досягати значень від 20 до 60 Гпа, залежно від матеріалу облицювання, кута підходу фронту детонаційної хвилі до поверхні облицювання та характеристик вибухової речовини. Швидкість тонкого металевого облицювання може досягати від 1 до 4 км/с.



На рис. 1.15 можна легко визначити орієнтацію та розтягнення структурних складових в осьовому напрямку. Орієнтація та розтягнення збільшуються по мірі зближення відповідних шарів до осі. Це дає уявлення про динаміку процесу формування кумулятивного струменя [10, 11].

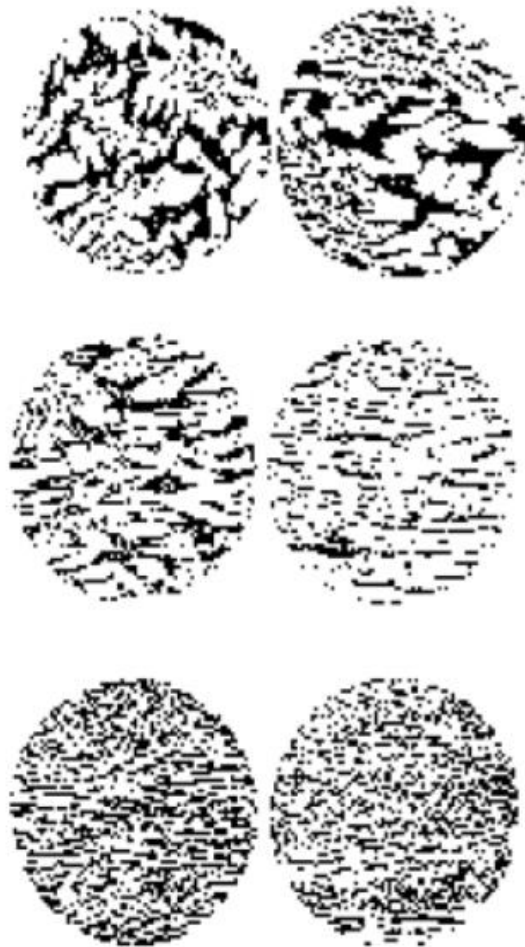


Рисунок 1.15 – Мікрографія шлифів песта (латунь)

Ці рентгенограми можуть демонструвати різницю в швидкостях руху песта та струменя. Це залежить від ряду факторів, зокрема від форми та природи металу облицювання, властивостей вибухової речовини, тощо.

В залежності від цих параметрів швидкість головної частини струменю може значно варіюватися. Наприклад, при використанні облицювання з алюмінію гіперболічної форми швидкість головної частини може досягати 11 км/с.

Основні параметри, що залежать від швидкості головної частини кумулятивного снаряду вказані в таблиці 1.3 [10, 11, 14].

Табл. 1.3. Залежність швидкості головної частини КС від основних параметрів.

Размери заряду		Характер облицювання		Параметри виїмки			Швидкість головної частини струменю, м/с
$d$ , мм	$H$ , мм	Матеріал	$\delta$ , мм	Форма виїмки	$d_0$ , мм	$2\alpha$ , °	
30	70	Сталь дюралюміній	1	Полусфера	28	–	3000 6050
30	70	Сталь дюралюміній	1	Конус	27,2	60	6500 7650
30	70	Сталь дюралюміній	1	Конус	27,2	35	7300 8500
30	70	Сталь дюралюміній	1	Конус	27,2	27	7400 9000
30	70	Сталь дюралюміній	1	Гипербола	27,2	–	9500 –
42	85	Сталь дюралюміній	4 1	Гипербола	37,2	–	7150 10700

$d$ -діаметр заряду,  $H$ -висота заряду,  $\delta$ -товщина облицювання,  $d_0$ -діаметр основи,  $\alpha$ -кут розкриття конусу.

На основі вище викладеного, для отримання найбільшого ефекту від кумулятивного снаряду важливо враховувати фізико-механічні властивості використовуваного металу. Це стосується не тільки обраного матеріалу, але й його поведінки при високих швидкостях деформації, які відбуваються при вибуху. Наприклад чавун, який в звичайних умовах є крихким, але при високих швидкостях деформації (при підриві кумулятивного заряду) виявляє значну пластичність. Це вказує, наскільки важливо розуміти фізичні та механічні властивості матеріалів у таких екстремальних умовах [11].

### 1.3. Огляд теоретичних та експериментальних досліджень процесу обтиску

В роботах [12-13] дослідники дослідили напружено-деформований стан трубної заготовки під час обтиску конічною матрицею, використовуючи математичну модель (див. рис. 1.16). За допомогою теоретичного аналізу були отримані основні рівняння, які дозволяють оцінити напруження в зоні деформації, визначити поле деформацій і розрахувати початкову довжину трубної заготовки.

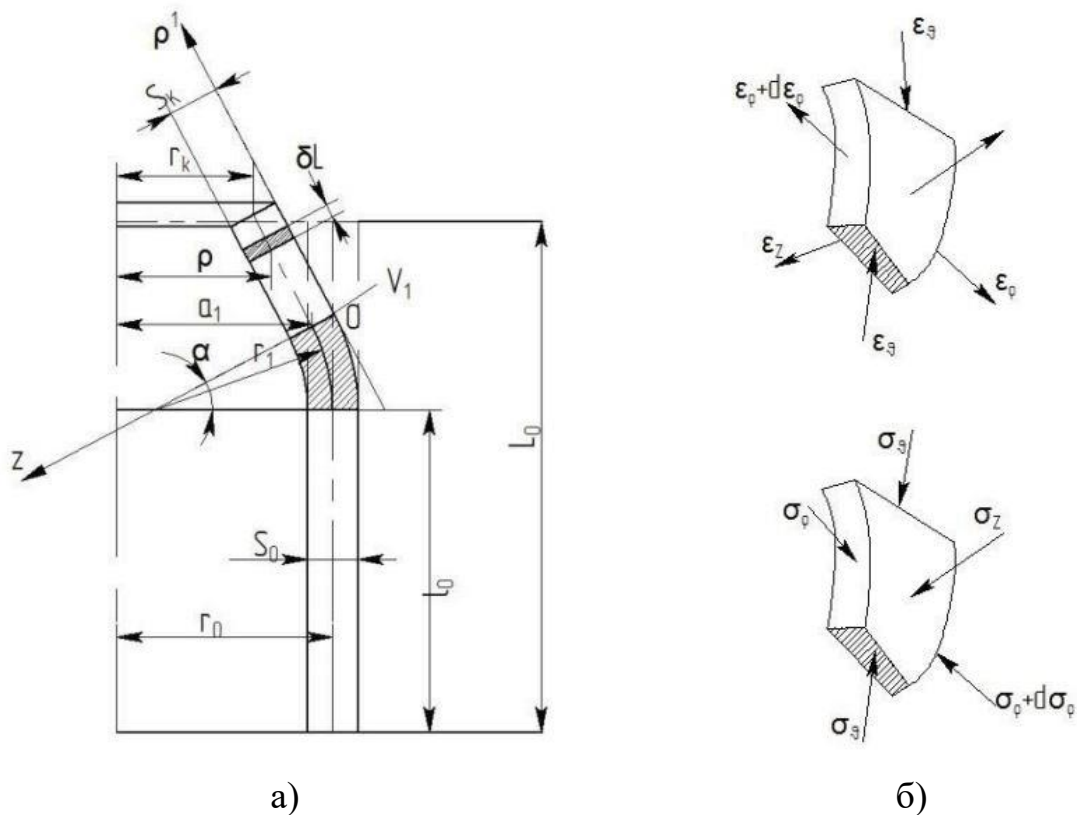


Рисунок 1.16 – Формозміна трубної заготовки операцією обтиску:  
а – схема обтиску; б – діючі у виділеному елементі напруження та деформації, викликані ними

У дослідженні [14] було проведений аналіз процесів роздачі та обтиску циліндричної ортотропної труби за допомогою імпульсного магнітного поля. Автори показали вплив анізотропії механічних властивостей матеріалу на

напружено-деформований стан заготовки під час її формозміни. Анізотропія матеріалу трубчастих заготовок суттєво впливає на напружено-деформований стан під час пластичної деформації, тому її необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів. Також було розглянуто можливість створення заданої анізотропії механічних властивостей матеріалу початкової заготовки з метою впливу у потрібному напрямку на напружено-деформований стан отриманого напівфабрикату шляхом штампування.

У роботах [15-19] застосовувалось комп'ютерне моделювання для вивчення всіх етапів процесу магнітно-імпульсного деформування (обтиску) трубчастих заготовок на циліндричну оправку. Дослідження охоплювало вільне деформування, динамічну взаємодію з оправкою, а також можливе утворення роз'ємного з'єднання. Були оцінені параметри кінематики процесу та залежність напружено-деформованого стану матеріалу заготовки від часу. При цьому використовувалися менші спрощення, враховувалася пружна піддатливість оправки і були зняті обмеження щодо осьового переміщення заготовки.

З проведених досліджень видно, що динамічне деформування заготовки має складний характер. Поява хвильових ефектів спостерігається не лише вздовж товщини матеріалу, але й вздовж осі заготовки при закріпленні одного з торців. Ці хвильові ефекти призводять до нерівномірного розподілу деформацій у всьому об'ємі матеріалу заготовки, що впливає на якість готового виробу. Наприклад, встановлено, що радіальний обтиск призводить до значного осьового видовження зразка, що забезпечує додаткові залишкові радіальні напруження у складальному з'єднанні. Також виявлено, що форма імпульсу тиску не має суттєвого впливу на процес деформування, більш значущим є інтенсивність напружень. Різке зміна швидкостей та прискорень деформування повинна бути врахована при визначенні динамічних властивостей матеріалу та інерційних сил.

У роботах [20-24], авторами були розроблені математичні моделі для операцій обтиску та роздачі циліндричних оболонок з матеріалів, що мають циліндричну анізотропію механічних властивостей. У цих дослідженнях були представлені результати теоретичного аналізу силових режимів та граничних можливостей формозміни при обтиску та роздачі трубних заготовок з врахуванням повзучості.

У роботі [25] було використано метод скінченних елементів (МСЕ) для комп'ютерного моделювання операцій обтиску в поєднанні з потоншенням та видавлюванням товстостінних трубних заготовок. Для моделювання використовувався програмний комплекс QForm 2D-3D v. 7. Головною метою дослідження було отримання результатів теоретичного аналізу силових режимів при поєднанні операцій обтиску, обтиску з потоншенням та видавлюванням товстостінних трубних заготовок. Були встановлені закономірності впливу технологічних параметрів на силові режими при поєднанні операцій обтиску з потоншенням та видавлюванням товстостінних трубчастих заготовок.

На рисунку 1.17 показана готова деталь після суміщення операцій обтиску, потоншення та видавлювання трубчастих заготовок. На рисунку 1.18 зображена заготовка на різних етапах деформування при суміщенні операцій обтиску, потоншення та видавлювання трубчастих заготовок у двох варіантах.

В результаті дослідження були встановлені закономірності, які впливають на силові режими операції суміщення обтиску, потоншення та видавлювання тонкостінних трубчастих заготовок. З'ясовано вплив кута конусності матриці, коефіцієнта тертя, коефіцієнта обтиску та потоншення на ступінь деформацій поперечного перерізу при видавлюванні. Також були визначені оптимальні кути конусності матриці, які призводять до мінімальних значень відносної сили на третій стадії суміщеної операції обтиску з потоншенням або на третій стадії видавлювання трубчастих заготовок.

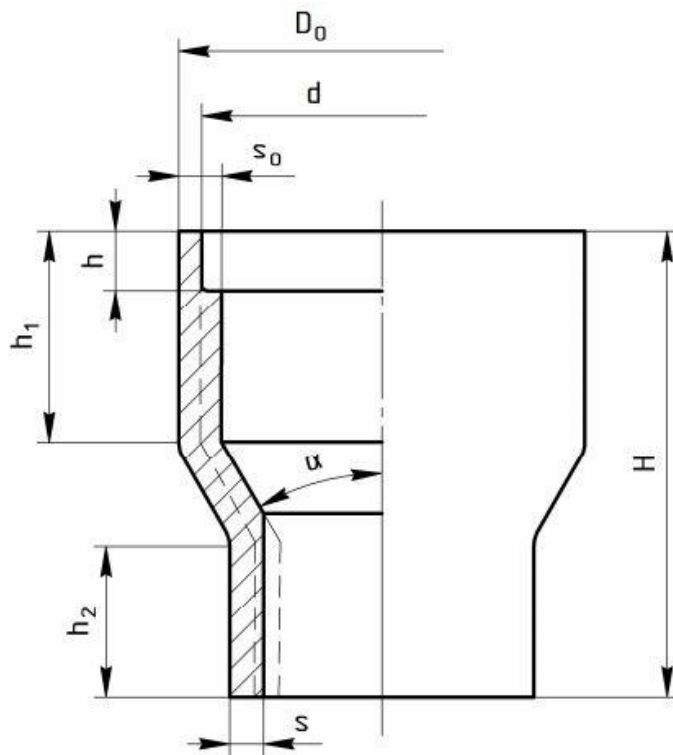


Рисунок 1.17 – Ескіз деталі, яка отримана суміщенням операцій обтиску із потоншенням та видавлювання трубчастих заготовок.

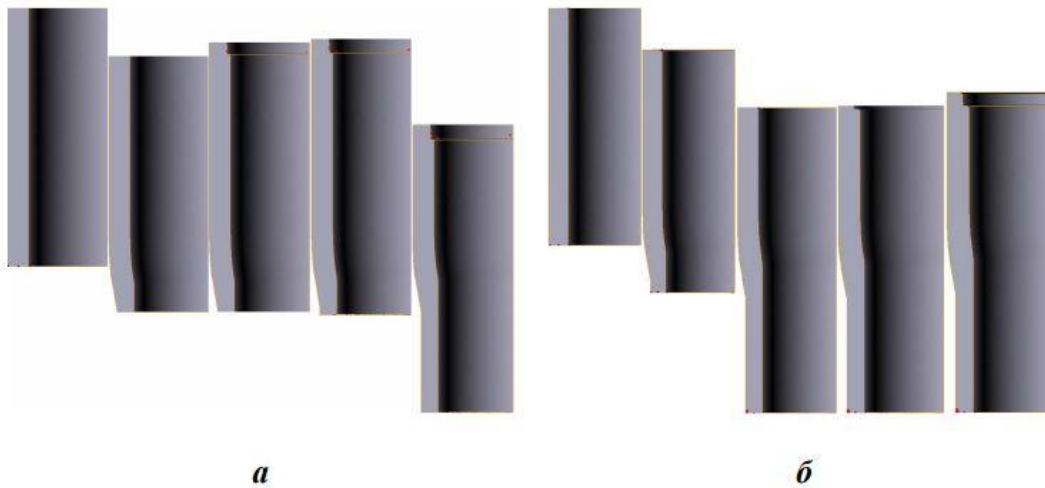


Рисунок 1.18 – Заготовка на етапах деформування при суміщенні операцій обтиску із потоншенням та видавлювання трубчастих заготовок.

У роботі [26] автори наводять основні рівняння та співвідношення для аналізу напруженого та деформованого станів, силових режимів та граничних

можливостей операції обтиску анізотропної трубчастої заготовки за допомогою конічної матриці. Виявлено вплив технологічних параметрів процесу та умов тертя на контактній поверхні на силові режими та граничні можливості формозміни. Оптимальні кути конусності матриці знаходяться в діапазоні 15...20 градусів, що відповідає максимальному значенню граничного коефіцієнта обтиску.

У роботі [27] автори на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень операцій обтиску та роздачі розробили рекомендації щодо розрахунку технологічних параметрів обтиску та роздачі трубних заготовок з анізотропних матеріалів. Ці рекомендації були використані при розробці технологічного процесу виготовлення деталі "Перехідник", де рекомендується використовувати трубчасту заготовку. Використання описаного процесу має техніко-економічні переваги, такі як скорочення термінів підготовки виробництва, зменшення трудоемкості виготовлення деталей на 45% і зниження металоємкості виробництва на 37%.

У роботах [28-29] авторами встановлені закономірності впливу технологічних параметрів на неоднорідність розподілу деформацій по товщині деталі при обтиску із потоншенням та без потоншення товстостінних трубчастих заготовок за допомогою методу скінченних елементів на основі програмного комплексу QForm 2D-3D v. 7. Виявлені закономірності впливу технологічних параметрів, таких як кут конусності матриці, коефіцієнт тертя, коефіцієнт обтиску та потоншення, на неоднорідність розподілу деформацій по товщині деталі при обтиску із потоншенням товстостінних трубчастих заготовок.

У роботі [30] були експериментально визначені напруження текучості сталі 20 в різних зонах обтиснутих товстостінних трубчастих заготовок. Обтиск виконувався за допомогою конічних матриць з різними кутами (10°, 15°, 22° 30') та коефіцієнтами обтиску (1,25, 1,4, 1,55, 1,7). Деформування

проводилося в холодному стані. Значення напружень були визначені розрахунком на основі вимірних значень твердості у одиницях HRB. Ці дані можуть використовуватися для врахування зміцнення при проектуванні технологічних процесів штампування обтиском. Автори у роботі [31] розглянули технологічний процес повздовжнього обтиску на прикладі виготовлення вкладиша шкворня. Схему повздовжнього обтиску при виготовленні вкладиша показано на рис. 1.19.

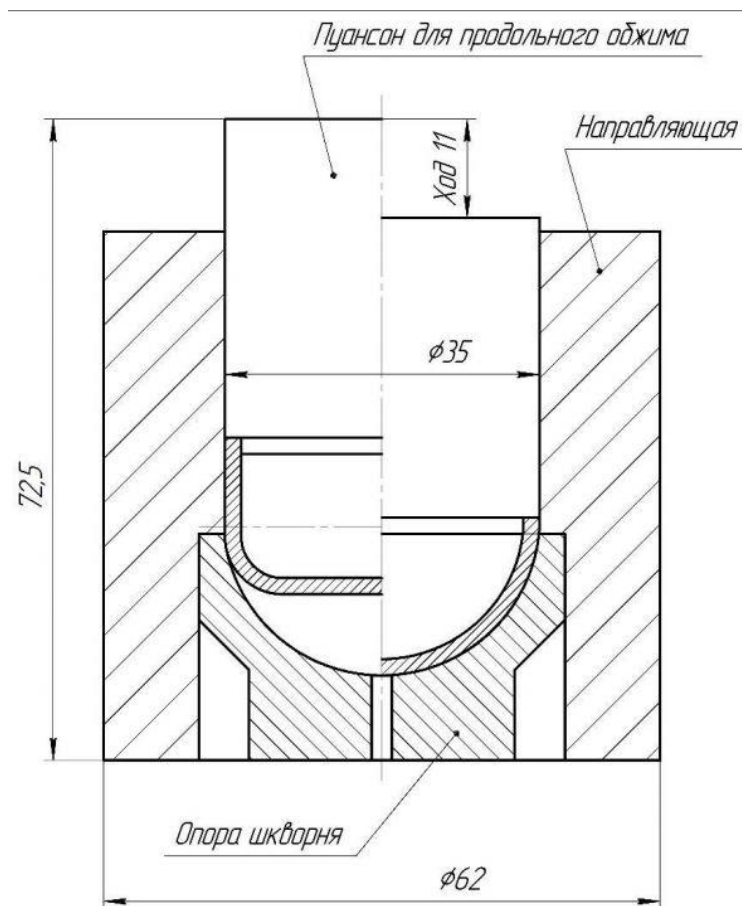


Рисунок 1.19 – Повздовжній обтиск вкладиша шкворня.

У роботі використовувалося комп'ютерне моделювання за допомогою програмного комплексу RAM-STAMP для дослідження впливу коефіцієнта тертя між заготовкою та інструментом, а також відносної товщини заготовки на виникнення втрати стійкості під час повздовжнього обтиску. Були визначені



діапазони технологічних параметрів обтиску, при яких не виникає втрати стійкості. Результати дослідження показали, що коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом має значний вплив на відносну товщину деталі, при якій виникає втрата стійкості. Наприклад, при коефіцієнті тертя 0,01 необхідно використовувати підпору при відносній товщині заготовки менше 0,625; при коефіцієнті тертя 0,1 - при відносній товщині заготовки менше 0,75; при 0,2 - 0,875. Це свідчить про те, що використання змащувальних матеріалів, які знижують коефіцієнт тертя, дозволяє розширити технологічні можливості інструменту. Одним із перспективних напрямків подальших досліджень є теоретичний аналіз впливу відносної товщини заготовки та коефіцієнта тертя між заготовкою та інструментом на виникнення втрати стійкості під час повздовжнього обтиску.

В роботі [32] розглянуто напружений стан крайової ділянки тонкостінної трубчастої заготовки після проходження конічної матриці при обтиску. Застосовуючи рівняння рівноваги та умову пластичності Сен-Венана, був визначений закон розподілу напружень в цій ділянці заготовки. Отримані співвідношення, разом з виразами для складових вільного вигину та випрямлення на виході з цієї ділянки, дозволяють визначити максимальний радіус (діаметр) крайової ділянки трубчастої заготовки на виході з матриці. Також було показано, як радіус переходу з конічної ділянки матриці в циліндричну форму впливає на цей радіус крайової ділянки. Була розроблена методика розрахунку, яка дозволяє обчислити різницю між максимальним радіусом крайової ділянки та радіусом основної частини циліндричної ділянки заготовки, що отримується після проходження матриці. Для перевірки отриманих залежностей був проведений відповідний експеримент, результати якого порівняні з розрахунковими даними.

У роботі [33] був досліджений спосіб обтиску особливо тонкостінних трубчастих заготовок, і були отримані математичні залежності для розрахунку

неоднорідності деформаційного стану в цьому процесі, які добре узгоджуються з результатами експерименту. Також була визначена ступінь впливу сил контактної тертя в даному процесі.

У роботі [34] автори провели дослідження за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) з метою визначення форми вихідної заготовки відповідно до креслення деталі (рис. 1.20) для холодного обтиску (рис. 1.21). Також були встановлені параметри обтиску для виготовлення порожнистого виробу зі змінною товщиною стінки заданих розмірів з високовуглецевої сталі. Розрахунковим шляхом була визначена форма та розміри вихідної заготовки. Автори показали, що для холодного обтиску виробу з необхідною формою використання традиційної матриці не дозволяє отримати його через велике зусилля деформування та потовщення стінок у донній частині zdeформованої заготовки.

У роботі [35] проведено аналіз обтиску з протитиском в сферичній матриці порожнистих заготовок з дном (рис. 1.22), що забезпечує постійну товщину стінки. Автор відзначає, що при традиційному обтиску вісесиметричних трубчастих заготовок та порожнистих заготовок з дном у конічних, сферичних матрицях або матрицях з криволінійною поверхнею, zdeформована частина заготовки потовщується через значні тангенціальні напруження та деформації, що виникають при формуванні виробів. Автор посилається на роботи [36, 37], де проведені дослідження, що показали переваги обтиску з протитиском порівняно з традиційним обтиском.

У роботі автора показано можливість отримання виробів із постійною товщиною стінки за допомогою обтиску з протитиском у сферичній матриці. Для цього було проведено моделювання обтиску традиційної заготовки за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Була встановлена величина потовщення zdeформованої частини заготовки, яка впливає на потоншення стінки вихідної заготовки. Також були визначені зусилля обтиску та

напруження в заготовці. Автори відмітили, що обтиск спрофільованої заготовки дозволяє збільшити ступінь деформації за один процес. За допомогою інженерного методу були отримані аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля деформування. Крім того, у роботі порівняно результати, що були розраховані двома різними методами.

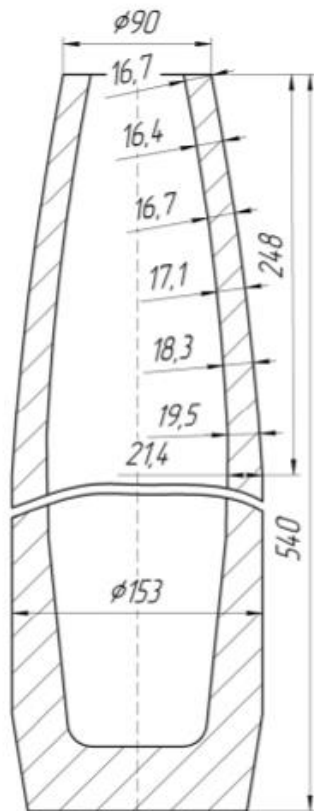


Рисунок 1.20 –  
Креслення  
порожнистого виробу зі  
змінною товщиною  
стінки.

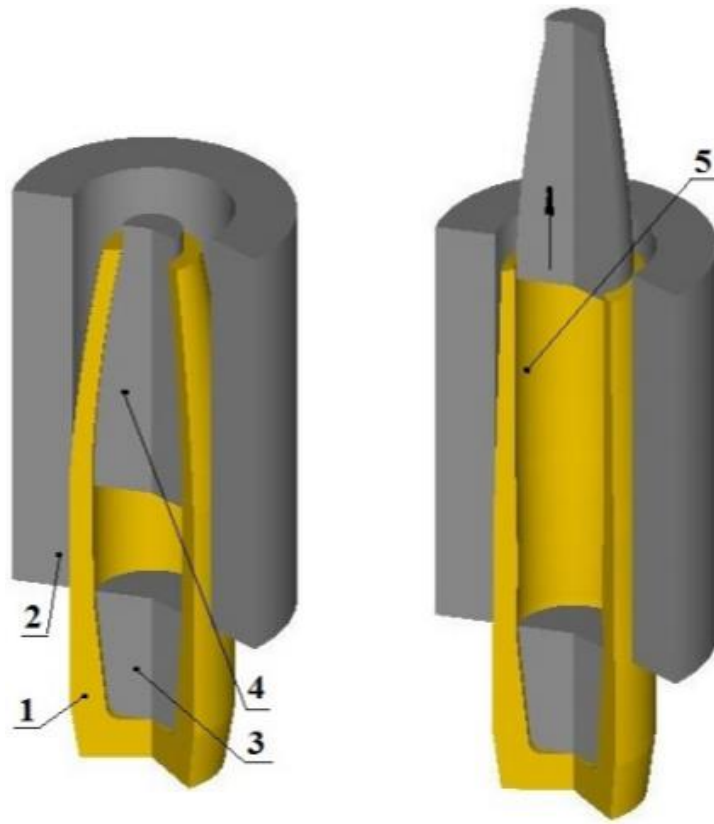


Рисунок 1.21 – Розрахункові схеми для  
встановлення розмірів та форми вихідної  
заготовки для обтиску:  
а – перед вирівнюванням стінки; б – після  
вирівнювання стінки.

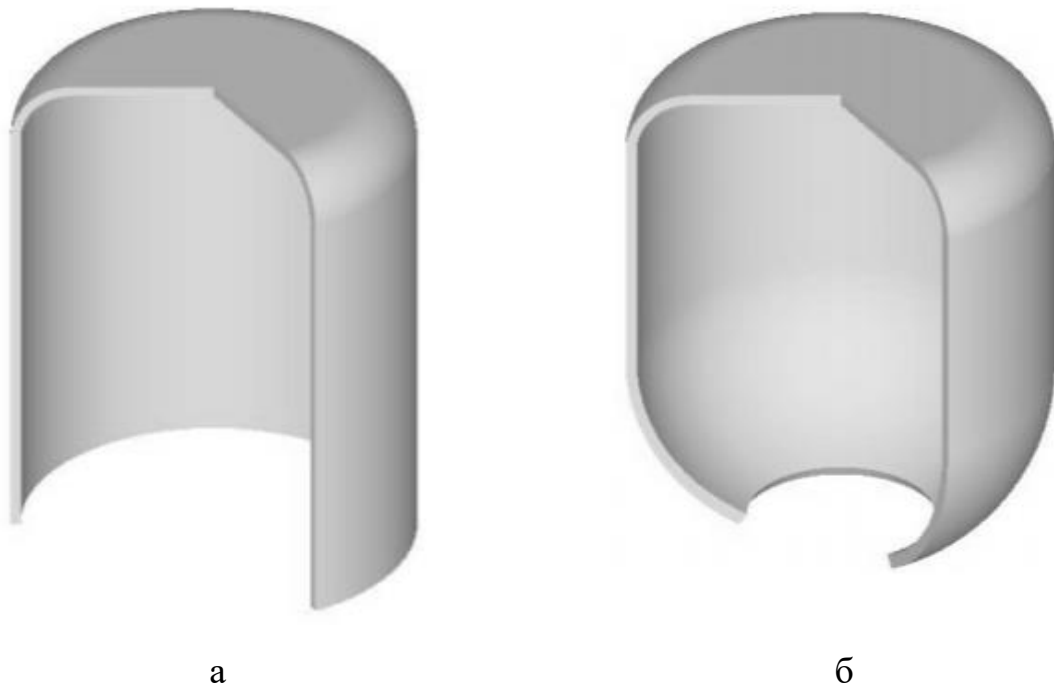


Рисунок 1.22 – Схема в розрізі заготовки:

а – до обтиску; б – після обтиску

У роботі автором [38] було проведено дослідження операції обтиску без потоншення стінки порожнистої циліндричної оболонки, виготовленої з латуні Л63. Дослідження було виконано за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі QFORM 2D/3D v7. Аналіз результатів та побудовані графіки показали, що зі зростанням вихідної товщини стінки заготовки відбувається збільшення напружень та інтенсивності деформацій у зоні формозміни. Варіювання кута нахилу конусності матриці призводить до виявлення оптимальних значень кутів у діапазоні  $15...20^\circ$ , що відповідають найменшому зусиллю під час процесу обтиску. Крім того, автор відмітив, що недоурахування сили тертя при моделюванні операцій процесів об'ємного механічного оброблення (ОМТ) призводить до зниження середнього значення сили на 15...20%.

У роботі авторами [40] було проведено розрахунковий аналіз традиційного обтиску та обтиску із диференційованим протитиском на внутрішню стінку конічної матриці порожнистих заготовок з різною товщиною стінок. Для цього використовувався метод скінченних елементів (МСЕ). Дослідження виявило вплив енергосилових режимів деформування, кінцевої форми та розмірів виробів з обтиснутою конічною частиною та горловиною відносної товщини.

Встановлено, що застосування диференційованого протитиску призводить до збільшення коефіцієнта обтиску порівняно з традиційним способом. Це досягається за рахунок зменшення ймовірності пластичних деформацій в донній частині заготовки, які можуть спричинити викривлення дна.

Крім того, встановлено можливість отримання виробів однакових розмірів з горловиною з заготовок з різною відносною товщиною стінки за допомогою обтиску із протитиском. Саму схему обтиску, яка була піддана розрахунковому аналізу, автори показали на рис. 1.23.

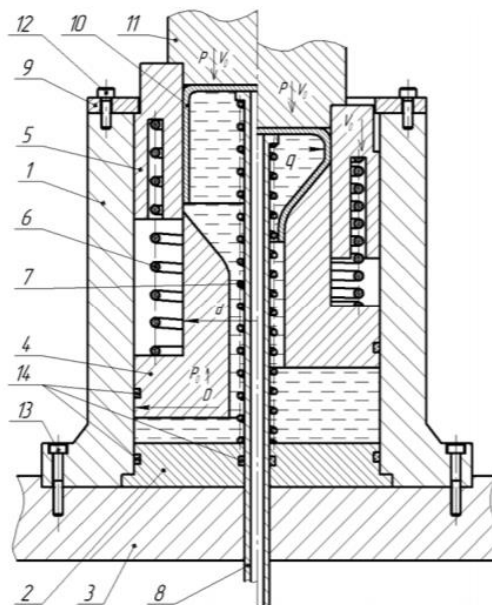


Рисунок 1.23 – Схема способу обтиску із умовами дії диференційованого протитиску на стінки заготовки.

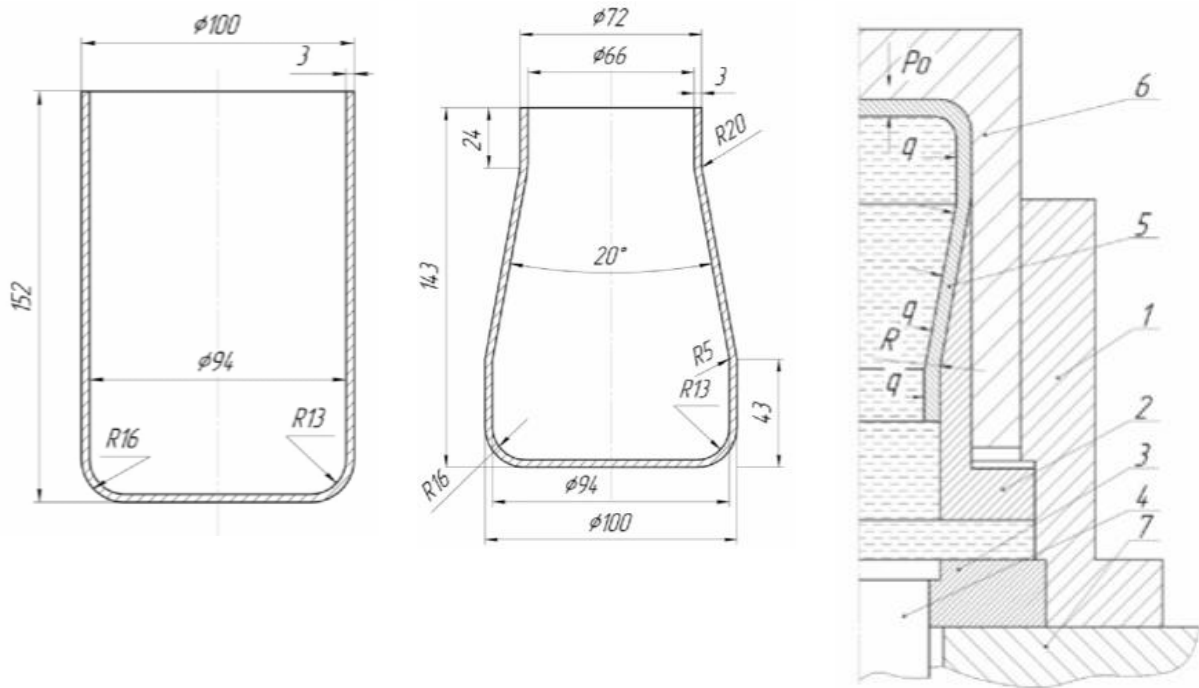
На схемі, показаній на рис. 1.23, представлена наступна конструкція: нижня плита 3 має фіксацію з трьома болтами 13, на якій розміщений нерухомий контейнер 1 з опорою 2. У контейнері 1 розташовані рухома ступінчаста матриця 4 і рухома втулка 5 з пружиною 6. На опорі 2 та плиту 3 закріплена пружина 7, а також на опорі 2 встановлений шток-виштовхувач 8, який має осьовий отвір для відводу повітря при розміщенні вихідної заготовки. Кільце 9 закріплене болтами 12 вгорі на контейнері 1. Простір між внутрішнім та зовнішнім діаметром заповнений робочою рідиною, а діаметри каналів позначені як  $d$  та  $D$ . В рухомій втулці 5 розміщена вихідна заготовка 10, до якої прикладають зусилля деформування  $P_{\text{деф}}$  за допомогою пуансона 11. Під дією зусилля  $P_{\text{деф}}$  заготовка 10 разом з рухомою втулкою 5 опускаються до штока-виштовхувача 8, при цьому повітря витісняється через отвір у штоку. Для повернення рухомої матриці 4 та втулки 5 у початкове положення використовується пружина 6. Рухома матриця 4 та опора 2 мають ущільнення 14.

На схемі зображено стан перед обтиском, де заготовка 10, при опусканні пуансона 11, перекриває канал у штоку-виштовхувачі 8 і порожнини діаметрами  $d$  та  $D$ . Під дією зусилля деформування  $P_{\text{деф}}$  створюється тиск  $q$ , який діє на внутрішню поверхню заготовки 10. Це приводить до того, що рухома матриця 4 починає підніматись вгору, створюючи зусилля  $P_0$ , завдяки різниці площ порожнин. Таким чином, на внутрішню поверхню вихідної заготовки 10 діє протитиск, величина якого залежить від зусилля  $P_{\text{деф}}$ . Рухома втулка 5, в свою чергу, опускається вниз разом з заготовкою 10. Цей процес дозволяє уникнути тертя на зовнішній поверхні вихідної заготовки 10.

Така конструкція і схема обтискання дозволяють застосовувати диференційований протитиск на внутрішню стінку заготовки, що дозволяє отримати однакові розміри виробів з різною відносною товщиною стінок.

В статті [41] авторами був проведений розрахунковий аналіз процесу виготовлення вісесиметричних виробів з горловиною шляхом обтиску порожнистих заготовок з дном. Виявлено, що за допомогою традиційного обтиску неможливо отримати вироби заданих розмірів через деформацію донної частини заготовки.

Однак, був розроблений спосіб обтиску [42], який дозволяє запобігти деформації донної частини заготовки. У цьому способі на внутрішню поверхню застосовується рідина, що створює диференційований протитиск. Для реалізації цього способу був розроблений пристрій [43], який дозволяє знизити зусилля обтиску шляхом уникнення сил тертя між зовнішньою поверхнею заготовки та деформуючим інструментом. На рис. 1.25 показана схема оснащення для обтиску з диференційованим протитиском.



а

б

Рисунок 1.24 – Розміри вихідної заготовки та виробу, що отримується:

а – заготовка, б – виріб

Рисунок 1.25 – Схема оснащення для обтиску із диференційованим протитиском.

Відповідно до схеми на рисунку 1.25, у пристрої, позначеному як "обойма 1", розташована рухома матриця 2, а також встановлена заглушка 3 з виштовхувачем 4. Для створення протитиску  $q$  на внутрішню поверхню заготовки під час формування виробу, робоча рідина наливається в порожнину матриці. Вихідна порожниста заготовка з дном поміщається в матрицю, і зусилля деформації застосовуються за допомогою пуансона 6. Величина тиску  $q$  залежить від розмірів нижнього торця матриці 2 та зусилля деформації, і збільшується пропорційно їх зростанню. Зазначений тиск діє на внутрішню поверхню заготовки, створюючи протитиск, який запобігає втраті стійкості стінки та донної частини заготовки. Радіус заокруглення  $R$  матриці 2 впливає на формування виробу.

У результаті досліджень авторів були визначені кінцева форма та розміри виробу, розподіли інтенсивності деформацій та ступінь використання пластичності zdeформованого металу. Також за допомогою розрахункового аналізу були отримані дані для проектування технології та оснащення штамповим обладнанням.

#### **1.4. Огляд теоретичних та експериментальних досліджень процесу роздачі.**

Авторами в роботі [44] представлені результати моделювання в скінченно-елементному комплексі ANSYS напружено-деформованого стану (НДС) тонкостінної трубчастої заготовки із алюмінієвого сплаву в процесі виготовлення з'єднувального патрубку шляхом роздачі по сталюму пуансону (рис. 1.26). Розглядається вісесиметричний пуансон у вигляді тіла обертання із криволінійною твірною, що має ділянки різного напрямку випуклості. Задача вирішується у вісисиметричній квазістаціонарній постановці. Скінченно-елементна модель включає пуансон та трубчасту заготовку, верхній торець якої піддається переміщенню у вертикальному напрямку вниз, імітуючи дію



оснащення пресу, що передає зусилля на деталь, що деформується. Фрикційна взаємодія відбувається по закону Кулона. Проведений аналіз НДС в системі заготовка-пуансон. Досліджено вплив товщини заготовки та її механічних властивостей на розподіл залишкових напружень, пружне пружиніння після зняття навантаження та потоншення стінок. Розрахункові експерименти проводилися для трубчастих заготовок із товщинами стінки від 0,5 до 2 мм із кроком 0,5 мм. Встановлено, що чим більша товщина стінки при фіксованих висоті та внутрішньому діаметрі, тим більше залишкові напруження та пружиніння в радіальному напрямку після зняття оснащення – і тим менше коефіцієнт запасу міцності в процесі формозміни. Також із збільшенням товщини стінки труби сильніше проявляється неоднорідність розподілу деформацій по товщині. При цьому на відносну величину потоншення товщина стінки впливу не показує. В таблиці 1.4 показані характерні значення деформаційного процесу.

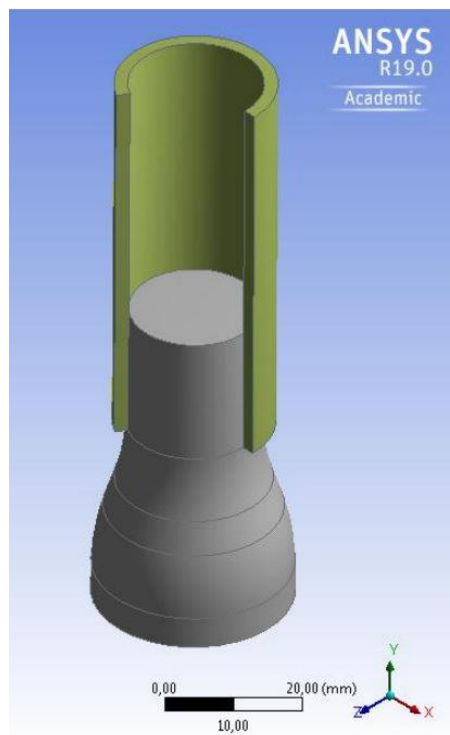


Рисунок 1.26 – Геометрична модель пуансон та трубчастої заготовки (в розрізі).

Табл. 1.4. Характерні значення деформаційного процесу [44].

Товщина стінки труби, мм	0,5	1,0	1,5	2,0
Максимальне потоншення, %	8,39	8,40	8,40	8,45
Максимальне напруження (еквівалентне), МПа	429,7	432,27	439,68	447,12
Максимальне залишкове напруження (еквівалентне), МПа	197,22	214,05	224,43	265,88
Переміщення верхнього торця, мм	32,066	31,95	31,85	31,754
Висота патрубку після зняття оснащення, мм	58,061	58,17	58,27	58,37
Відношення висоти патрубка до висоти заготовки, %	96,779	96,95	97,12	97,28
Пружиніння у вертикальному напрямку, %	0,455	0,428	0,426	0,439
Пружиніння у радіальному напрямку, %	0,658	0,733	0,783	0,808
Коефіцієнт запасу міцності по дотичним напруженням в процесі роздачі / після зняття оснащення	1,0804/ 2,3739	1,0518/ 2,1553	1,0251/ 2,0383	1,0157/ 1,9524
Коефіцієнт запасу міцності по еквівалентним напруженням в процесі роздачі / після зняття оснащення	1,2101/ 2,6367	1,2103/ 2,4293	1,1827/ 2,317	1,163/ 1,9558

В роботі [45] авторами приведена модель операції роздачі трубних заготовок, що володіють трубною анізотропією механічних властивостей. Встановлено вплив технологічних параметрів на НДС заготовки, геометричні розміри заготовки, силові режими та граничні можливості формоутворення роздачі трубних заготовок. Результати розрахунків показали, що граничні можливості формоутворення при роздачі трубних анізотропних заготовок можуть обмежуватися як максимальною величиною стискаючого напруження по абсолютній величині на вході в осередок пластичної деформації, так і локальною втратою стійкості трубної заготовки, умовою стійкості трубної заготовки у вигляді утворення складок та феноменологічним критерієм руйнування анізотропного матеріалу. В кожному конкретному випадку варто перевіряти кожен із перерахованих вище критеріїв.

Автори в роботі [46] розглянули технологічні процеси виготовлення деталей гідрогазових систем літальних апаратів. Проведені дослідження по роздачі середньої частини тонкостінних трубчастих заготовок холодним пластичним деформуванням показали, що найбільш небезпечною є центральна частина розглядаємої частини заготовки, де є значні розтягувальні напруження. Зниження цих напружень, що відбувається при створенні підпору, дозволяє збільшити коефіцієнт роздачі. Запропоновано використання нових типів робочих тіл для передачі тиску в зону деформування.

В статті [47] представлені результати моделювання в програмному комплексі ANSYS процесу роздачі торця тонкостінної трубчастої заготовки по жорсткому пуансону сідлоподібної форми. Задача вирішується в квазістатичній постановці без врахування температурних ефектів. Пуансон моделюється як абсолютно жорстке тіло, заготовка рахується виконаною із алюмінієвого сплаву АМгбМ. Проведений аналіз НДС трубчастої заготовки, досліджено потоншення стінок в залежності від геометричних параметрів пуансона. Результати проведених розрахунків демонструють можливість створення з'єднувальних патрубків із трубчастих заготовок, виконаних із алюмінієвого сплаву АМгбМ, способом роздачі по жорсткому пуансону сідлоподібної форми. Напруження в деталі не перевищують межі міцності матеріалу. Зазор між патрубком та стінкою отвору в магістральній трубі не перевищує 0,5 мм, відповідно, повністю перекриється зварним швом. Зварювальний шов при цьому, у випадку дефекту, не зменшить поперечний переріз відвідної труби. Таким чином, показана можливість створення з'єднувальних патрубків для відвідних труб у трубопроводах, що не потребують додаткової механічної обробки, за одну технологічну операцію.

Авторами в роботі [48] було проведено математичне моделювання за допомогою МСЕ процесу роздачі (рис. 1.27) трубчастих заготовок різними пуансонами (рис. 1.28): традиційним конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном. Поверхня зпрофільованого пуансону (рис. 1.28б) утворена

перетином кіл, центри яких розташовані під кутом з відповідним кроком. Крок їх розташування забезпечує рівну по довжині здеформовану частину заготовки після процесу роздачі. Його застосування приводить до зменшення площі контакту з заготовкою та зниження впливу сил тертя на роздачу. В роботі також встановлено вплив форми пуансона на зусилля процесу, НДС, ресурс пластичності здеформованого металу та визначено кінцеві форму і розміри виробів. За результатами розрахунків було спроектовано та виготовлене експериментальне оснащення для реалізації процесу відкритої роздачі. Проведено експериментальні дослідження, за результатами яких, отримані дані по зусиллю процесу роздачі конусним пуансоном та зпрофільованим пуансоном. Авторами виконано порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Встановлено, що використання зпрофільованого пуансону приводить до зменшення зусилля деформування та збільшення коефіцієнта роздачі.

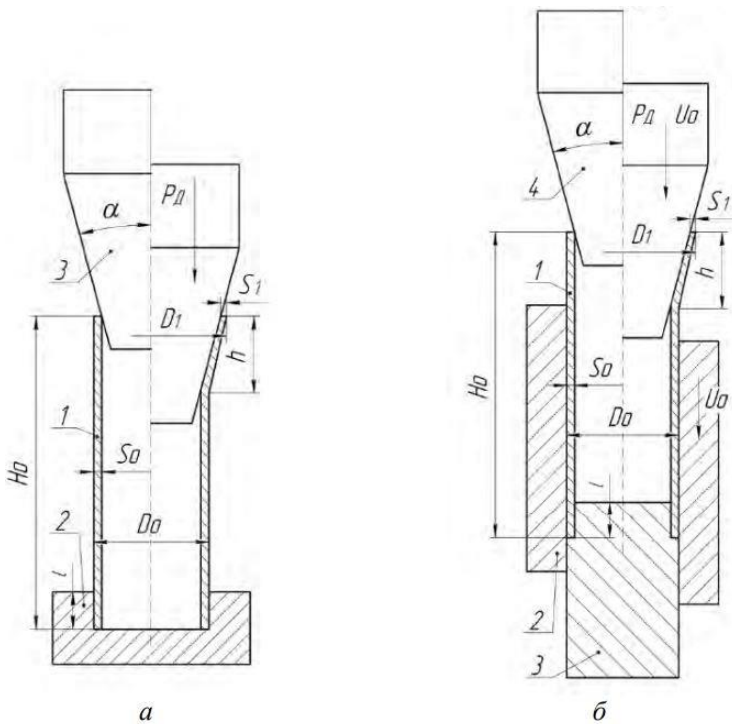


Рисунок 1.27 – Схеми роздачі трубчастих заготовок:  
а – відкрита роздача; б – закрита роздача

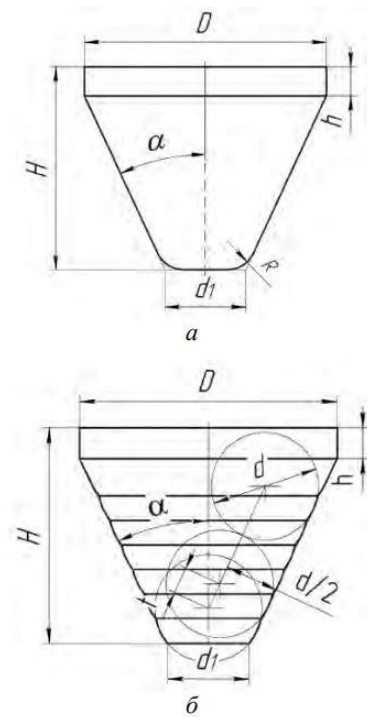


Рисунок 1.28 – Конфігурації пуансонів:  
а- традиційний; б - зпрофільований

## **Висновки по розділу та встановлені задачі дослідження**

В даному розділі проведено аналіз існуючих конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів. В результаті чого встановлені наступні задачі дослідження:

1. Виконати вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.

2. Провести чисельне моделювання поопераційних переходів технологічного процесу за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі DEFORM 2D/3D.

3. Розробити експериментальне штампове оснащення для відпрацювання технологічних поопераційних переходів.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

#### 2.1. Вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.

Кумулятивну воронку для гранатометного пострілу калібром 40 мм показано на рис. 2.1. Матеріал деталі – мідь М0 ГОСТ 859-2014.

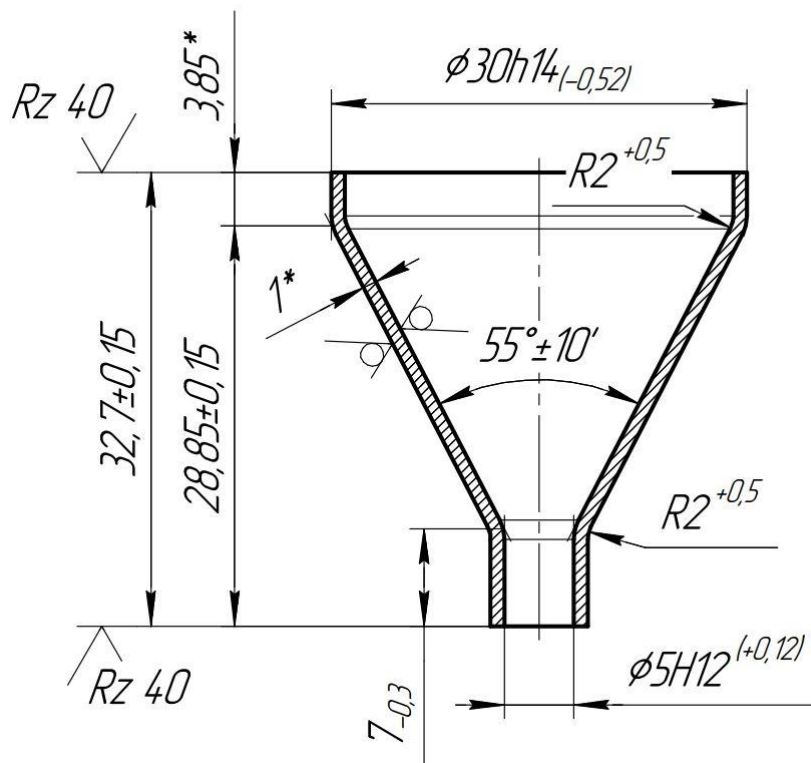


Рисунок 2.1 – Кумулятивна воронка для гранатометного пострілу калібром 40 мм

Кумулятивну воронку можна виготовлювати за допомогою різних технологій. Одним із найпоширеніших методів є штампування. Штампування дозволяє швидко та ефективно виготовляти кумулятивні воронки великими партіями, забезпечуючи високу точність та якість.

Спочатку розглянемо можливість виготовлення даної деталі за допомогою витягування. Деталь, яка отримується витягуванням показано на

рис. 2.2. Для розрахунку розмірів вихідної заготовки визначимо площу поверхні деталі по середній лінії.

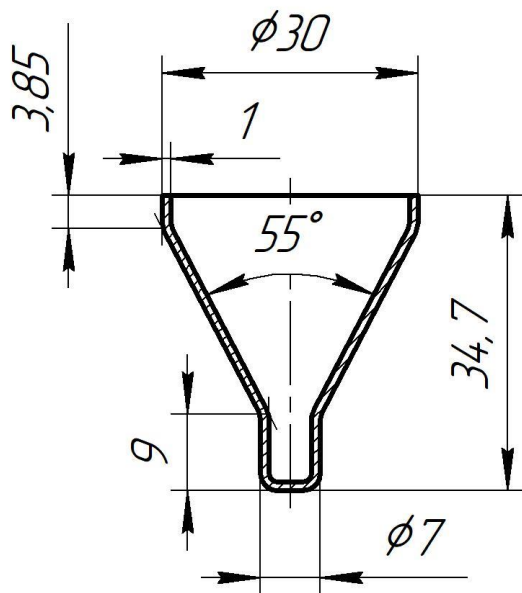


Рисунок 2.2 – Кумулятивна воронка, отримана витягуванням

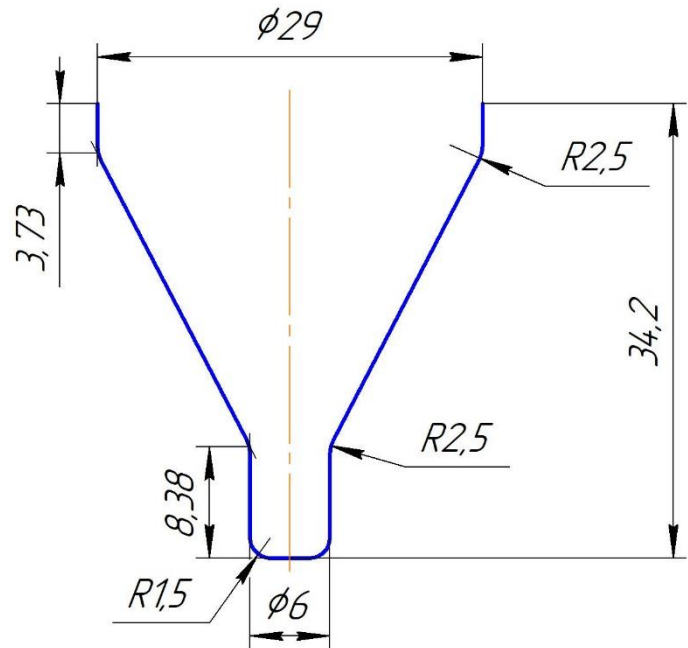


Рисунок 2.3 – Розміри деталі по середній лінії

Площу поверхні кумулятивної воронки визначимо в програмі КОМПАС. Для цього побудуємо модель тіла обертання із розмірами середньої лінії в деталі. Як бачимо із рис. 2.4 площа поверхні деталі по середній лінії  $F_{дет} = 1879,5 \text{ мм}^2$ .

Тоді діаметр вихідної листової заготовки товщиною 1 мм:

$$D_{заг} \approx 1,13\sqrt{F_{дет}} = 1,13 \cdot \sqrt{1879,5} = 49 \text{ мм}$$

Для витягування деталі кінчної форми попередньо встановимо заготовку для неї вже витягнутий стакан циліндричної форми. При цьому з такими розмірами, щоб їх площі по середній лінії були рівними. Розміри циліндричного напівфабрикату та його розміри по середній лінії показані на рис. 2.5 та рис. 2.6 відповідно.

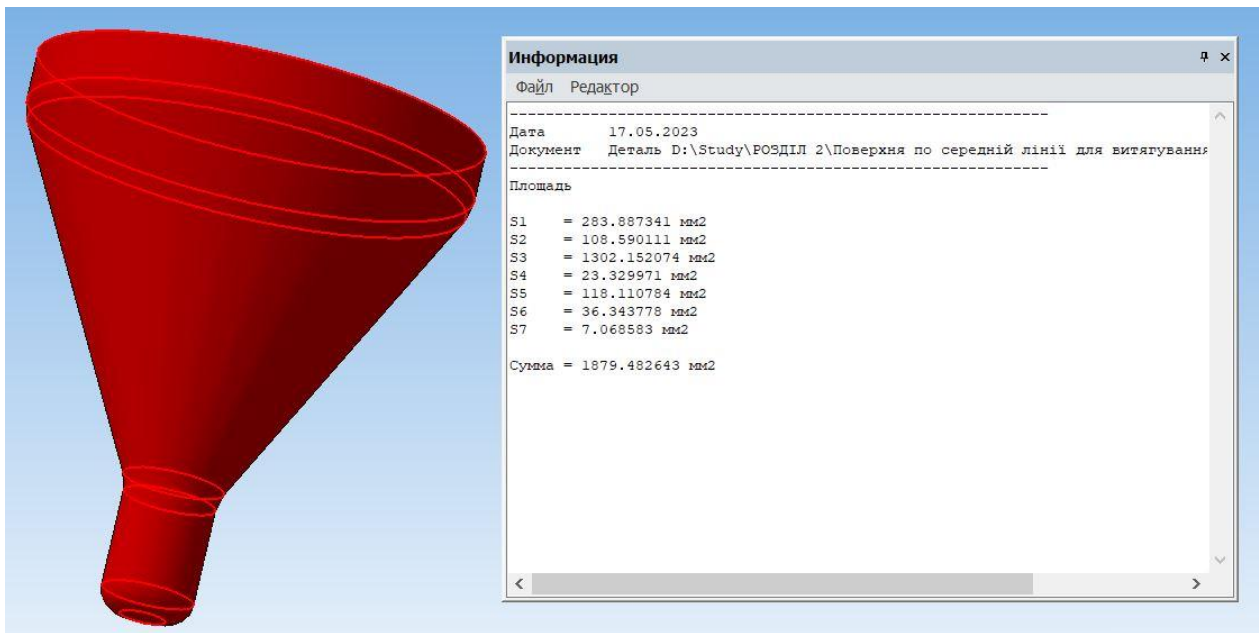


Рисунок 2.4 – Площа поверхні деталі по середній лінії

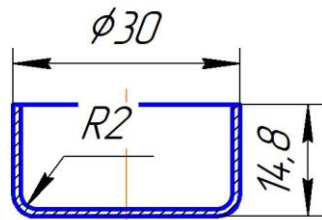


Рисунок 2.5 – Напівфабрикат циліндричної форми

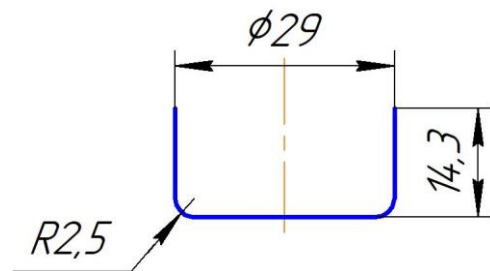


Рисунок 2.6 – Розміри напівфабрикату циліндричної форми по середній лінії

Добавимо також припуск на обрізування. Припуск згідно [Рудман, с. 233, табл. 5] при співвідношенні  $\frac{H_d}{d_n} = \frac{14,8}{28} = 0,53$  та висоті деталі  $H_d = 14,8$ , припуск на обрізування становить:  $\Delta H_d = 2,2$  мм.

Тоді висота циліндричного напівфабрикату буде  $H_d = 17$  мм, діаметр заготовки –  $D_{заг} = 1,13 \cdot \sqrt{1879,5 + \pi \cdot 29 \cdot 2,2} = 1,13 \cdot \sqrt{2079,8} = 51,5$  мм.

Встановимо кількість операцій витягування циліндричного напівфабрикату. Кількість операцій витягування та розміри напівфабрикатів



залежать від заданих коефіцієнтів витягування, які визначають максимально допустиме зменшення діаметра вихідної або проміжної заготовки за одну операцію витягування.

Значення коефіцієнта витягування залежить від властивостей і стану матеріалу, який піддається штампуванню, його абсолютної та відносної товщини, а також таких умов, як стан робочих поверхонь штамп, швидкість витягування та наявність змащення. Через відсутність довідникових даних по допустимим коефіцієнтам витягування по міді, скористуємося коефіцієнтами для м'якої сталі по [Рудман].

Відносна товщина заготовки:

$$\frac{100s}{D_3} = \frac{100 \cdot 1}{51,5} = 1,94$$

Наявність притискача при першому переході витягування визначається з умови [15] с. 243:

$$D_3 - d_1 > 22s,$$

де  $d_1 = 29$  мм – діаметр напівфабрикату, що витягується (по середній лінії);

Перевіряємо виконання цієї умови:

$$D_3 - d_1 = 51,5 - 29 = 22,5 \text{ мм} > 22s = 22 \cdot 1 = 22 \text{ мм}$$

Умова виконується, тому при першому переході витягування потрібен притискач.

Перевіряємо можливість витягування циліндричного напівфабрикату (рис. 2.5) за один перехід.

Допустимий коефіцієнт витягування при  $\frac{100s}{D_3} = 1,94$  та при витягуванні деталі без фланцю з притискачем [Рудман, с. 246, табл. 9]:

$$m_1 = 0,55$$

Розрахунковий коефіцієнт витягування визначається за формулою:

$$m_{\text{розр1}} = \frac{d_{\text{п}}}{D_{\text{зг}}},$$

де  $d_{\text{п}} = d_1 = 29$  мм.

Тоді:

$$m_{\text{розр1}} = \frac{29}{51,5} = 0,56$$

Таким чином:

$$m_{\text{розр1}} = 0,56 > m_1 = 0,55$$

Оскільки розрахунковий коефіцієнт витягування більший допустимого, то витягування можливо виконати за один перехід.

Тепер встановимо кількість переходів для витягування деталі із циліндричної форми в конічної форми. Для цього користуємося допустимими коефіцієнтами із [Романовський, 159]. При  $\frac{100s}{D_3} = 1,94$  допустимий коефіцієнт витягування для деталей конічної форми  $m_n = 0,7$ .

Отже, допустимий діаметр напівфабрикату після другого переходу витягування

$$d_2 = m_n \cdot d_1 = 0,7 \cdot 29 = 20,3 \text{ мм}$$

після третього переходу витягування

$$d_3 = m_n \cdot d_2 = 0,7 \cdot 20,3 = 14,2 \text{ мм}$$

після четвертого переходу витягування

$$d_4 = m_n \cdot d_3 = 0,7 \cdot 14,2 = 9,9 \text{ мм}$$

після п'ятого переходу витягування

$$d_5 = m_n \cdot d_4 = 0,7 \cdot 9,9 = 6,9 \text{ мм}$$

після шостого переходу витягування

$$d_6 = m_n \cdot d_5 = 0,7 \cdot 6,9 = 4,8 \text{ мм}$$

Отже, для отримання кумулятивної воронки, необхідних розмірів (рис. 2.1) необхідно виконати шість операцій тільки витягування, що є не доцільною технологією при її виготовленні.

Розглянемо можливість отримати внутрішній борт кумулятивної воронки (рис. 2.1) та його висоту відбортуванням із максимально обтиснутої заготовки (рис. 2.7). Проте співставивши (рис. 2.8). схему готової воронки та максимально обтисненої заготовки, очевидно, що не вдасться отримати борт необхідної висоти 7 мм та внутрішнім  $\varnothing 5$  мм.

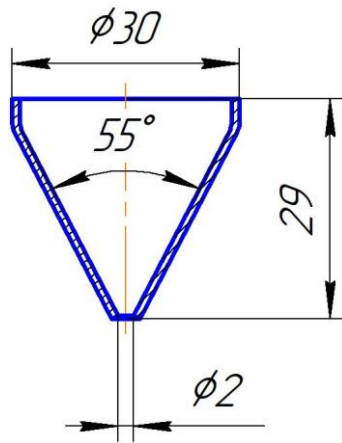


Рисунок 2.7 – Максимально обтиснутий напівфабрикат.

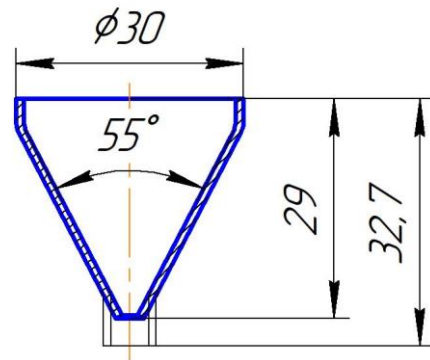


Рисунок 2.8 – Співставлена схема готової кумулятивної воронки та максимально обтиснутого напівфабрикату.

## 2.2. Розробка технології виготовлення кумулятивної воронки з трубчастої заготовки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.

Далі встановимо можливість отримання кумулятивної воронки (рис. 2.1) за допомогою операцій обтиску та роздачі із трубної заготовки змінної товщини, яку показано на рис. 2.9.

Спочатку розраховуємо кількість переходів роздачі до  $\varnothing 29$  мм (по середній лінії). При цьому користуємося граничними коефіцієнтами для м'якої сталі із [Рудман, ст. 340] через відсутність довідникових даних для міді.

При  $\frac{s}{d_0} = \frac{1,4}{(17,8-1,4)} = 0,09$  коефіцієнт роздачі становить  $K_{\text{розд1}} = 1,56$ .

Тоді діаметр напівфабрикату після першого переходу роздачі:

$$d_{\text{розд1}} = K_{\text{розд1}} \cdot d_0 = 1,56 \cdot 16,4 = 25,9 \text{ мм}$$

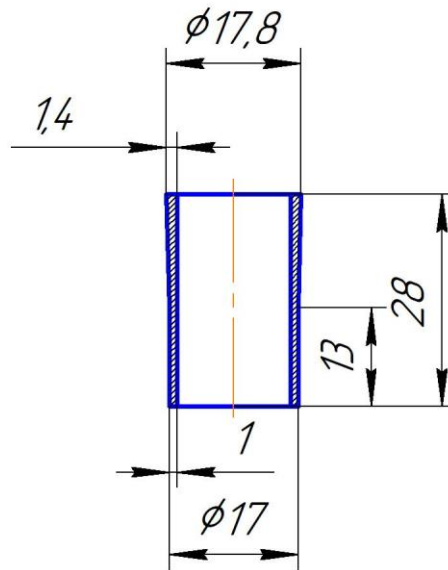


Рисунок 2.9 – Заготовка для обтиск та роздачі

Товщина матеріалу при роздачі зменшується. Найменша товщина в місці найбільшого розтягу становить:

$$s_1 = s \sqrt{\frac{1}{K_{\text{розд1}}}} = 1,4 \sqrt{\frac{1}{1,56}} = 1,2 \text{ мм}$$

Далі розрахуємо який діаметр можна отримати після другого переходу роздачі.

При  $\frac{s}{d_1} = \frac{1,2}{25,9} = 0,05$  коефіцієнт роздачі становить  $K_{\text{розд2}} = 1,5$ . Тоді діаметр напівфабрикату після другого переходу роздачі:

$$d_{\text{розд2}} = K_{\text{розд2}} \cdot d_1 = 1,5 \cdot 25,9 = 38,9 \text{ мм}$$

Найменша товщина в місці найбільшого розтягу становить:

$$s_2 = s_1 \sqrt{\frac{1}{K_{\text{розд}}}} = 1,2 \sqrt{\frac{1}{1,5}} = 0,98 \text{ мм}$$

Далі розраховуємо кількість переходів обтиску до якогось мінімального діаметру. При цьому користуємося граничними коефіцієнтами для м'якої сталі із [Рудман, ст. 340] через відсутність довідникових даних для міді.

При  $\frac{s}{D} = \frac{1,0}{(17-1)} = 0,06$  коефіцієнт обтиску становить  $K_{обт1} = 0,71$ . Тоді

діаметр напівфабрикату після першого переходу обтиску:

$$d_{обт1} = K_{обт1} \cdot D = 0,71 \cdot 16 = 11,4 \text{ мм}$$

Товщина матеріалу при обтиску збільшується. Найбільша товщина в місці найбільшого стиску становить:

$$s_1 = s \sqrt{\frac{1}{K_{обт1}}} = 1,0 \sqrt{\frac{1}{0,71}} = 1,18 \text{ мм}$$

Далі розрахуємо який діаметр можна отримати після другого переходу обтиску.

При  $\frac{s_1}{d_{обт1}} = \frac{1,18}{11,4} = 0,1$  коефіцієнт обтиску становить  $K_{обт2} = 0,68$ . Тоді

діаметр напівфабрикату після другого переходу обтиску:

$$d_{обт2} = K_{обт2} \cdot d_{обт1} = 0,68 \cdot 11,4 = 7,8 \text{ мм}$$

Найбільша товщина в місці найбільшого стиску становить:

$$s_2 = s_1 \sqrt{\frac{1}{K_{обт2}}} = 1,18 \sqrt{\frac{1}{0,68}} = 1,4 \text{ мм}$$

Далі розрахуємо який діаметр можна отримати після третього переходу обтиску.

При  $\frac{s_2}{d_{обт2}} = \frac{1,4}{7,8} = 0,18$  коефіцієнт обтиску становить  $K_{обт3} = 0,61$ . Тоді

діаметр напівфабрикату після третього переходу обтиску:

$$d_{обт3} = K_{обт3} \cdot d_{обт2} = 0,61 \cdot 7,8 = 4,8 \text{ мм}$$

Найбільша товщина в місці найбільшого стиску становить:

$$s_3 = s_2 \sqrt{\frac{1}{K_{обт3}}} = 1,4 \sqrt{\frac{1}{0,61}} = 1,8 \text{ мм}$$

Таким чином виконавши дві операції роздачі та три операції обтиску можна отримати напівфабрикат, показаний на рис. 2.10.

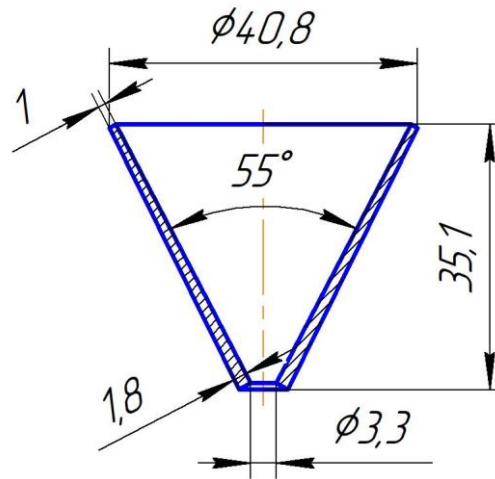


Рисунок 2.10 – Напівфабрикат після обтиску та роздачі.

## Висновки по розділу 2

Виконано вибір та аналіз різних технологій виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм. Встановлено, що для отримання кумулятивної воронки, необхідних розмірів необхідно виконати шість операцій тільки витягування, що є не доцільною технологією при її виготовленні. Розглянуто можливість отримання внутрішнього борту кумулятивної воронки із максимально обтиснутої заготовки. Показано, що неможливо отримати борт необхідної висоти після відбортування найбільш обтиснутої частини. Проведено перевірку технології виготовлення кумулятивної воронки з трубчастої заготовки для гранатометного пострілу калібром 40 мм обтиском та роздачею.

## РОЗДІЛ 3

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КУМУЛЯТИВНОЇ ВОРОНКИ

#### 3.1. Вибір та аналіз технології виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм.

Кумулятивну воронку для гранатометного пострілу калібром 40 мм показано на рис. 3.1. Матеріал деталі – мідь М0 ГОСТ 859-2014.

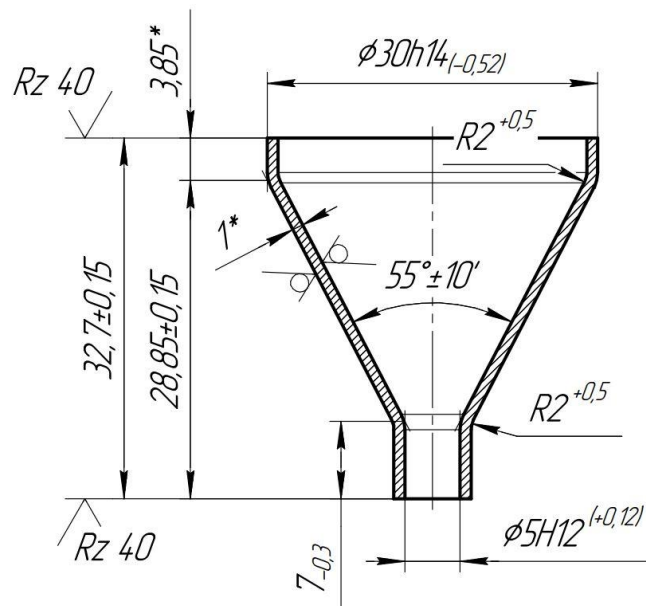


Рисунок 3.1 – Кумулятивна воронка для гранатометного пострілу калібром 40 мм

Кумулятивну воронку можна виготовлювати за допомогою різних технологій. Одним із найпоширеніших методів є штампування. Штампування дозволяє швидко та ефективно виготовляти кумулятивні воронки великими партіями, забезпечуючи високу точність та якість.

Для виготовлення кумулятивної воронки спочатку були прийняті наступні операції листового штампування: обтиск, роздача, відбортування, витягування.

В якості заготовок були прийняті два варіанти трубчастих заготовок (рис. 3.2) змінної товщини, які виточені із цільнотянутих мідних труб  $\varnothing 18$  мм та товщинами  $s = 1,2$  мм та  $s = 1,5$  мм. При цьому ту частина трубної заготовки, яку обтискаємо приймаємо  $s = 1,0$  мм.

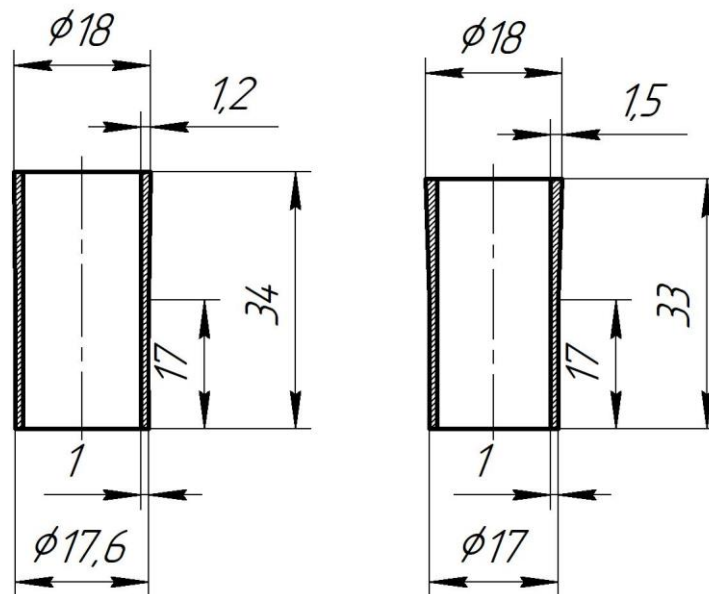


Рисунок 3.2 – Попередньо прийняті трубчасті заготовки змінної товщини для виготовлення кумулятивної воронки

За проведеними розрахунками за доступною літературою, яка виконана під сталь було встановлено, що для виконання обтиску із  $\varnothing 16$  мм (по середній лінії) в  $\varnothing 6$  мм необхідно 4 переходи, а для роздачі із  $\varnothing 17$  мм в  $\varnothing 29$  мм – 3 переходи.

За результатами невдалого моделювання (рис. 3.3) було прийнято провести дослідження можливості максимальної роздачі та обтиску трубчастої заготовки  $\varnothing 18$  мм із М0 змінної товщини за один перехід, а також витягування для отримання зовнішнього борту висотою 3,85 (рис. 3.1).

На рис. 3.4 показана послідовність отримання конусу із розмірами, які були визначені після моделювання.





Рисунок 3.3 – Невдалі спроби моделювання при отриманні кумулятивної воронки гранатометного пострілу 40 мм

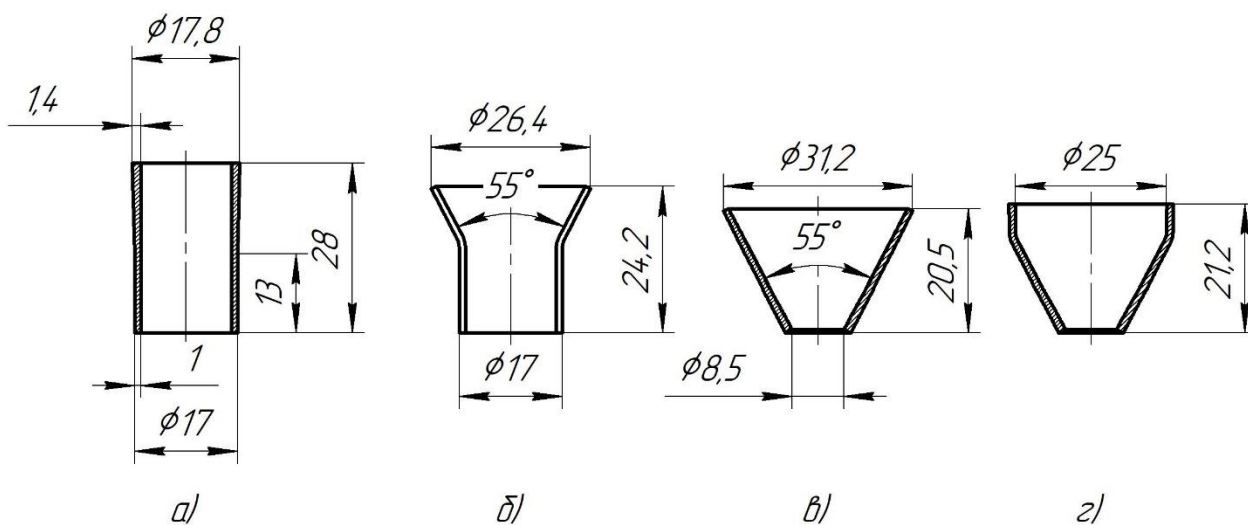


Рисунок 3.4 – Послідовність отримання конусу:

а – вихідна заготовка; б – після роздачі; в – після суміщеної роздачі з обтиском; г – після витягування

### 3.2. Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу роздачі.

Комп'ютерне моделювання виконували в програмному середовищі DEFORM.

Вихідними даними для комп'ютерного моделювання є розміри вихідної трубчастої заготовки та розміри напівфабрикатів по переходам формоутворення (рис. 3.3), які коригувалися по ходу виконання чисельного розрахунку. Для моделювання процесу роздачі трубчастої заготовки було задано наступні граничні умови:

- матеріал заготовки – М0 (аналог в програмі – С10100);
- тип матеріалу заготовки – пластичний;
- тип матеріалу інструментів – жорсткий;
- швидкість деформуючого інструменту та рухомої матриці  $V_0 = 1$  мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону  $\mu = 0,1$ ;
- критерій руйнування – Normalized Cockcroft and Latham.

Розрахункову схему процесу роздачі на початку та в кінці процесу показано на рис. 3.5. Вихідна трубчаста заготовка 1 встановлена на фіксатор 2 в рухомій матриці 4. Зусилля деформування  $P_d$  прикладають за допомогою пуансону 3. При цьому при опусканні пуансону із такою ж швидкістю  $V_M = V_n = 1$  мм/с опускається рухома матриця 4, що виконує функцію радіального протитиску.

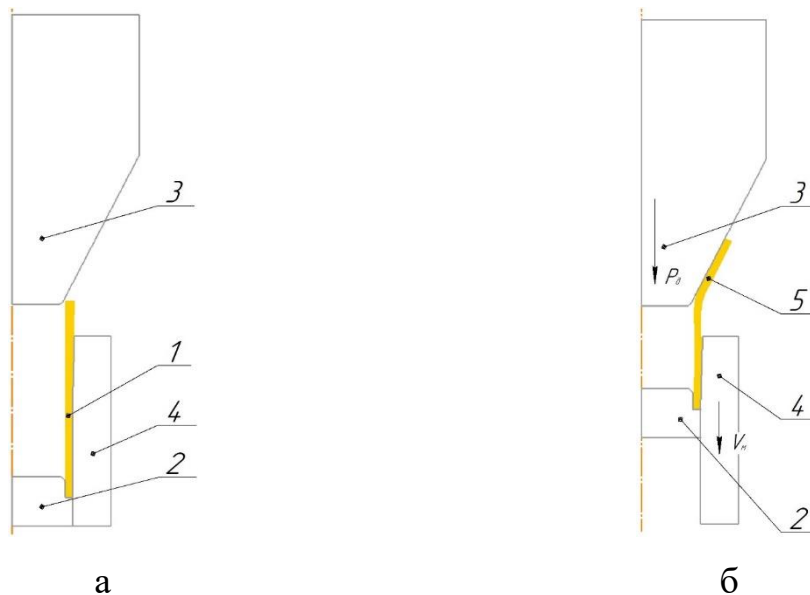


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема процесу роздачі:

а – на початку; б – в кінці

В результаті комп'ютерного моделювання були отримані графіки залежності зусиль, що виникають на пуансоні і на рухомій матриці в залежності від переміщення. На рис. 3.6 показані графіки залежності зусиль, які виникають на пуансоні (рис. 3.6а) та матриці (рис. 3.6б) в залежності від їх переміщення. З графіків, які майже ідентичні видно, що максимальне зусилля як на пуансоні, так і на матриці досягає 9,8 кН в кінці процесу після переміщення на 12 мм.

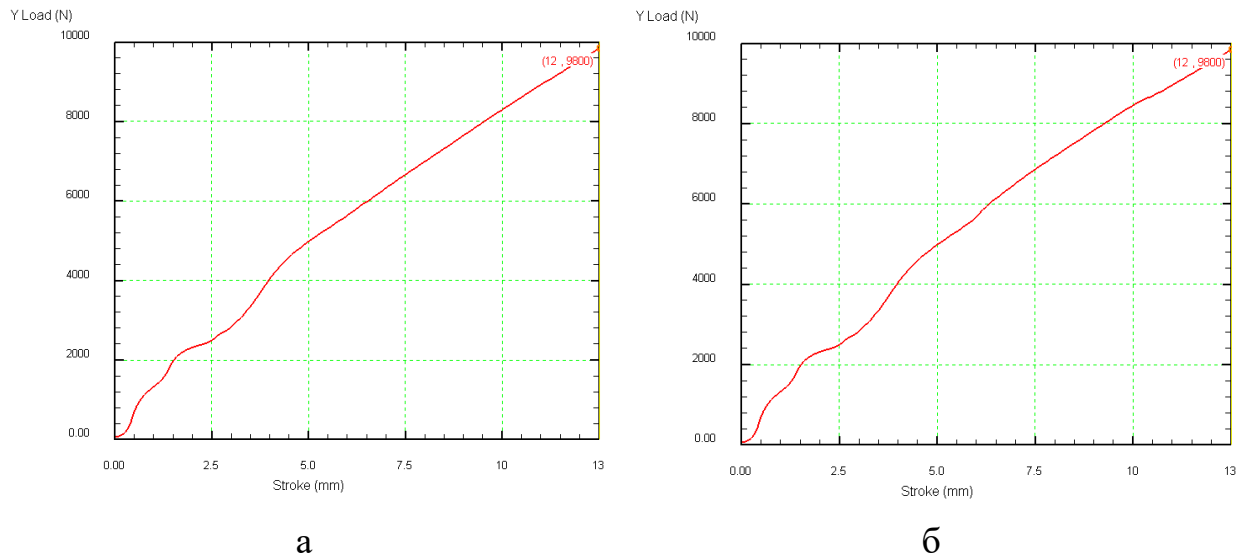


Рисунок 3.6 – Графік залежності зусиль в залежності від переміщення:

а – на пуансоні; б – на матриці

Розподіл компонент напружень після процесу роздачі у здеформованій трубчастій заготовці при максимальному зусиллі показано на рис. 3.7.

На рис. 3.7а показано інтенсивність напружень у здеформованому трубчастому напівфабрикаті, яка переважно знаходиться в межах  $\sigma_i = 168 \div 335$  МПа. Найменші значення інтенсивності напружень  $\sigma_i = 168 \div 209$  МПа виникають вздовж циліндричної напівфабрикату, найбільші  $\sigma_i = 251 \div 335$  МПа – в розданій стінці.

Радіальні напруження, які показано на рис. 3.7б знаходяться в межах  $\sigma_\rho = -150 \div 50$  МПа. У стінці виробу виникають стискаючі радіальні напруження. На внутрішній частині трубчастої заготовки в місці радіусу

переходу від циліндричної до конусної частини напівфабрикату виникають найбільші стискаючі радіальні напруження, які складають  $\sigma_\rho = -150 \div -100$  МПа. На зовнішній частині в місці радіусі виникають розтягувальні напруження в межах  $\sigma_\rho = 0 \div 50$  МПа.

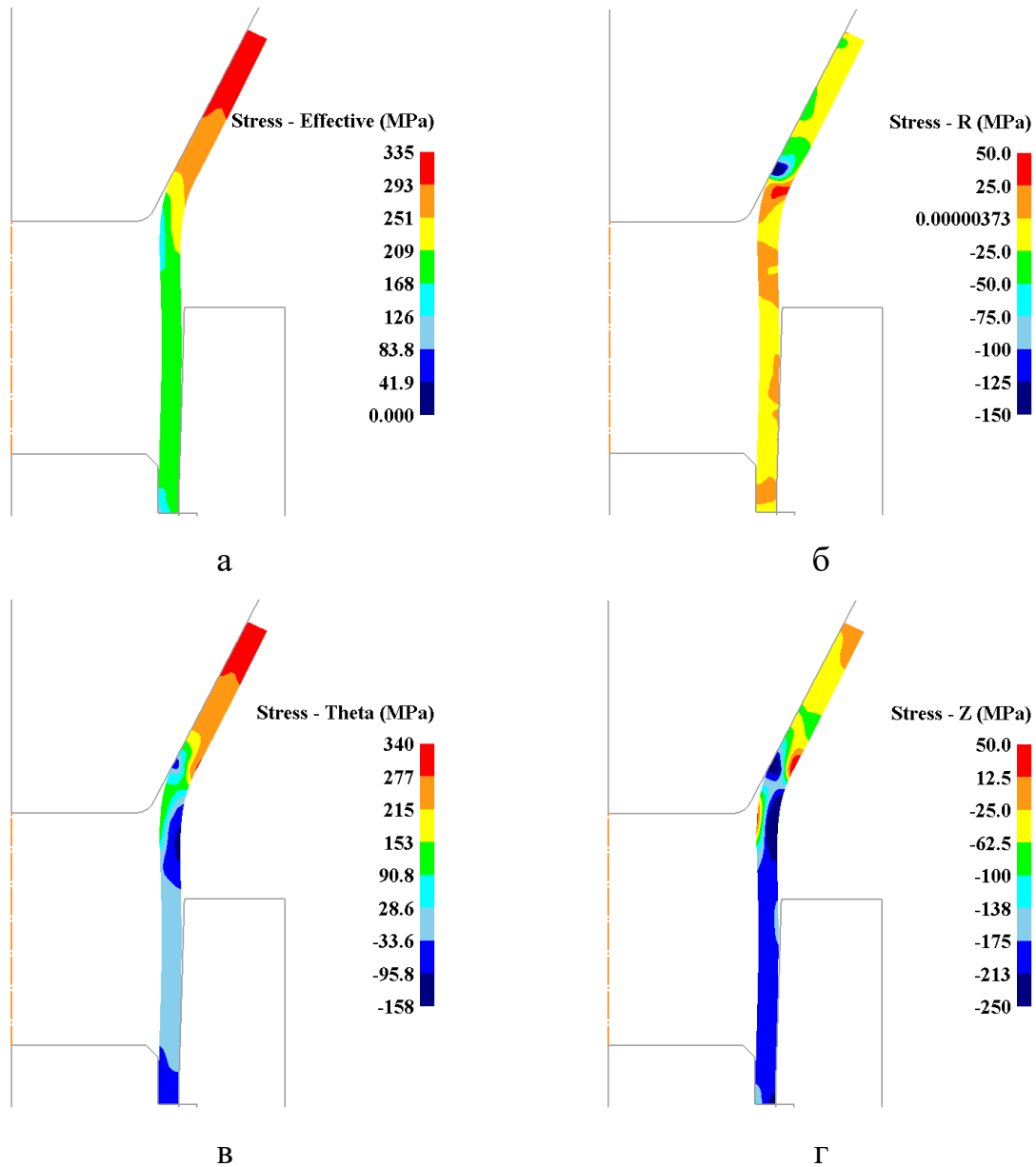


Рисунок 3.7 – Розподіли компонент напружень, продовження:  
а – інтенсивність напружень  $\sigma_i$ ; б – радіальні напруження  $\sigma_\rho$ ; в – тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$ ; г – осьові напруження  $\sigma_z$ .

Тангенціальні напруження знаходяться в межах  $\sigma_{\theta} = -158 \div 340$  МПа (рис. 3.7в). Найбільші стискаючі тангенціальні напруження виникають в зовнішній частині трубчастої заготовки в місці радіусі переходу від конусної до циліндричної частини й становлять  $\sigma_{\theta} = -158 \div -33$  МПа. У розданій конусній стінці заготовки переважають розтягувальні тангенціальні напруження в межах  $\sigma_{\theta} = 215 \div 340$  МПа.

Осьові напруження, які показані на рис. 3.7г знаходяться в межах  $\sigma_z = -250 \div 50$  МПа. Стискаючі осьові напруження виникають в циліндричній стінці розданої заготовки і досягають величини  $\sigma_z = -250$  МПа. Невеликі значення розтягуючих осьових напружень виникають у конусній стінці.

Розподіл компонент деформацій після процесу роздачі у zdeформованому напівфабрикаті показано на рис. 3.8.

Інтенсивність деформацій (рис. 3.8а) знаходиться в межах  $\varepsilon_i = 0 \div 0,5$ . Найменша інтенсивність виникає в циліндричній стінці напівфабрикату та сягає  $\varepsilon_i = 0,06$ . Найбільша величина знаходиться конусній частині стінки та знаходиться в межах  $\varepsilon_i = 0,19 \div 0,5$ .

Радіальні деформації, які показані на рис. 3.8б знаходяться в межах  $\varepsilon_{\rho} = -0,25 \div 0,09$ . Найбільшої величини стискаючі радіальні деформації сягають у торцях конусної стінки zdeформованого напівфабрикату, де знаходяться в межах  $\varepsilon_{\rho} = -0,25 \div -0,16$ .

По всьому об'єму zdeформованого виробу виникають розтягувальні тангенціальні деформації, які показано на рис. 3.8в. Вони знаходяться в межах  $\varepsilon_{\theta} = 0 \div 0,46$ . Найбільшої величини  $\varepsilon_{\theta} = 0,38 \div 0,5$  розтягувальні тангенціальні деформації сягають в торцях конусної стінки виробу, далі поступово зменшуючись до переходу в циліндричну стінку.

Осьові деформації (рис. 3.8г) знаходяться в межах  $\varepsilon_z = -0,25 \div -0,02$ . По всій стінці виробу виникають стискаючі осьові деформацій.

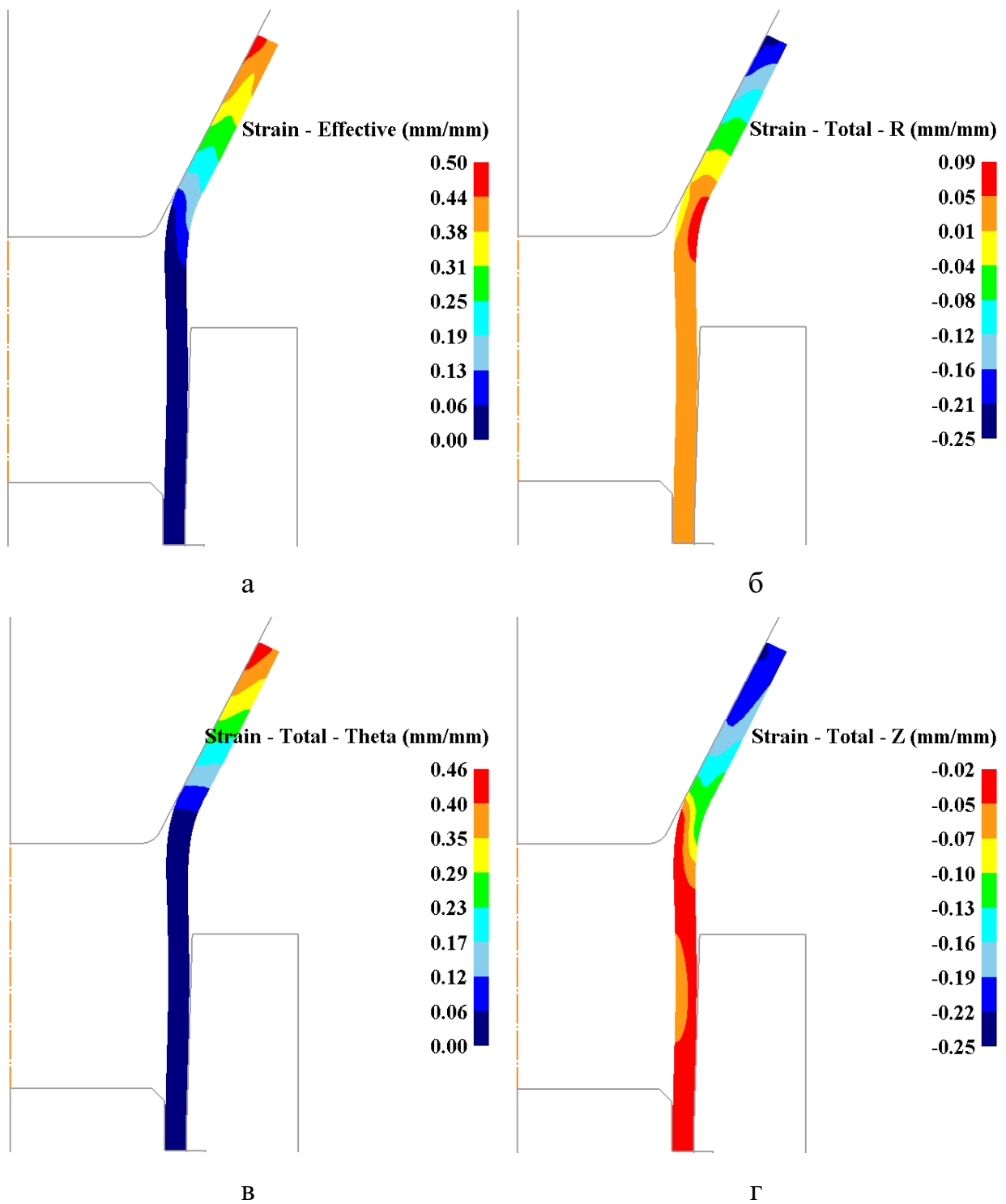


Рисунок 3.8 – Розподіли компонент деформацій в zdeформованому напівфабрикаті:

а – інтенсивність деформацій  $\epsilon_i$ ; б – радіальні деформації  $\epsilon_r$ ; в – тангенціальні деформації  $\epsilon_\theta$ ; г – осьові деформації  $\epsilon_z$ .

На рис. 3.9 показано значення критерію руйнування в zdeформованому трубчастому напівфабрикаті в кінці роздачі. Найбільше значення критерію становить 0,4 на кромках розданої частини напівфабрикату, поступово зменшуючись до переходу в циліндричну стінку.

На рис. 3.10 показані розміри отриманого напівфабрикату.

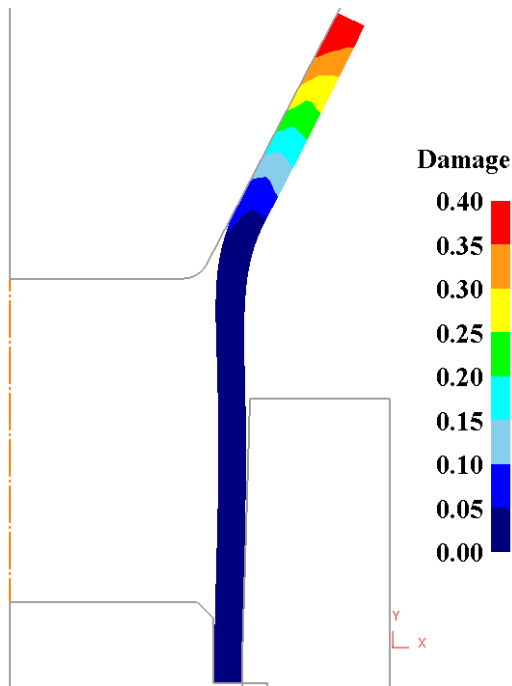


Рисунок 3.9 – Розподіл критерію руйнування в zdeформованому напівфабрикаті після роздачі

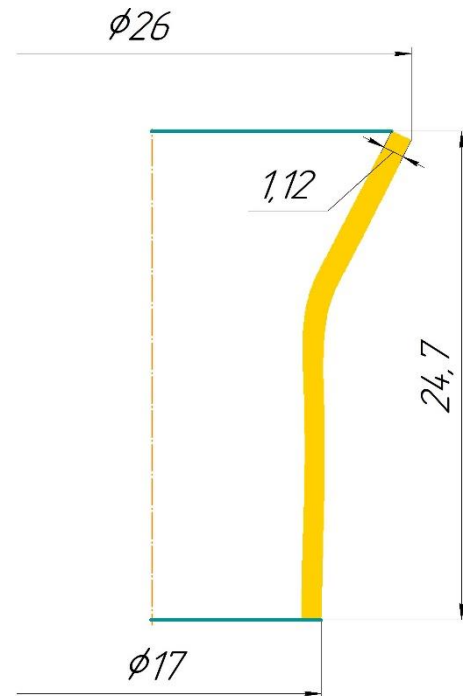


Рисунок 3.10 – Розміри отриманого напівфабрикату після роздачі

### 3.3. Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу обтиску.

Вихідними даними для комп'ютерного моделювання є трубчастий напівфабрикат після роздачі (рис. 3.10) та розміри напівфабрикатів по переходам формоутворення (рис. 3.3), які коригувалися по ходу виконання чисельного розрахунку. Для моделювання процесу обтиску трубчастої заготовки було задано наступні граничні умови:

- матеріал заготовки – М0 (аналог в програмі – С10100);
- тип матеріалу заготовки – пластичний;
- тип матеріалу інструментів – жорсткий;
- швидкість деформуючого інструменту  $V_d = 1$  мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону  $\mu = 0,1$ ;
- критерій руйнування – Normalized Cockcroft and Latham.

Розрахункову схему процесу обтиску на початку та в кінці процесу показано на рис. 3.11. Напівфабрикат після роздачі 1 встановлений розданою частиною на матрицю 2. Зусилля деформування  $P_d$  прикладають за допомогою пуансону 3. При опусканні пуансону відбувається обтиск zdeформованого напівфабрикату 4.

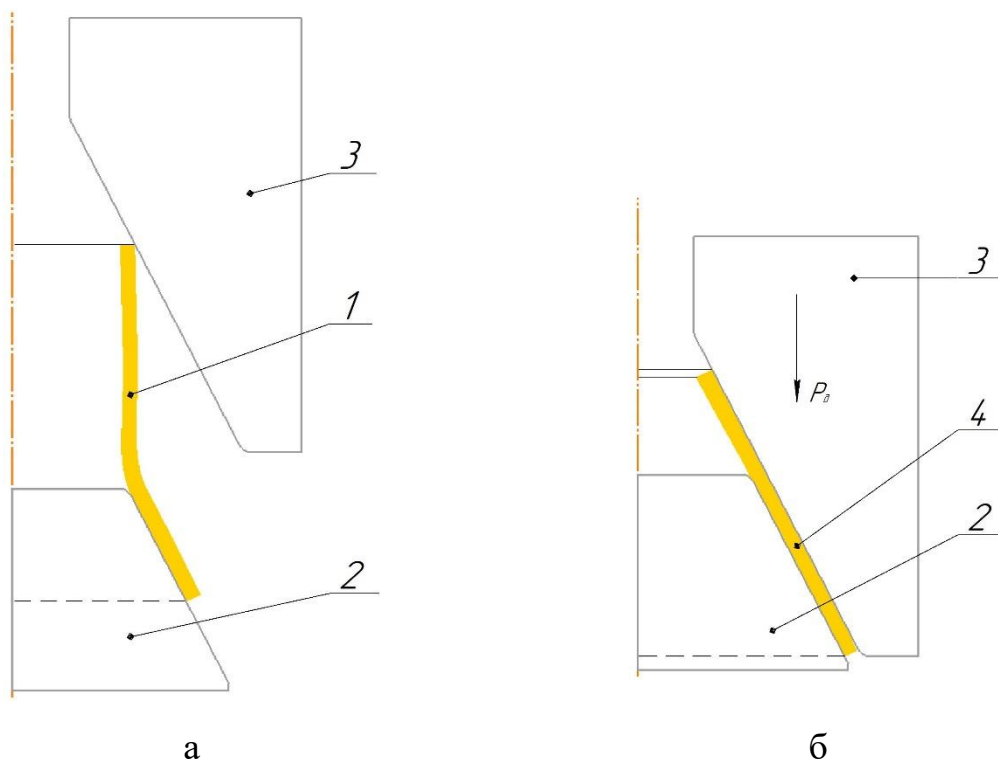


Рисунок 3.11 – Розрахункова схема процесу обтиску:

а – на початку; б – в кінці



На рис. 3.12 показаний графік залежності зусилля, яке виникає на пуансоні в залежності від його переміщення. Максимальне значення зусилля обтиску в кінці деформування при переміщенні пуансону на 15 мм становить 14 кН.

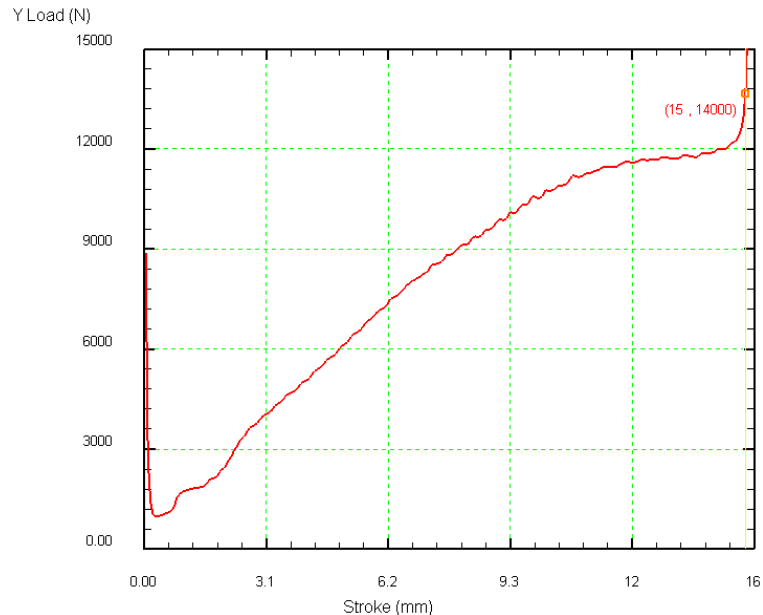


Рисунок 3.12 – Графік залежності зусилля обтиску в залежності від переміщення пуансону

Розподіл компонент напружень при обтиску у zdeформованій трубчастій заготовці при максимальному зусиллі показано на рис. 3.13.

На рис. 3.13а показано інтенсивність напружень у zdeформованому трубчастому напівфабрикаті, яка переважно знаходиться в межах  $\sigma_i = 180 \div 320$  МПа.

Радіальні напруження, які показано на рис. 3.13б знаходяться в межах  $\sigma_\rho = -200 \div 100$  МПа. Тангенціальні напруження знаходяться в межах  $\sigma_\theta = -300 \div 150$  МПа (рис. 3.13в). Найбільші розтягувальні тангенціальні напруження виникають в нижній частині заготовки, яка роздається й становлять  $\sigma_\theta = 100 \div 150$  МПа. У стінці заготовки, яка обтискається

переважають стискаючі тангенціальні напруження в межах  $\sigma_\theta = -300 \div -240$  МПа.

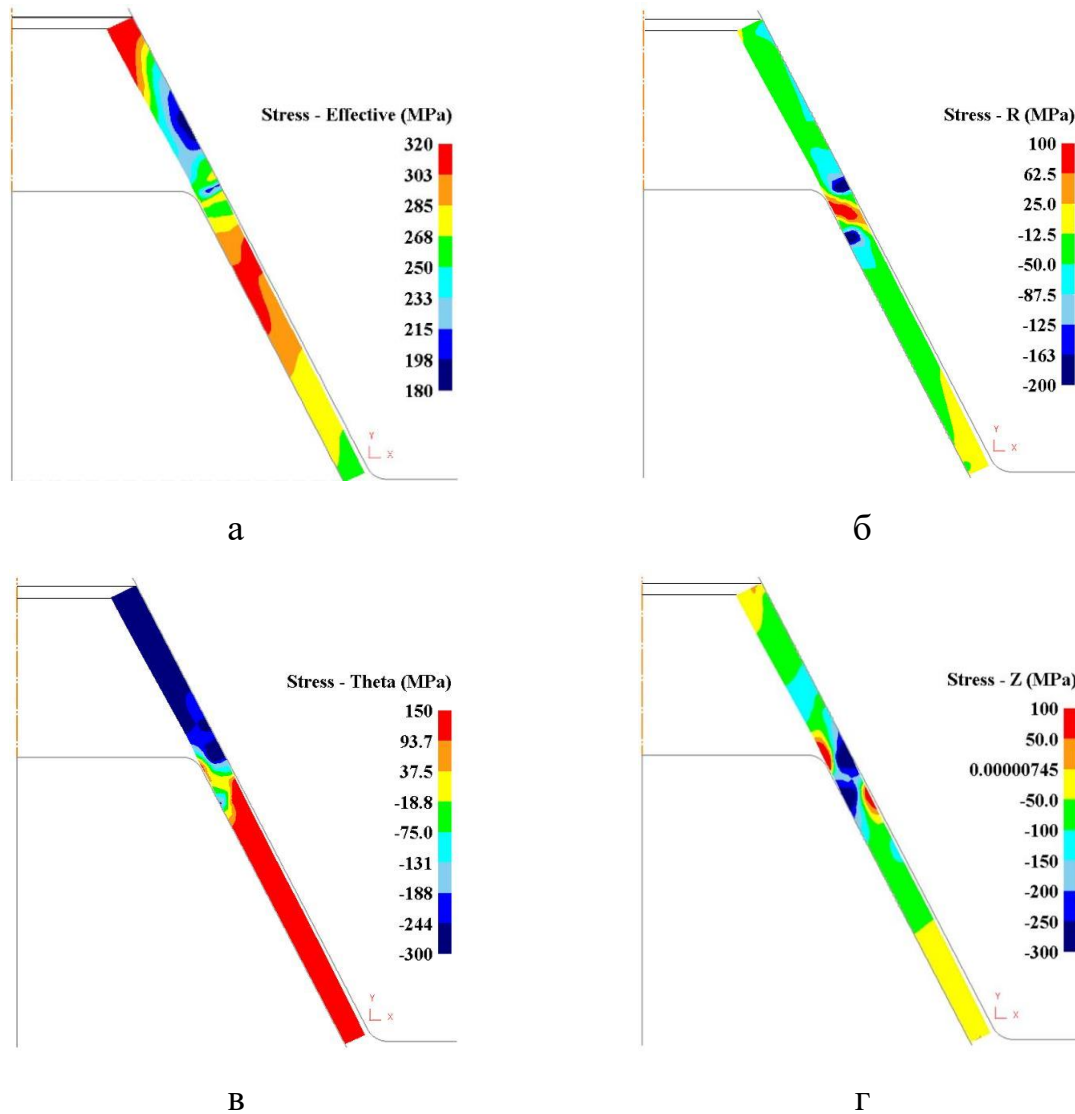


Рисунок 3.13 – Розподіли компонент напружень під час обтиску:  
а – інтенсивність напружень  $\sigma_i$ ; б – радіальні напруження  $\sigma_\rho$ ; в – тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$ ; г – осьові напруження  $\sigma_z$ .

Осьові напруження, які показані на рис. 3.13г знаходяться в межах  $\sigma_z = -300 \div 100$  МПа.

Розподіл компонент деформацій після процесу обтиску у zdeформованому напівфабрикаті показано на рис. 3.14.

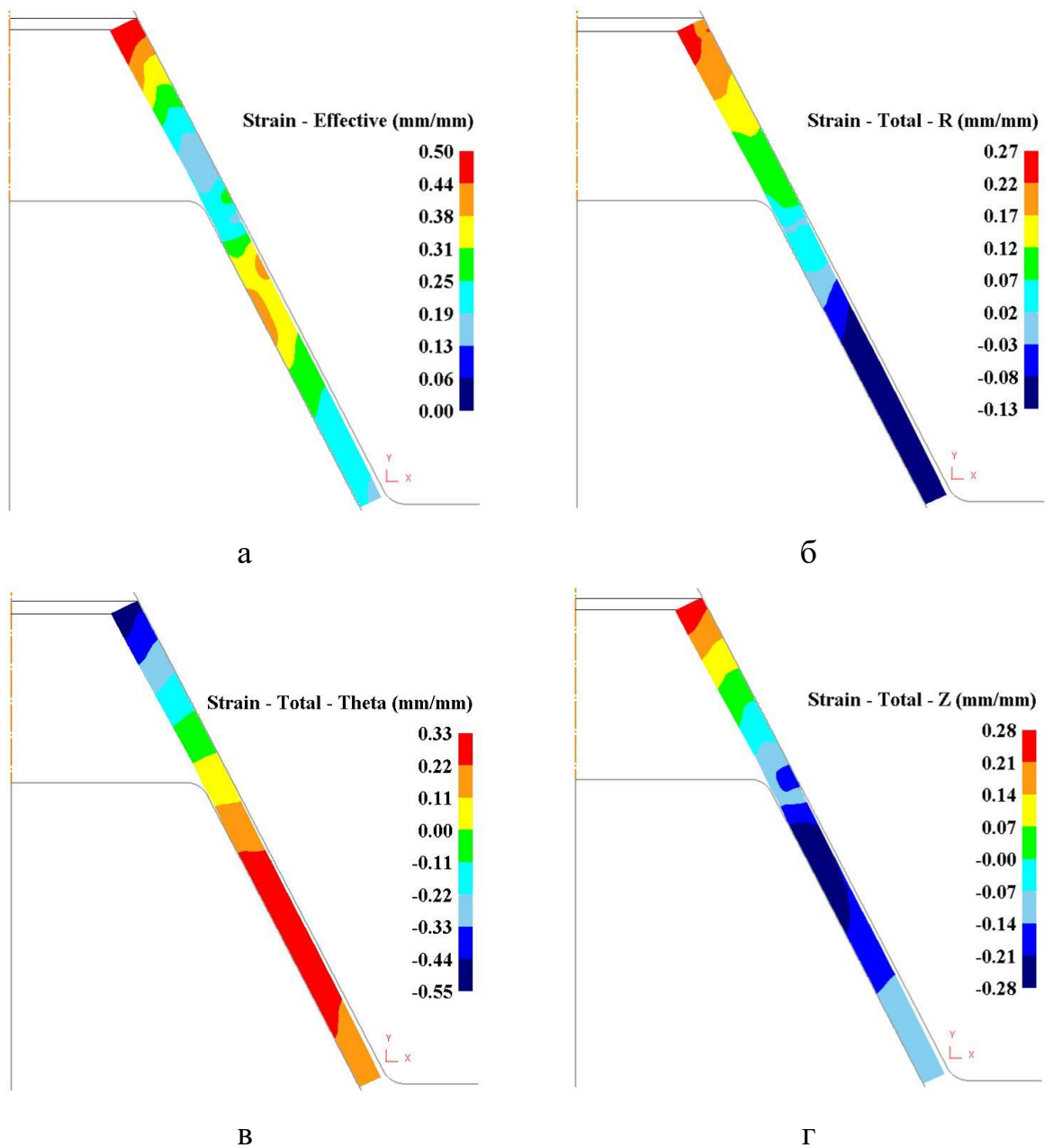


Рисунок 3.14 – Розподіли компонент деформацій в zdeформованому напівфабрикаті після обтиску:

а – інтенсивність деформацій  $\varepsilon_i$ ; б – радіальні деформації  $\varepsilon_\rho$ ; в – тангенціальні деформації  $\varepsilon_\theta$ ; г – осьові деформації  $\varepsilon_z$ .

Інтенсивність деформацій (рис. 3.14а) знаходиться в межах  $\varepsilon_i = 0 \div 0,5$ . Найбільша величина знаходиться на кромці обтисненої стінки і становить  $\varepsilon_i = 0,38 \div 0,5$ .

Радіальні деформації, які показані на рис. 3.14б знаходяться в межах  $\varepsilon_r = -0,13 \div 0,27$ . Найбільшої величини стискаючі радіальні деформації сягають у розданий стінці здеформованого напівфабрикату, де знаходяться в межах  $\varepsilon_r = -0,13 \div -0,08$ . Вздовж стінки, яка обтиснута виникають розтягувальні радіальні деформації.

Тангенціальні деформації, які показані на рис. 3.14в знаходяться в межах  $\varepsilon_\theta = -0,55 \div 0,33$ . Найбільшої величини розтягувальні тангенціальні деформації виникають у розданий стінці здеформованого напівфабрикату, де знаходяться в межах  $\varepsilon_\theta = 0,11 \div 0,33$ . В обтисненій стінці виникають стискаючі тангенціальні деформації.

Осьові деформації (рис. 3.14г) знаходяться в межах  $\varepsilon_z = -0,28 \div 0,28$ .

На рис. 3.15 показано значення критерію руйнування в здеформованому трубчастому напівфабрикаті в кінці обтиску. Найбільше значення критерію становить 0,26 в стінці розданої частини напівфабрикату, поступово зменшуючись до обтисненої частини.

На рис. 3.16 показані розміри отриманого напівфабрикату.

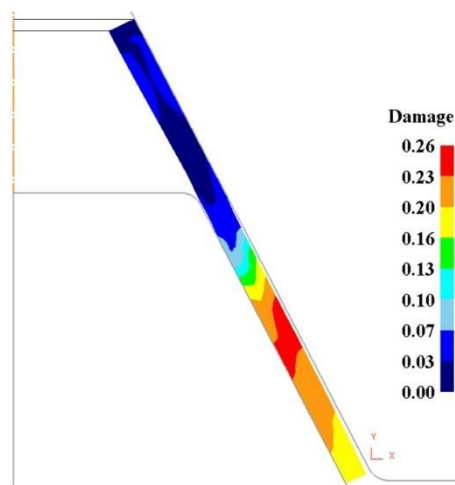


Рисунок 3.15 – Розподіл критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті після обтиску

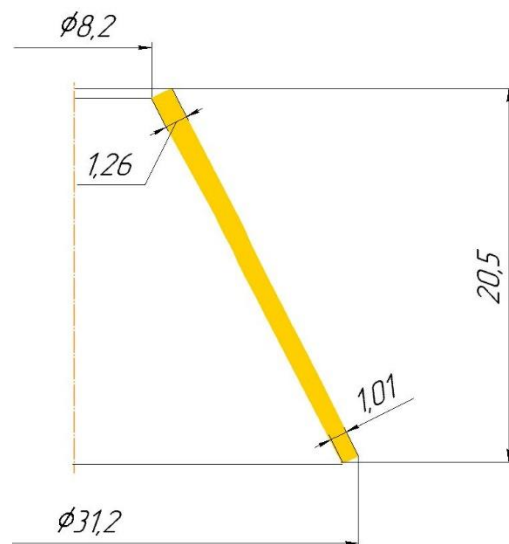


Рисунок 3.16 – Розміри отриманого напівфабрикату після обтиску

### 3.4. Комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів процесу витягування.

Вихідними даними для комп'ютерного моделювання є конусний трубчастий напівфабрикат після обтиску (рис. 3.16) та розміри напівфабрикатів по переходам формоутворення (рис. 3.3), які коригувалися по ходу виконання чисельного розрахунку. Для моделювання процесу витягування трубчастої заготовки було задано наступні граничні умови:

- матеріал заготовки – М0 (аналог в програмі – С10100);
- тип матеріалу заготовки – пластичний;
- тип матеріалу інструментів – жорсткий;
- швидкість деформуючого інструменту  $V_d = 1$  мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону  $\mu = 0,1$ ;
- критерій руйнування – Normalized Cockcroft and Latham.

Розрахункову схему процесу витягування на початку та в кінці процесу показано на рис. 3.17. Напівфабрикат після обтиску 1 встановлений на матрицю 3. Зусилля деформування  $P_d$  прикладають за допомогою пуансону 2. При опусканні пуансону відбувається витягування zdeформованого напівфабрикату 4.

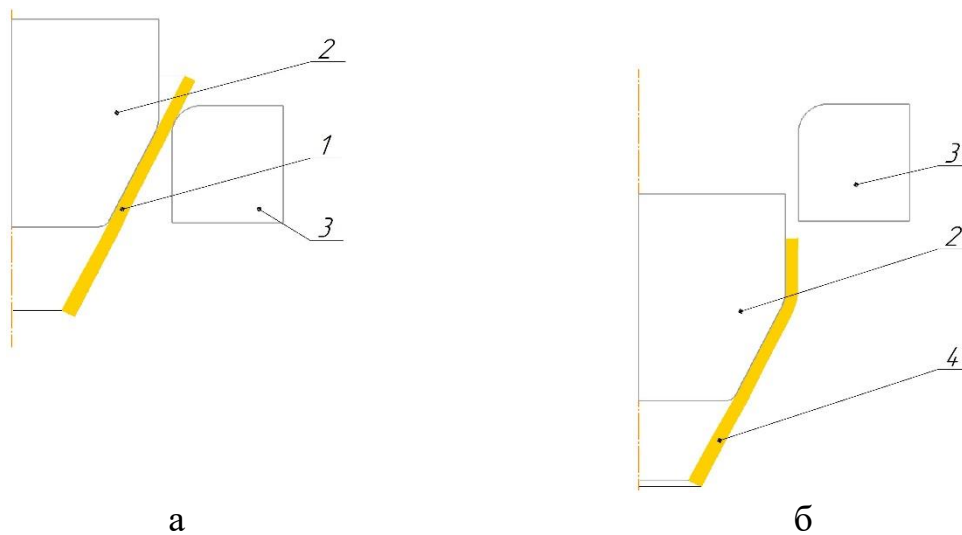


Рисунок 3.17 – Розрахункова схема процесу витягування:  
а – на початку; б – в кінці

На рис. 3.18 показаний графік залежності зусилля витягування, яке виникає на пуансоні в залежності від його переміщення. Максимальне значення зусилля витягування виникає при переміщенні пуансону на 1,5 мм становить 5,6 кН.

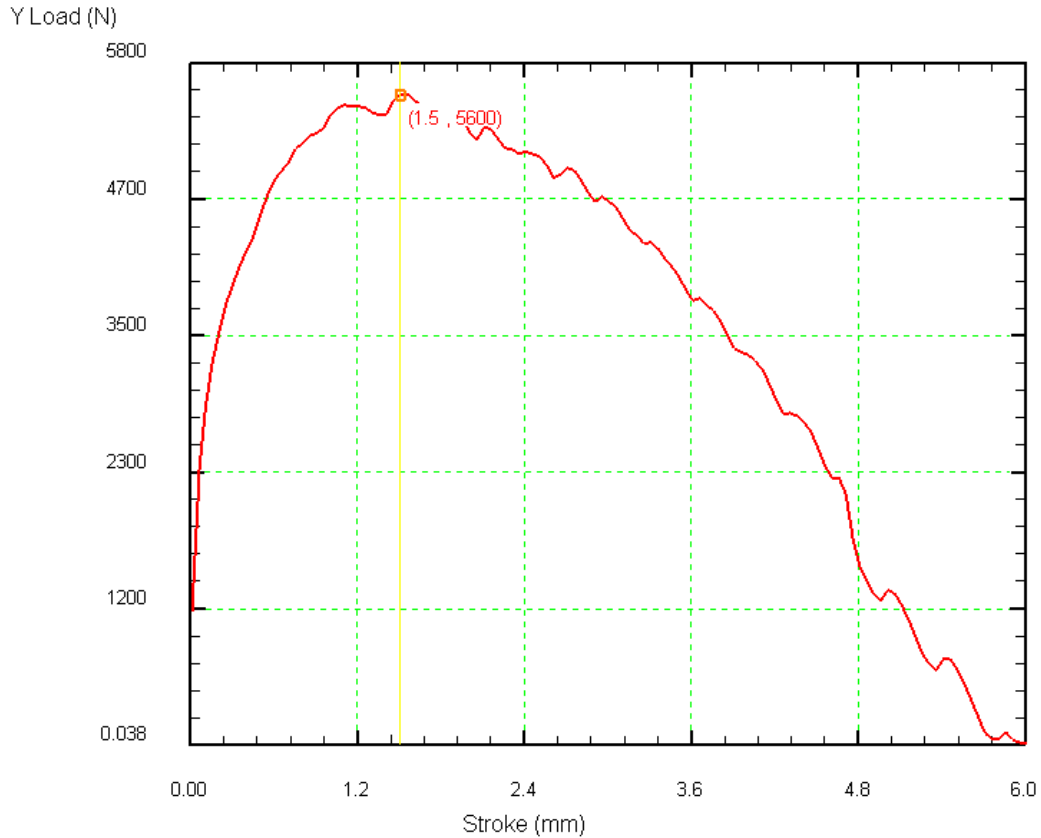


Рисунок 3.18 – Графік залежності зусилля витягування в залежності від переміщення пуансону

Розподіл компонент напружень в напівфабрикаті при витягуванні при максимальному зусиллі показано на рис. 3.19.

На рис. 3.19а показано інтенсивність напружень у zdeформованому трубчастому напівфабрикаті, яка переважно знаходиться в межах  $\sigma_i = 180 \div 320$  МПа.

Радіальні напруження, які показано на рис. 3.19б знаходяться в межах  $\sigma_\rho = -200 \div 100$  МПа. Тангенціальні напруження знаходяться в межах  $\sigma_\theta = -300 \div 150$  МПа (рис. 3.19в). Найбільші розтягувальні тангенціальні напруження виникають в нижній частині заготовки, яка роздається й становлять  $\sigma_\theta = 100 \div 150$  МПа. У стінці заготовки, яка обтискається переважають стискаючі тангенціальні напруження в межах  $\sigma_\theta = -300 \div -240$  МПа.

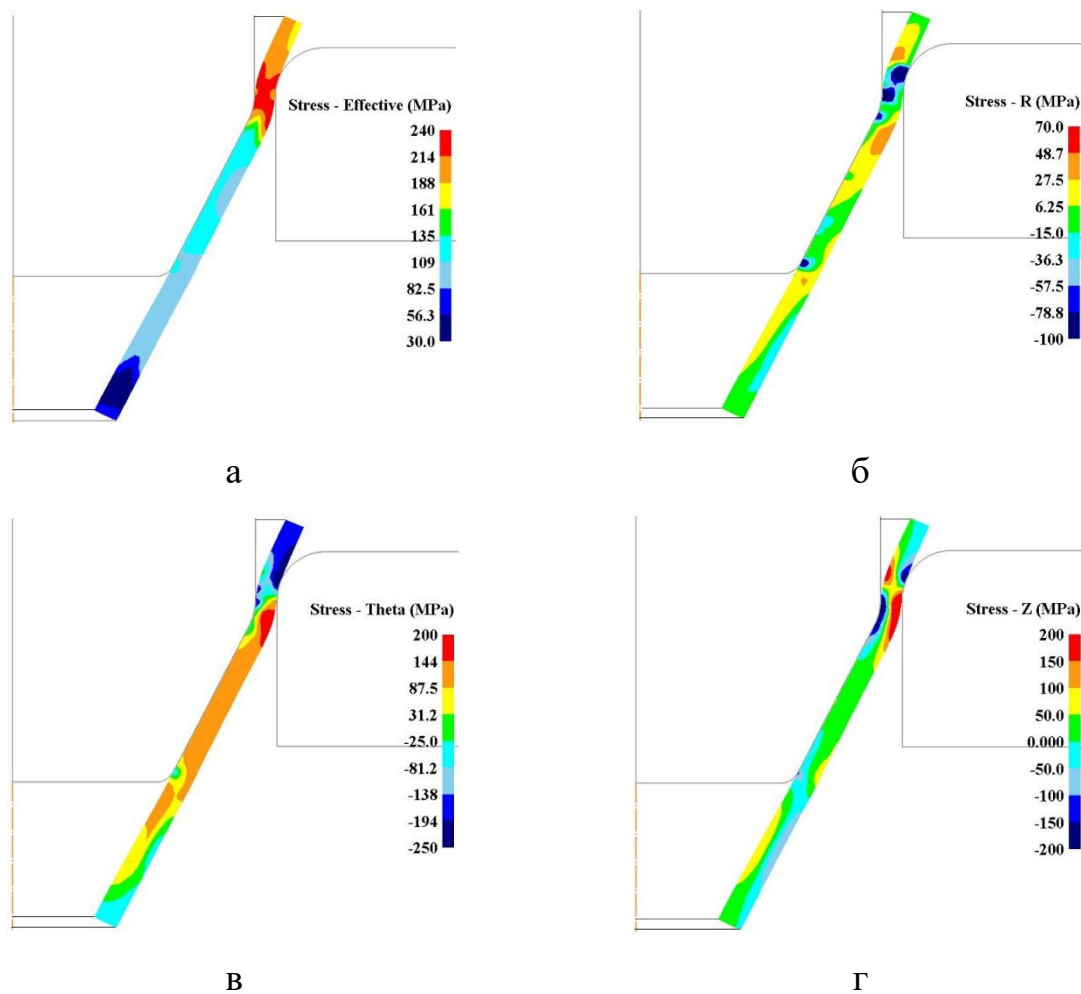


Рисунок 3.19 – Розподіли компонент напружень під час обтиску:  
а – інтенсивність напружень  $\sigma_i$ ; б – радіальні напруження  $\sigma_\rho$ ; в – тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$ ; г – осьові напруження  $\sigma_z$ .

Осьові напруження, які показані на рис. 3.19г знаходяться в межах  $\sigma_z = -300 \div 100$  МПа.

Розподіл компонент деформацій після процесу витягування у zdeформованому напівфабрикаті показано на рис. 3.20.

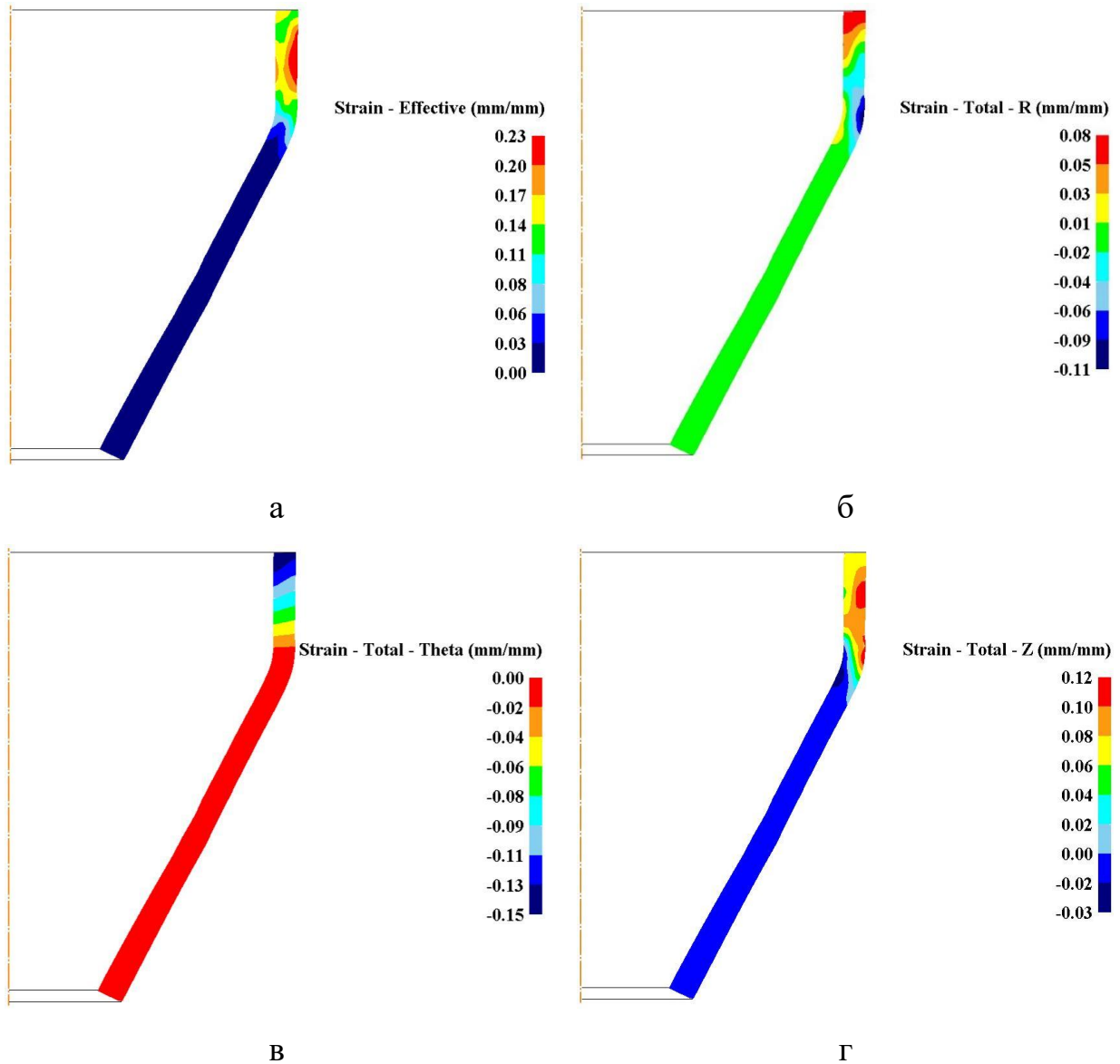


Рисунок 3.20 – Розподіли компонент деформацій в zdeформованому напівфабрикаті після витягування:

а – інтенсивність деформацій  $\epsilon_i$ ; б – радіальні деформації  $\epsilon_\rho$ ; в – тангенціальні деформації  $\epsilon_\theta$ ; г – осьові деформації  $\epsilon_z$ .



Інтенсивність деформацій (рис. 3.20а) знаходиться в межах  $\varepsilon_i = 0 \div 0,5$ .  
Радіальні деформації, які показані на рис. 3.20б знаходяться в межах  $\varepsilon_\rho = -0,13 \div 0,27$ .

Тангенціальні деформації, які показані на рис. 3.20в знаходяться в межах  $\varepsilon_\theta = -0,55 \div 0,33$ .

Осьові деформації (рис. 3.20г) знаходяться в межах  $\varepsilon_z = -0,28 \div 0,28$

На рис. 3.21 показано значення критерію руйнування в zdeформованому трубчастому напівфабрикаті в кінці витягування. Найбільше значення критерію становить 0,1 в стінці витягнутої частини напівфабрикату.

На рис. 3.22 показані розміри отриманого напівфабрикату.

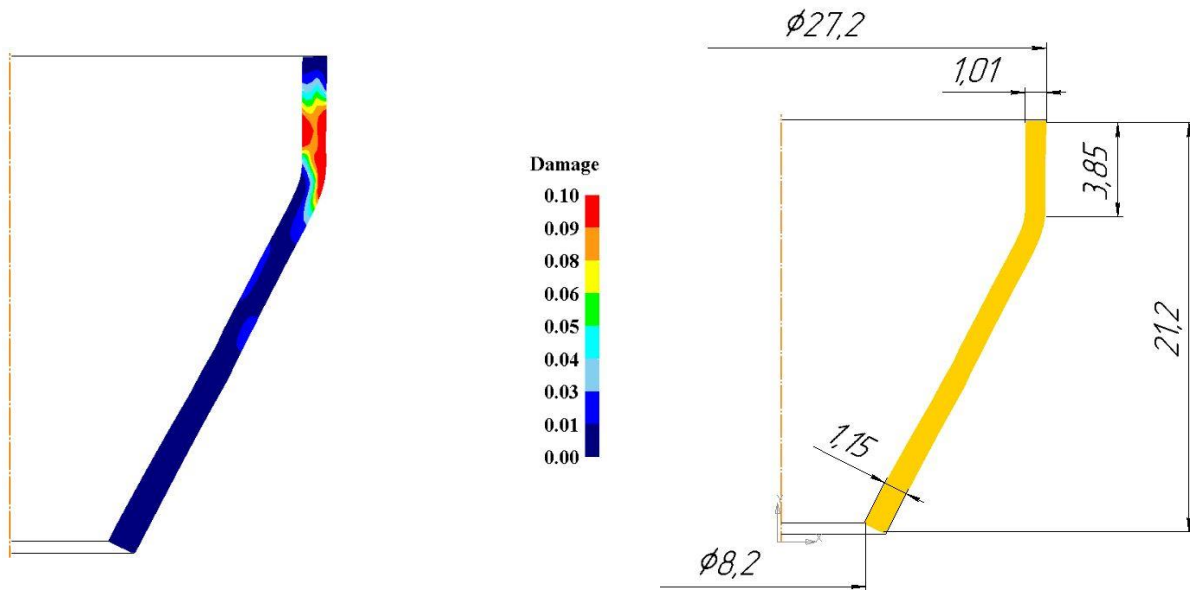


Рисунок 3.21 – Розподіл критерію руйнування в zdeформованому напівфабрикаті після витягування

Рисунок 3.22 – Розміри отриманого напівфабрикату після витягування

### Висновки по розділу 3

В даному розділі було отримано наступні результати:

1. За допомогою МСЕ було проведено комп'ютерне моделювання процесів роздачі, обтиску та витягування для отримання кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібру 40 мм.

2. Встановлені залежності зусиль операцій від переміщення пуансона.

3. Встановлений НДС заготовок та кінцеві розміри та форми виробів отриманих роздачею, обтиском та витягуванням.

## РОЗДІЛ 4

### КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 4.1. Схема оснащення для роздачі.

На рис. 4.1 показано показана схема експериментального відпрацювання процесу роздачі трубчастої профільованої заготовки.

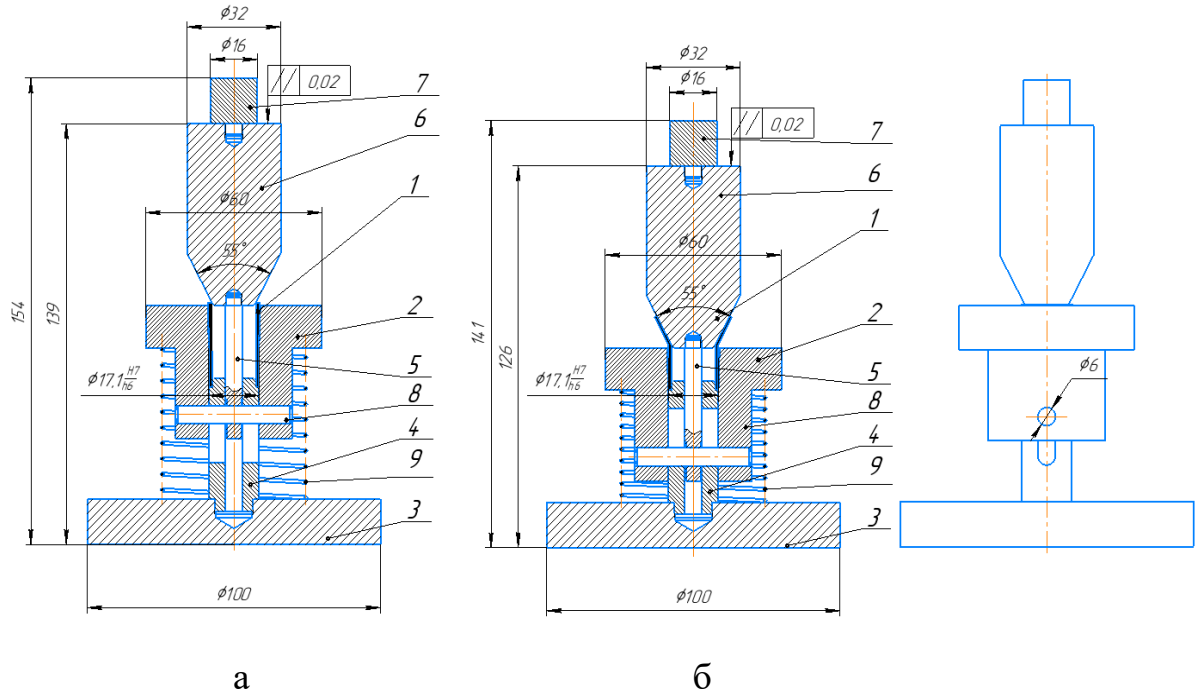


Рисунок 4.1 – Схема експериментального оснащення для роздачі:  
а – у відкритому положенні; б – у закритому положенні.

#### Конструкція еспериментальної схеми для роздачі.

На плиту 3 встановлено фіксатор 4. За допомогою штифта 8 до фіксатора кріпиться обойма 2 та шпилька 5, яка в свою чергу встановлена також в паз пуансона 6. Між обоймою 2 та плитою 3 встановлена пружина 9, характеристики пружини приведені в табл. 4.1. Хвостовик 7 вкручений до пуансона 6.

#### Робота еспериментальної схеми для роздачі.

Заготовка 1 встановлюється на оправку 4. Після цього здійснюється робочий хід пресу під час якого відбувається роздача заготовки пуансоном 6 по направляючій шпильці 5. Під час робочого ходу пуансон 6 та обойма 2 мають однакову швидкість переміщення за рахунок фіксації штифта 8. Після здійснення робочого ходу пружина розтискається, деталь знімають пінцетом вручну.

Таблиця 4.1 – Характеристики пружини на стиск для експериментальної схеми роздачі.

Зовнішній діаметр пружини $D_1$ , мм	40
Діаметр проволочи $d$ , мм	1,8
Число робочих витків $n$	10
Довжина пружини у вільному стані $L_0$ , мм	40
Максимальні дотичні напруження $\tau$ , Мпа	41
Критична швидкість $V_k$ , м/с	0,11
Сила пружини при максимальній деформації $F_3$ , Н	1,84
Матеріал	51ХФА-Ш

#### **4.2. Схема оснащення для обтиску.**

На рис. 4.2 показана схема для експериментального відпрацювання процесу обтиску трубчастої профільованої заготовки.

##### Конструкція експериментальної схеми для обтиску.

На нижню плиту 5 встановлено пуансон 4, на який встановлюють заготовку 1. Пуансон 3 закріплен у пуансонотримачі 2, пуансон 3 впирається

у знімач 6. Між нижньою плитою 5 та знімаачем 6 встановлена пружина 7, характеристики пружини наведені у табл. 4.2.

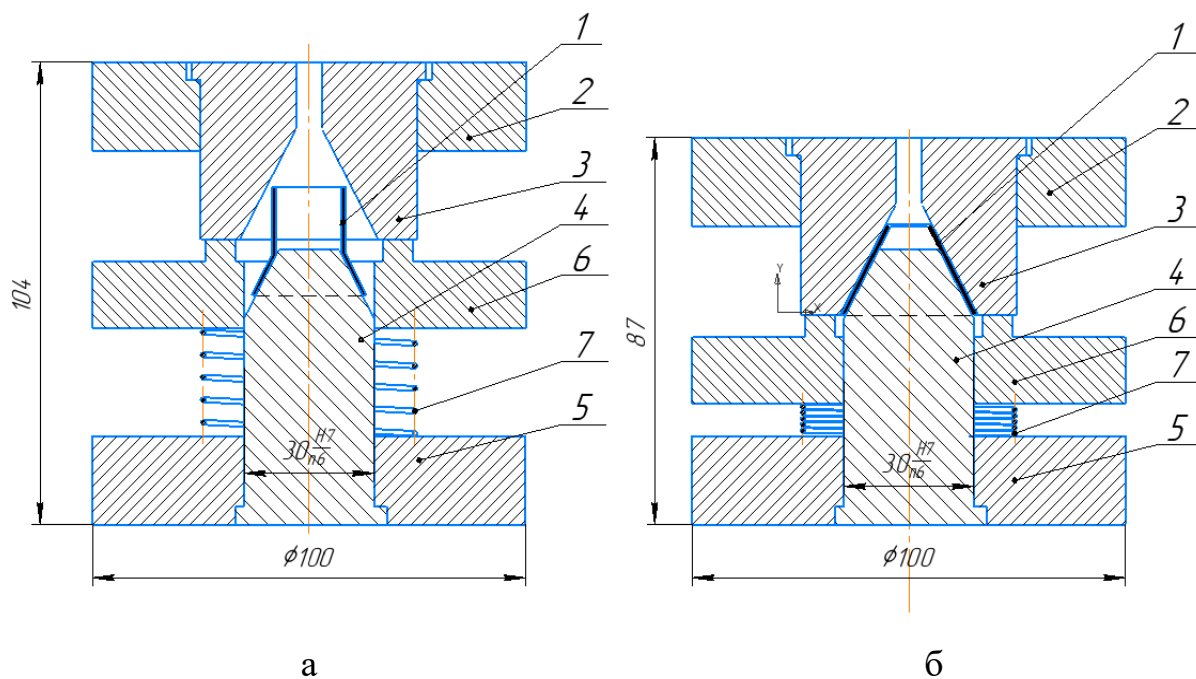


Рисунок 4.2 – Схема експериментальної схеми для обтиску:  
а – у відкритому положенні; б – у закритому положенні.

#### Робота експериментальної схеми для обтиску.

Заготовка 1 встановлюється на пуансон 4 розташований у нижній плиті 5, після чого здійснюється робочий хід пресу під час якого відбувається обтиск заготовки пуансоном 3. пуансон 3 встановлений у верхній плиті 2, під час ходу тисне на підпружинений знімач 6. Після здійснення робочого ходу пружина розтискається, деталь знімають пінцетом вручну.

Таблиця 4.2 – Характеристики пружини на стиск для експериментальної схеми роздачі.

Зовнішній діаметр пружини D1, мм	50
Діаметр проволочи d, мм	3,6
Число робочих витків n	5

Продовження таблиці 4.2	
Довжина пружини у вільному стані $L_0$ , мм	40
Максимальні дотичні напруження $\tau$ , Мпа	102
Критична швидкість $V_k$ , м/с	0,26
Сила пружини при максимальній деформації $F_3$ , Н	3,36
Матеріал	51ХФА-Ш

### 4.3. Схема оснащення для витягування.

На рис. 4.3 показано показана схема експериментального відпрацювання процесу витягування трубчастої профільованої заготовки.

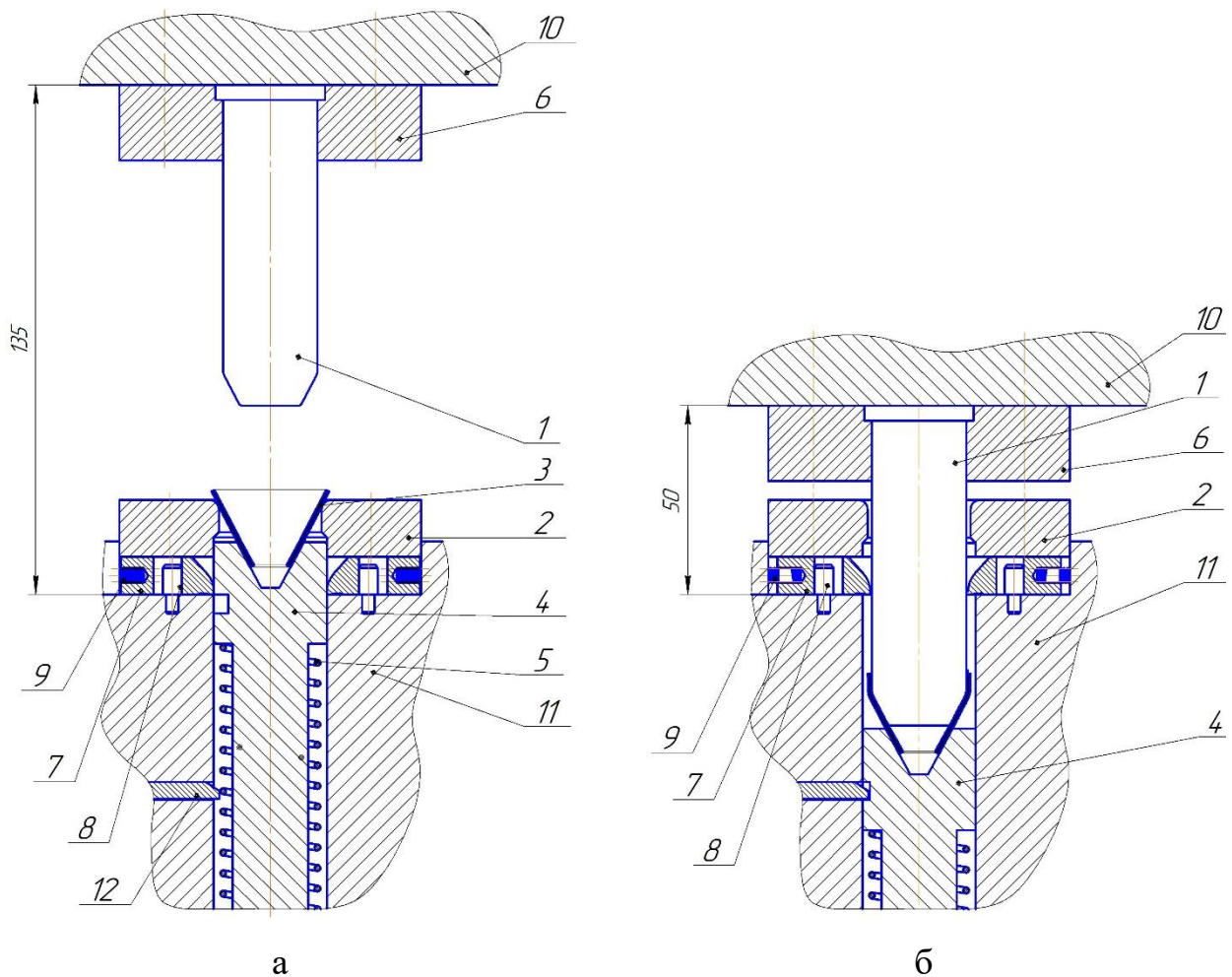


Рисунок 4.3 – Схема експериментального оснащення для витягування:

а – у відкритому положенні; б – у закритому положенні.

### Конструкція еспериментальної схеми для витягування.

В нижню обойму 11 встановлений фіксатор 4 з пружиною 5, на якому розташована заготовка 3, характеристики пружини наведені в табл. 4.3. Пуансон 1 встановлено у верхню плиту 10 разом із пуансонотримачем 6. Матриця 2 встановлена на знімач 7, в якому розташований грибок упор 8 та пружина 9. Також у нижній обоймі розташована заслонка 12.

### Робота еспериментальної схеми для витягування.

Заготовка 3 встановлюється на фіксатор 4, під час робочого ходу пуансон 1 здійснює процес витягування через матрицю 2, та проходить поки заслонка 12 не опиниться в пазі фіксатора. Напівфабрикат знімається з пуансона за рахунок знімача 7. Деталь забираємо пінцетом через вікно в нижній обоймі

Таблиця 4.3–Характеристики пружини на стиск для еспериментальної схеми витягування.

Наружній діаметр пружини D1, мм	20
Діаметр проволочи d, мм	3,6
Число робочих витків n	7
Довжина пружини у вільному стані L0, мм	40
Максимальні дотичні напруження $\tau$ , Мпа	93
Критична швидкість $V_k$ , м/с	0,18
Сила пружини при максимальній деформації F3, Н	2,75
Матеріал	51ХФА-Ш

### **Висновки по розділу 4**

В даному розділі запропоновані еспериментальні схеми, які були попередньо змодельовані в програмному комплексі DEFORM 2D/3D, описан принцип дії кожної зі схеми та приведені характеристики обраних пружин на стиск.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході магістерської дисертації була проведена робота, яка направлена на розробку технології та конструкції кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм з використанням процесів листового штампування. В результаті чого в роботі виконано наступне:

1. Проведено аналіз існуючих кумулятивних боєприпасів і особливостей їх конструкцій. Розглянуті конструкції та особливості виготовлення кумулятивних воронок. Проведений огляд теоретичних та експериментальних досліджень процесів обтиску та роздачі.

2. Виконано вибір та аналіз різних технологій виготовлення кумулятивної воронки для гранатометного пострілу калібром 40 мм. Встановлено, що для отримання кумулятивної воронки, необхідних розмірів необхідно виконати шість операцій тільки витягування, що є не доцільною технологією при її виготовленні. Розглянуто можливість отримання внутрішнього борту кумулятивної воронки із максимально обтиснутої заготовки. Проведено розробку технології виготовлення кумулятивної воронки з трубчастої заготовки для гранатометного пострілу калібром 40 мм обтиском та роздачею.

3. Проведено чисельне моделювання поопераційних переходів технологічного процесу за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі DEFORM 2D/3D.

4. За допомогою метода скінчених елементів проведено комп'ютерне моделювання процесу роздачі трубчастої заготовки. Визначено залежність зусилля роздачі від переміщення пуансону. Встановлені розподіли напружень та деформацій в здеформованому напівфабрикаті та виявлено кінцеву форму і розміри напівфабрикату після роздачі.

5. За допомогою метода скінчених елементів проведено комп'ютерне моделювання процесу обтиску напівфабрикату. Визначено залежність зусилля



обтиску від переміщення пуансону. Встановлені розподіли напружень та деформацій в здеформованому напівфабрикаті та виявлено кінцеву форму і розміри його після обтиску.

6. За допомогою метода скінчених елементів проведено комп'ютерне моделювання процесу витягування напівфабрикату. Визначено залежність зусилля витягування від переміщення пуансону. Встановлені розподіли напружень та деформацій в здеформованому напівфабрикаті та виявлено кінцеву форму і розміри напівфабрикату після витягування.

7. На основі комп'ютерного моделювання було спроектовано експериментальні схеми для кожного з процесів деформування для отримання кумулятивної воронки та описані принципи їх дії. В результаті отримано деталь більш раціональними методами аніж були запропоновані.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. <https://xn----7sbfkccucpracijq8iofobm.xn--p1ai/>
2. [https://tactical\\_terms.academic.ru/692/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0](https://tactical_terms.academic.ru/692/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0)
3. <http://btvt.narod.ru/4/kuma125.htm>
4. <https://raigap.livejournal.com/823739.html>
5. НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ И ВЫСТРЕЛОВ МАЛОГО И СРЕДНЕГО КАЛИБРА О.Т. ЧИЖЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Б.Э. КЭРТ<sup>2</sup>, О.Г. АГОШКОВ<sup>2</sup>, Р.У. ЕСИЕВ<sup>1</sup>, Ю.В. ГЕНКИН<sup>1</sup>, Е.А. ЗНАМЕНСКИЙ<sup>1</sup> 1ОАО «НПО «Прибор», г. Москва, 2 БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург
5. КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ. И.В. Минин, О.В. Минин. Монография
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA\\_%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%91%D1%82%D0%BE%D0%B2](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA_%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%91%D1%82%D0%BE%D0%B2)
7. <https://xn----7sbfkccucpracijq8iofobm.xn--p1ai/>
8. [https://tactical\\_terms.academic.ru/692/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0](https://tactical_terms.academic.ru/692/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0)
9. [https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/165315#.D0.9A.D1.83.D0.BC.D1.83.D0.BB.D1.8F.D1.82.D0.B8.D0.B2.D0.BD.D0.B0.D1.8F\\_.D1.81.D1.82.D1.80.D1.83.D1.8F](https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/165315#.D0.9A.D1.83.D0.BC.D1.83.D0.BB.D1.8F.D1.82.D0.B8.D0.B2.D0.BD.D0.B0.D1.8F_.D1.81.D1.82.D1.80.D1.83.D1.8F)
10. <https://istiglaldotcom.wordpress.com/2017/03/16/%D0%BA%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D0%B1%D0%BE%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BF%D0%B0>

D1%81%D1%8B-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C-  
%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%B0/

11. Орленко Л.П. Физика взрыва Том 2 Изд.3

12. Сосенушкин Е.Н., Артес А.Э., Яновская Е.А., Хачатрян Д.В. Трубные заготовки: технологический аспект раздачи и обжима // Вестник МГТУ СТАНКИН, 2010. № 4 (12). С. 36-41.

13. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Хачатрян Д.В., Киндеров В.Ю. Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок // Известия МГТУ. 2013. №2 (16).

14. Селедкин Е. М., Кухарь В. Д. Раздача и обжим толстостенных анизотропных трубчатых заготовок импульсным магнитным полем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. №2-1.

15. Беляева И.А., Глуценков В.А. Компьютерное моделирование процесса магнитно-импульсного обжима трубчатого образца на цилиндрическую оправку // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. №4-6.

16. Глуценков В.А., Беляева И.А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17 № 6 (3). С. 657-665.

17. Глуценков В.А., Беляева И.А. Моделирование процесса магнитно-импульсного обжима цилиндрических образцов // Известия Самарского научного центра РАН. 2015.Т. 17. № 2. С. 113-118.

18. Глуценков В.А., Беляева И.А. Взаимодействие деформируемой импульсным магнитным полем цилиндрической заготовки с оснасткой. Компьютерное моделирование // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4. С. 71-75.

19. Глущенко В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.

20. Крылов Д. В., Черняев А. В. Математическое моделирование операций обжима и раздачи цилиндрических оболочек из анизотропного материала в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. №3.

21. Черняев А. В., Крылов Д. В. Предельные возможности формоизменения при раздаче тонкостенных цилиндрических оболочек из анизотропного материала жестким инструментом в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. №3.

22. Яковлев С. С., Черняев А. В., Крылов Д. В. Оценка влияния цилиндрической анизотропии на силовые режимы и предельные возможности формоизменения изотермического обжима трубных заготовок в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. №4.

23. Черняев А. В. Силовые режимы обжима тонкостенных цилиндрических оболочек из анизотропного материала жестким инструментом в режиме ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. №2.

24. Черняев А. В., Крылов Д. В. Оценка влияния анизотропии механических свойств материала на геометрические характеристики детали при изотермическом обжиме и раздаче трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. №2-2.

25. Митин О.Н. Моделирование совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №7-1.

26. Митин О. Н. Математическая модель обжима трубной заготовки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №4.

27. Ремнев К. С., Яковлев С. С. Технологические параметры операций обжима и раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. №2.

28. Митин О.Н., Нгуен К.Х. Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиме с утонением толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №10-1.

29. Яковлев С.С., Нгуен К.Х., Митин О.Н. Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиме толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №7.

30. Коновалов В.А., Обуховский Д.В., Проскурин А.М. Определение напряжения текучести стали 20 после холодного обжима толстостенных труб конической матрицей // ОНВ. 2013. №2 (120).

31. Хрисанов Е.О., Сережкин М.А., Ступников В.В., Минязева Л.Х. Исследование влияния коэффициента трения на технологические возможности операции продольного обжима // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №11-1.

32. Рыжов П.А., Евсюков С.А. Анализ краевого расширения при обжиме трубчатых заготовок // Известия вузов. Машиностроение. 2017. №5 (686).

33. Шишкин А. А. Об обжиме особотонкостенных трубных заготовок // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. №03.

34. Калюжний, В. Л. Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки / В. Л. Калюжний, О. С. Ярмоленко // Mechanics and Advanced Technologies. – 2019. – №1 (85). – P. 111-117.

35. Калюжний О. В. Аналіз обтиску з протитиском в сферичній матриці порожнистих заготовок з дном з забезпеченням постійної товщини стінки / О. В. Калюжний // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 40. - С. 102-111. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2013\\_40\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_40_22).

36. Калюжний О. В. Аналіз обтиску з протитиском в сферичній матриці порожнистих заготовок з дном з забезпеченням постійної товщини стінки / О. В. Калюжний // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 40. - С. 102-111. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2013\\_40\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_40_22).

37. Калюжний О.В. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці//Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2011, вип. 62. С. 63-67.

38. Романов П. В. Напряженно-деформированное состояние полой цилиндрической оболочки при обжиме // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №12.

41. Калюжний В.Л. Вплив радіуса заокруглення матриці на формоутворення обтиском з протитиском виробів з горловиною / Калюжний В.Л., Вихованець І.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2011. – 46. С. 27-34.

42. Калюжний В.Л. Спосіб обтиску горловини типу балон: Патент України № 59190: МПК В21В26/02// Калюжний В.Л., Калюжний О.В, Піманов В.В., Паляничко Є.М.; Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». Опубл. 10.05.2011, бюл. №9.

43. Калюжний О.В. Пристрій для обтиску горловини типу балон: Патент України №68396: МПК В21В26/02// Калюжний О.В, Піманов В.В., Солонуха В.М. та ін.; Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». Опубл. 26.03.2012, бюл. №8.

44. Потянихин Д. А. (2018). Моделирование в ANSYS напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки при раздаче по осесимметричному пуансону / Д.А. Потянихин, Б.Н. Марьин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, (4 (37)), 2018, ст. 3-15.

45. Яковлев С.С. Математическая модель операции раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов. / С.С. Яковлев, Д.В. Крылов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №1, 2011, ст. 79-88.

46. Марьин С. Б. Сравнительный анализ технологических методов раздачи трубчатой заготовки. / С.Б. Марьин, Д.А. Потянихин, В.А. Пхьо, М.К. Хлайнг // Инженерный журнал: наука и инновации, № 10 (106), 2020, ст. 4.

47. Веселов А.А. Определение размеров концов труб после раздачи методом пластического деформирования // Морской вестник. 2012. № 1. С. 15–16.

48. Калюжний В. Л. Розрахунково-експериментальний аналіз відкритої роздачі трубчастих заготовок / Калюжний В. Л., Олександренко Я. С., Куліков І. П. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2014. – № 1(70). – С. 63–68. – Бібліогр.: 5 назв.

УДК 623.541

## Аналіз існуючих конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів

Д.В. Михальчук, В.В. Піманов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація:** Стаття присвячена аналізу конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів. У статті розглядається принцип дії кумулятивних боєприпасів, їх класифікація, та різні способи виготовлення та конструкції, які використовуються в цих припасах. Авторами статті наведені існуючі технології та методи виготовлення кумулятивних припасів, вказані їх переваги та недоліки. Крім того, обговорюються можливості покращення конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів, що може привести до покращення їх характеристик та забезпечення більшої ефективності в бойових умовах. Стаття має значний потенціал для використання в наукових дослідженнях та проектуванні нових кумулятивних боєприпасів з покращеними характеристиками.*

**Ключові слова:** кумулятивний припас, кумулятивна воронка, штампування.

Кумулятивні боєприпаси є одними з найефективніших засобів протипіхотної та протитанкової боротьби в умовах сучасних збройних конфліктів. Для забезпечення максимальної ефективності та удосконалення властивостей кумулятивних припасів, необхідно проаналізувати існуючі конструкції та технології виготовлення. У цій статті будуть розглянуті принципи дії кумулятивних припасів, їх класифікація, способи виготовлення та конструкції. Також будуть проаналізовані існуючі технології та методи виготовлення, їх переваги та недоліки. **Метою** роботи є обговорення можливості покращення конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів, що може привести до покращення їх характеристик та забезпечення більшої ефективності в бойових умовах.

Кумулятивний снаряд (КС) - артилерійський снаряд основного призначення, в якому для ураження мети використовується заряд кумулятивної дії. Кумулятивний снаряд призначений для стрільби по броньованим цілям (танкам, БМП, БТР тощо), а також залізобетонним спорудам. Кумуляція (від лат. Curanlo - накопичую) – посилення дії вибуху в певному напрямку. Кумулятивний ефект досягається шляхом створення заряду вибухової речовини (ВР) кумулятивної воронки, зверненої у бік об'єкта, що уражається. В основі кумулятивного ефекту лежить перерозподіл енергії вибуху та її концентрація у заданому напрямку. Якщо в заряді ВР на одній зі сторін зробити виїмку, а капсуль-детонатор розташувати на протилежній від неї стороні заряду так, щоб детонаційна хвиля йшла у бік поглиблення, то дія вибуху в напрямку осі виїмки значно збільшується. Це тому, що потік продуктів детонації, що виходить із поверхні поглиблення розривного заряду, отримує певну спрямованість (по осі виїмки) у бік об'єкта, що уражається. Найбільш вигідними формами виїмки заряду вважаються гіперболічна та конічна [1].

Кумулятивний ефект використовується в кумулятивних боєприпасах, у будівництві та гірничорудній промисловості, у дослідженнях властивостей речовин при високих тисках. Кумулятивний ефект відкрив у 1864 російський військовий інженер ген. М.М. Боресков, а



1865 капітан Д.І. Андрієвський використовував це явище під час створення капсуля-детонатора. Експеримент, дослідження кумулятивного ефекту було проведено проф. М.Я. Сухаревським у 1923-1926. Гідродинамічна теорія кумуляції розроблена 1945 М.А. Лаврентьєвим. Отже, внесок у теорію кумулятивного ефекту зробили радянські вчені Є.І. Забабахін, Г.І. Покровський, Ф.А. Баум та ін. У СРСР перші експерименти з кумулятивними снарядами проводилися 1934 С.Н.Дядичевим. Досвідчені кумулятивні снаряди використовувалися в 1938 році під час громадянської війни в Іспанії. У Другій світовій війні кумулятивні снаряди широко застосовувалися всіма воюючими арміями. Перший вітчизняний зразок кумулятивного снаряда, використаний Радянської Армії у січні. 1942, був розроблений під керівництвом К.К.Снітко. Під час Великої Вітчизни, війни КС іноді називали «бронепрожигаючим» або «термітним» [2].

Кумулятивні снаряди існують малих та крупних калібрів. Розглянемо крупнокаліберні види снарядів та їх оснащення. На рис. 1 представлені крупнокаліберні снаряди радянських часів. З часом конфігурація кумулятивних снарядів зазнала великих змін, це пов'язано з новітніми технологіями виготовлення листових деталей, та потребою у більш ефективній вогневій силі для пробиття броньованої сучасної техніки. На рис. 2 зображено крупнокаліберний кумулятивний снаряд китайського виробництва 2018 року [3].

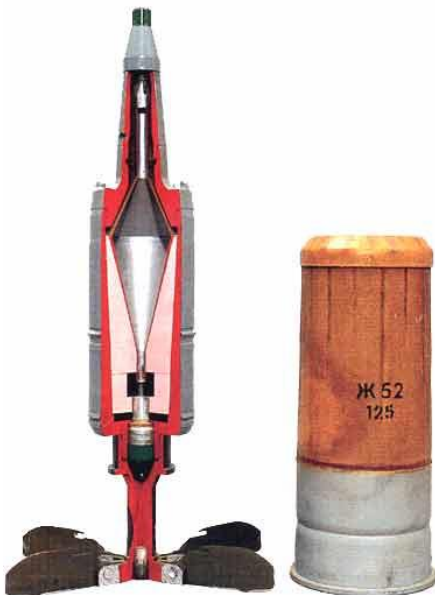


Рис. 1. 125-мм постріл ЗВБК16 з кумулятивним снарядом ЗБК18М.



Рис. 2. Кумулятивний снаряд калібром 125 мм китайського виробництва.

Кумулятивна воронка – це виїмка у розривному заряді снаряда кумулятивної дії. За рахунок КВ потоки газів при вибуху, що виходять перпендикулярно до бокових стінок виїмки, зустрічаються із середньою частиною струменя, викривляються і відбувається кумуляція (збирання) потоків газів. При цьому створюється ущільнений потік газів кумулятивний струмінь, який має велику швидкість, високу температуру і тиск. На деякій відстані від заряду струмінь газів має найменший переріз і має найбільшу пробивну дію; це місце називається фокусом кумуляції. При вибуху броня (перешкода) пробивається спрямованим і зосередженим струменем газів розривного заряду, а чи не енергією

снаряда. За рахунок К.В снаряди кумулятивної дії пробивають броню товщиною, що дорівнює 1-3 калібру снаряда [2, 3].

Форми облицювання кумулятивних воронок. Залежно від характеру технічних завдань, що вирішуються за допомогою КЗ, використовуються кумулятивні облицювання різної форми. На рис. 3 представлені кумулятивні облицювання воронки різної форми, що використовуються на практиці. Найчастіше в КЗ використовуються найпростіші геометричні форми облицювань (рис. 3, а-д). Циліндричні облицювання застосовують у тих випадках, коли треба отримати безградієнтний кумулятивний струмінь, у якого всі елементи мають постійну швидкість. Конічні облицювання використовують для отримання максимальної глибини пробиття перешкоди (рис. 3, е-к). Кут  $2\alpha$  звичайно змінюється в межах  $30^\circ \dots 60^\circ$ , оптимальні значення кута становлять  $40^\circ \dots 50^\circ$ .

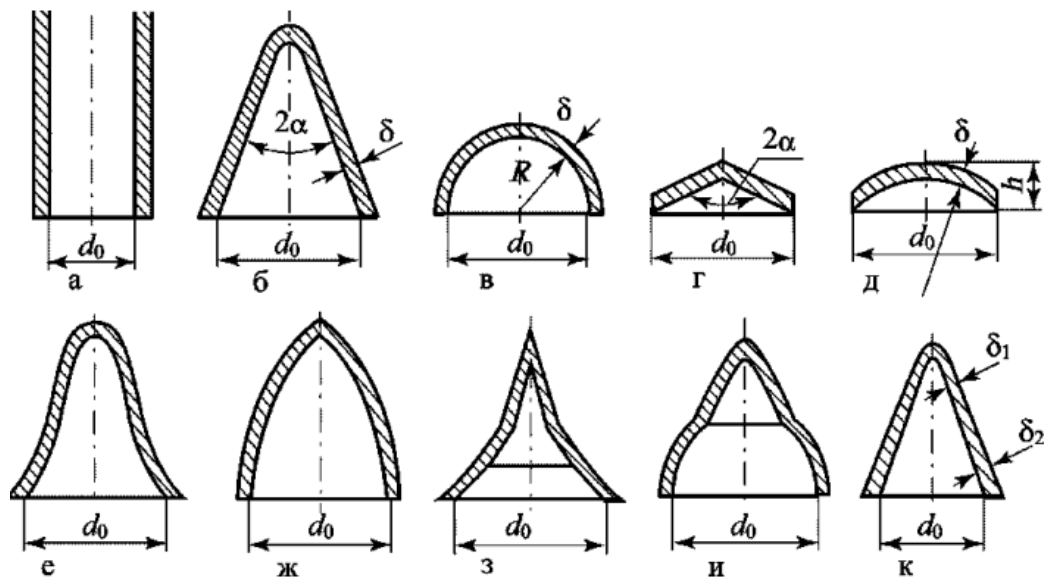


Рис. 3. Схематичне зображення кумулятивних облицювань воронки різної форми.

В конічних облицюваннях часто використовують змінну товщину стінок облицювання (рис. 3, к). Це дозволяє збільшити градієнт швидкості та збільшити довжину кумулятивного струменя. Сферичні облицювання використовуються в тих випадках, коли треба отримати збільшений діаметр пробитого в перешкоді отвору, але при меншій глибині пробиття перешкоди в порівнянні з конічним облицюванням. Облицювання з більшими кутами  $2\alpha = 130^\circ \dots 150^\circ$  або сферичні сегменти (рис. 3, г, д) використовуються не для утворення кумулятивного струменя, а для формування компактного тіла з облицювання, що називається «ударним ядром». Швидкість ядра звичайно 2...3 км/с. Воно може вражати цілі на відстані до декількох десятків метрів. Рупороподібні та тюльпаноподібні облицювання (рис. 3, е, ж), що мають криволінійні утворюючі форми воронок, розширюють

можливості керування довжиною струменя. Їхній недолік – складність у виготовленні. Для рішення специфічних завдань використовуються комбіновані облицювання (рис. 3, з, и).

Існує кілька можливих технологій для їх виготовлення:

- Лиття. Цей метод використовується для виготовлення великих воронок. Він полягає у тому, що розплавлений метал наливають у форму, яка має форму кумулятивної воронки. Після затвердіння металу, форму видаляють, а отриману воронку обробляють, щоб вона стала готовою до використання.
- Штampuвання. Цей метод використовується для виготовлення менших кумулятивних воронок. Він полягає у тому, що листовий метал пропускається через прес, де він здавлюється до потрібної форми.
- 3D-друк. Цей метод є новітнім і полягає у тому, що за допомогою спеціальних принтерів виготовляється деталь, яка має форму кумулятивної воронки. Для цього використовуються металеві порошки, які злитковим способом склеюються, створюючи кінцевий продукт.
- Фрезерування. Цей метод полягає у тому, що на верстатах забезпечують точність вирізання з відповідною формою з металевого блоку.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки і використовується в залежності від потреб виробництва та технічних можливостей.

## **Висновки**

Виконано аналіз конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних припасів. З огляду на аналіз різних конструкцій та технологій виготовлення кумулятивних воронок, можна зробити висновок, що виробництво цих пристроїв є складним і вимагає високої технічної кваліфікації. Кожен метод виготовлення має свої переваги та недоліки, і їх використання залежить від потреби виробництва, бюджету та технічних можливостей. При цьому, розвиток нових технологій, таких як 3D-друк, може відкрити нові можливості для виробництва кумулятивних воронок у майбутньому. Усі ці фактори потребують детального аналізу та планування, щоб забезпечити ефективність та надійність кумулятивних воронок під час їх використання.

## **Анализ существующих конструкций и технологий изготовления кумулятивных припасов**

**Д.В. Михальчук, В.В. Пиманов**

***Аннотация:** Статья посвящена анализу конструкций и технологий производства кумулятивных припасов. В статье рассматривается принцип действия кумулятивных боеприпасов, их классификация и различные способы изготовления и конструкции, которые используются в этих запасах. Авторами статьи представлены существующие технологии и методы изготовления кумулятивных припасов, указаны их преимущества и недостатки. Кроме того, обсуждаются возможности улучшения конструкций и технологий изготовления кумулятивных припасов, что может привести к улучшению их характеристик и повышению эффективности в боевых условиях. Статья имеет большой потенциал для использования в научных исследованиях и проектировании новых кумулятивных боеприпасов с улучшенными характеристиками.*

***Ключевые слова:** кумулятивный запас, кумулятивная воронка, штамповка.*

## **Analysis of existing designs and technologies for the manufacture of cumulative supplies**

## **D. Mykhalchuk, V. Pimanov**

**Abstract:** *The article is devoted to the analysis of designs and technologies for the production of cumulative supplies. The article discusses the principle of operation of cumulative munitions, their classification and various manufacturing methods and designs that are used in these stocks. The authors of the article present the existing technologies and methods for the manufacture of cumulative supplies, their advantages and disadvantages are indicated. In addition, the possibilities of improving the designs and manufacturing technologies of cumulative supplies are discussed, which can lead to an improvement in their characteristics and increase their effectiveness in combat conditions. The article has great potential for use in scientific research and design of new cumulative munitions with improved characteristics.*

**Keywords:** *cumulative supply, cumulative funnel, stamping*

### **Список літератури**

1. Минин И.В. Кумулятивные заряды монография / И.В. Минин, О.В. Минин. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 200 с.
2. Боеприпасы: учебник в 2 т. / под общей ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, Т. 1. – 506 с.
3. Минин И.В., Минин О.В. Мировая история развития кумулятивных боеприпасов // Российская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона», Новосибирск; 23-25 апреля 2003 г. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – С. 51-52.