

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

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

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження деформування листових заготовок при виготовленні
осесиметричних деталей машин в процесі ротаційної витяжки»

08-62.МКР.09.000.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ІГМ-23м
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

ЧЕРНОВ Артем
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., професор кафедри ГМ

СИВАК Роман
(прізвище та ініціали)
« 12 » жовтня 2024 р.

Опонент: к. т. н., доцент кафедри АТМ

БОРИСЮК Дмитро
(прізвище та ініціали)
« 12 » жовтня 2024 р.

Допущено до захисту

завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. ПОЛІЩУК Леонід
(прізвище та ініціали)

« 12 » жовтня 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛІЩУК

«17» вересня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Артему ЧЕРНОВУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження деформування листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей машин в процесі ротаційної витяжки».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., проф. Роман СИВАК, затверджені наказом №310 від «17» вересня 2024 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 9.12. 2024р.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) матеріал - сталь 12Х1МФ, алюмінієвий сплав АМг6, 2) апроксимація кривої текучості сталі 12Х1МФ - $\sigma_s = 309 + 482,2\lambda^{0,279}$ 3) кути нахилу пропилов смуги - від 0° - 90° з кроком 15° ; 4) частота обертання шпинделя – 60 об/хв; 5) поздовжня подача – 1 мм/об; 6) деформуючий ролик із кутом переднього конуса – 90° , кутом заднього конуса – 14° , габаритним діаметром – 370 мм, радіусом заокруглення робочого конуса – 18 мм.

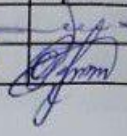
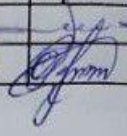
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) вступ; 2) способи визначення пластичності металів та відповідні їм діапазони показника напруженого стану; 3) огляд можливостей комерційних програм моделювання процесів обробки матеріалів тиском; 4) вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації для побудови діаграм пластичності; 5) метод дослідження пластичності металів залежно від показників напруженого стану та виду напруженого стану розтягуванням/стисненням спеціальних смуг; 6) удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування; 7) економічна частина.

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

1) Стан питання граничного деформування металів при обробці тиском (пл. ф. А1); 2) Методи дослідження залежності пластичності металу від показників напруженого стану і виду напруженого стану (4 пл. ф. А1); 3) Дослідження пластичності металу розтягом/стиском спеціальних смуг (3 пл. ф. А1); 4) Удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування (2 пл. ф. А1); 5) висновки (пл. ф. А1).

6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний	д. т. н., проф. Роман СИВАК		
Економічний	к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК.		

7. Дата видачі завдання 16.09.2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів МКР	Примітка
1	Вступ	30.09.2024 р.	Виконано
2	Способи визначення пластичності металів та відповідні їм діапазони показника напруженого стану	15.10.2024 р.	Виконано
3	Огляд можливостей комерційних програм моделювання процесів обробки матеріалів тиском	4.11.2024 р.	Виконано
4	Вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації для побудови діаграм пластичності	11.11.2024 р.	Виконано
5	Метод дослідження пластичності металів залежно від показників напруженого стану та виду напруженого стану розтягуванням/стисненням спеціальних смуг	15.11.2024 р.	Виконано
6	Дослідження методу оцінки пластичності металу розтягуванням/стисненням спеціальних смуг на основі комп'ютерного моделювання	18.11.2024 р.	Виконано
7	Удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування	20.11.2024 р.	Виконано
8	Комп'ютерне моделювання випробувань	22.11.2024 р.	Виконано
9	Математична обробка результатів моделювання	26.11.2024 р.	Виконано
10	Економічна частина	3.12.2024 р.	Виконано
11	Підготовка ілюстративної частини МКР	9.12.2024 р.	Виконано
12	Попередній захист на кафедрі	10.12.2024 р.	

Студент Ч.Х.П. Артем ЧЕРНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

АНОТАЦІЯ

УДК 621.777.4:621.77.01

Чернов А. Т. Дослідження деформування листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей машин в процесі ротаційної витяжки. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2024. 124 с.

Укр. мовою. бібліогр.: 41 назв; рис.: 22; табл.: 4.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд стану питання граничного деформування металів при обробці тиском, який включає способи визначення пластичності металів та відповідні їм діапазони показника напруженого стану, а також огляд можливостей комерційних програм моделювання процесів обробки матеріалів тиском. Розглянуті методи дослідження залежності пластичності металу від показників напруженого стану і виду напруженого стану, а саме вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації для побудови діаграм пластичності. Виконані дослідження пластичності металу розтягуванням/стиском спеціальних смуг, які включають використання методу дослідження пластичності металів залежно від показників напруженого стану та виду напруженого стану розтягуванням/стисненням спеціальних смуг, а також дослідження методу оцінки пластичності металу розтягуванням/стисненням спеціальних смуг на основі комп'ютерного моделювання. Запропоноване удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування.

Графічна частина складається з 11 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: граничне деформування, ротаційна витяжка, ресурс пластичності, показник напруженого стану, накопичення пошкоджень, накопичена деформація, діаграма пластичності.

ABSTRACT

Chernov A. T. Research on the deformation of sheet blanks in the manufacture of axisymmetric machine parts in the process of rotary drawing. Master's qualification work in the specialty 133 - branch mechanical engineering, educational program - branch mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2024. 124 p.

In Ukrainian. Bibliography: 41 titles; Fig.: 22; Table: 4.

The master's qualification work reviews the state of the issue of the ultimate deformation of metals during pressure processing, which includes methods for determining the plasticity of metals and the corresponding ranges of the stress state indicator, as well as a review of the capabilities of commercial programs for modeling processes for processing materials by pressure. Methods for studying the dependence of metal plasticity on the indicators of the stress state and the type of stress state are considered, namely, the selection of indicators of the stress state and accumulated deformation for constructing plasticity diagrams. Studies of metal plasticity by stretching/compression of special strips are carried out, which include the use of the method of studying the plasticity of metals depending on the indicators of the stress state and the type of stress state by stretching/compression of special strips, as well as research on the method of assessing metal plasticity by stretching/compression of special strips based on computer modeling. Improvement of the technology of rotary drawing of parts based on the assessment of the limit deformation is proposed.

The graphic part consists of 11 posters based on the results of the study.

Keywords: limit deformation, rotary drawing, plasticity resource, stress state indicator, damage accumulation, accumulated deformation, plasticity diagram.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СТАН ПИТАННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТИСКОМ	10
1.1 Способи визначення пластичності металів та відповідні їм діапазони показника напруженого стану	10
1.2 Огляд можливостей комерційних програм моделювання процесів обробки матеріалів тиском	17
2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ВІД ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖНОГО СТАНУ І ВИДУ НАПРУЖНОГО СТАНУ	23
2.1 Вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації для побудови діаграм пластичності	23
2.2 Матеріал дослідження.....	23
2.3 Комп'ютерне моделювання випробувань.....	24
2.4 Математична обробка результатів моделювання.....	30
2.5 Аналіз результатів.....	36
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ РОЗТЯГУВАННЯМ/СТИСКОМ СПЕЦІАЛЬНИХ СМУГ	40
3.1 Метод дослідження пластичності металів залежно від показників напруженого стану та виду напруженого стану розтягуванням/стисненням спеціальних смуг	40
3.2 Дослідження методу оцінки пластичності металу розтягуванням/стисненням спеціальних смуг на основі комп'ютерного моделювання	42
3.2.1 Матеріал дослідження.....	42
3.2.2 Комп'ютерне моделювання.....	43
3.2.3 Математична обробка результатів моделювання.....	50

3.2.4 Аналіз результатів.....	52
4 ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПРИ РІШЕННІ ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ	55
4.1 Удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування	55
4.2 Матеріал дослідження.....	72
4.3 Теоретичний розрахунок.....	73
4.4 Експериментальна верифікація.....	78
4.5 Аналіз результатів.....	78
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	79
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	79
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	85
5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	92
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	94
ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	105
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	111
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ.....	123

ВСТУП

Актуальність теми. Переважне використання протягом досить довгого часу показників технологічної деформованості при оцінці граничного деформування в процесах листового штампування пов'язане з необхідністю при застосуванні діаграм граничних деформацій та кінематичних теорій розсіяного руйнування використовувати інформацію про напружено-деформований стан матеріалу заготовки у процесі формозміни. Теорія пластичності дозволяє формувати згадану задачу, але враховуючи її складність та пов'язаність, як правило, з аналітичними методами знайти її рішення не вдається. Але зараз, завдяки поєднанню розвитку прямих чисельних методів із появою швидкодіючих та доступних комп'ютерів, це стало можливим, що створило передумови розвитку математичних моделей процесів обробки матеріалів тиском та відповідних програм. Тим не менш, у відомих комерційних програмних продуктах моделювання процесів обробки тиском в якості критеріїв граничного деформування реалізовані тільки миттєві та енергетичні моделі, які не мають достатньої точності при аналізі процесів обробки матеріалів тиском, але часто користувачам надано можливість додавання нових критеріїв засобами програмування користувача.

Таким чином, розробка теоретичної моделі визначення граничного деформування заготовки внаслідок вичерпання ресурсу пластичності на операціях холодного листового штампування виробів, заснованого на уявленні про накопичення дефектів деформаційного походження, така що викликає експериментальних труднощів, є актуальною науковою задачею.

Мета і завдання роботи. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесів холодного листового штампування та удосконалення технології ротаційної витяжки деталей шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу листової заготовки.

Для досягнення поставленої мети у роботі були поставлені та вирішені наступні завдання:

- пошук серед відомих чи створення нових способів дослідження пластичності матеріалу листових та об'ємних заготовок на одному випробувальному устаткуванні, без застосування спеціалізованих пристроїв, що мають широкі діапазони варіювання показників напруженого стану та виду напруженого стану;

- застосування розрахункового апарату оцінки граничного деформування заготовки на основі теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесі ротаційної витяжки листової заготовки;

- застосування одержаних результатів роботи при вирішенні практичних задач обробки матеріалів тиском.

Об'єкт дослідження. Процес ротаційної витяжки листової заготовки.

Предмет дослідження. Закономірності та теоретичні моделі формозміни заготовок при ротаційній витяжці листової заготовки.

Новизна одержаних результатів. Новизна одержаних результатів полягає у виявленні закономірностей граничних можливостей деформування металу листової заготовки від механічних параметрів режиму обробки при ротаційній витяжці, що ґрунтуються на застосуванні уявлень про процес досягнення граничного деформування у вигляді накопичення дефектів деформаційного походження.

1 СТАН ПИТАННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТИСКОМ

1.1 Способи визначення пластичності металів та відповідні їм діапазони показника напруженого стану

У табл. 2.1 представлені дані роботи [1], що відображають притаманні різним способам обробки металів тиском діапазони показників η і χ , в якості яких прийняті відповідно величина, що визначається виразом

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i}, \quad (1.1)$$

і параметр Надаї-Лоде

$$\chi = (-2\sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_3. \quad (1.2)$$

Із таблиці випливає, що для достовірної оцінки граничного деформування поковки в більшості процесів обробки матеріалів тиском, необхідно виконати дослідження щодо визначення пластичності металу в широких діапазонах зміни показників напруженого стану та виду напруженого стану, що включають в себе як позитивні, так і негативні величини. Нижче представлений огляд існуючих методів дослідження пластичності металів, з якого виключені способи, що вимагають застосування спеціалізованого випробувального обладнання та пристроїв, оскільки результати роботи спрямовані на застосування підприємствами машинобудівного виробництва, які здебільшого не володіють подібним обладнанням. Також не розглядаються методи дослідження пластичності при якомусь одному значенні показника напруженого стану, що входить в діапазон інших більш універсальних способів.

А) Розтягування суцільних циліндричних зразків гладких та з виточкою [1]. У процесі деформації гладких зразків до появи шийки реалізується напружений стан – лінійне розтягування. Однак при деформації пластичних

матеріалів, руйнуванню передуює втрата стійкості, що проявляється у появі шийки на зразку, що має об'ємний напружений стан та більше значення показника напруженого стану.

Таблиця 1.1 – Показники напруженого стану та виду напруженого стану у різних способах обробки металів тиском [1]

Спосіб обробки	η	χ
Волочіння дроту	-1,15...0,50	-1,0
Волочіння труб на оправці	-1,00...0,40	-1,0...0
Безоправочне волочіння труб	-0,58...0,40	-0,3...0,3
Гідропресування круглих прутків	-6...-1,15	-1,0...-0,3
Валкове редукування труб	-1...-0,58	-0,5...0,5
Прокатування труб на станах холодного прокатування труб	-3,5...0,60	-0,6...0,5
Прокатування листа (за виключенням кромek листа)	-5,00...1,00 (до 1,00)	-
Прокатування сортаменту в калібрах простої форми	-3,0...0,7 (до 1,50)	-0,8...0,0
Примітки 1 Для перших п'яти способів перша колонка числових значень відповідає значенням показників на вході у осередок деформації, а друга – на виході. 2 Для шостого перша – у центрі осередку деформації, друга – на виході чи вході в осередок деформації. 3 Для шостого та восьмого – перша колонка відповідає значенню при вершині, а друга – у випуску калібру. У дужках – у позаконтактній зоні.		

Так само для дослідження пластичності в діапазоні великих величин показника напруженого стану, на гладкі зразки наносять круглі виточки. У відповідності до формул П. Бриджмена для визначення головного напруження

в зразкові з шийкою, або виточкою, величина показника напруженого стану визначається як [2]:

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{d_{13}}{4R_{13}} \right), \quad (1.3)$$

де η – показник напруженого стану, що визначається виразом

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (1.4)$$

d_{13} – діаметр зразка у найменшому поперечному перерізі, мм;

R_{13} – радіус кривизни контуру поздовжнього перерізу зразка в шийці або виточки, мм.

Таким чином, розтягування циліндричних зразків гладких і з виточкою дозволяє досліджувати пластичність у наступному діапазоні показника напруженого стану:

$$\frac{1}{3} \leq \eta \quad (1.5)$$

Б) Розтягування циліндричних трубних зразків гладких і з виточкою на оправці [3]. Даний спосіб є найбільш зручним випробуванням, що реалізує плоский деформований стан при відносно малій товщині стінки зразка. При розтягуванні циліндричних гладких трубних зразків, руйнуванню так само може передувати втрата стійкості у вигляді утворення шийки, внаслідок чого плоский напружений стан стає об'ємним. Для дослідження пластичності в діапазоні більших величин показника напруженого стану на зразки наносять круглі виточки. П. Бриджмен вказує, що після утворення шийки або у зразку з виточкою, величина показника напруженого стану визначається виразом [3]:

$$\eta = \frac{1}{2} + \ln \left(1 + \frac{s_{13}}{4R_{13}} \right), \quad (1.6)$$

де s_{13} – товщина зразка у найменшому поперечному перерізі, мм.

З чого випливає, що розтягуванням циліндричних трубних зразків гладких і з виточкою на оправці можна досліджувати пластичність у наступному діапазоні показника напруженого стану:

$$\frac{1}{3} \leq \eta. \quad (1.7)$$

В) Розтягування плоских зразків гладких та з надрізами на широких гранях [1, 4]. Так само як і в попередніх методах у деяких випадках процесу руйнування передує втрата стійкості, що супроводжується локалізацією деформації. Для дослідження пластичності при великих величинах показника напруженого стану випробування проводять на зразках з надрізами, круглими в основі, на великих гранях. Згідно [1], величина показника напруженого стану при даному способі випробування визначається як:

$$\eta = \frac{\sqrt{3}}{3} \left[1 + 2 \ln \left(1 + \frac{s_{13}}{2R_{13}} \right) \right]. \quad (1.8)$$

З виразу (1.7) випливає, що за допомогою розтягування плоских зразків гладких і з надрізами на широких гранях можна досліджувати пластичність в наступному діапазоні показника напруженого стану:

$$\frac{\sqrt{3}}{3} \leq \eta. \quad (1.9)$$

Г) Розтягнення смуг із вирізами [5]. Пластичність матеріалів можна дослідити розтягуванням смуг з різними вирізами (смуга з нескінченно тонкими розрізами, смуга з кутовими вирізами, смуга з вирізами з круглою основою тощо), розглянутих у роботі [5]. Дослідження, за допомогою ліній ковзання, виконані у роботі [6] показали, що даному способу відповідає наступний діапазон варіювання показника напруженого стану:

$$\sqrt{3}/3 \leq \eta \leq \sqrt{3}(1 + \pi)/3 \quad (1.10)$$

Д) Місцева витяжка листових зразків. З літературних джерел відомі різні варіанти подібних випробувань [1, 3, 7], серед яких, два методи є основними: метод Наказіми та метод Марчиньяка. Виконане в роботі [8] дослідження

показало, що більшу точність має метод Наказіми, згідно з яким деформації напівсферичним пуансоном піддається затиснена по периферії листова заготовка з прямокутною робочою частиною, місця переходів від робочої частини до периферії виконані радіусами заокруглення. Зміна величини показника напруженого стану досягається застосуванням зразків з різними розмірами робочої частини.

Відповідно до [7], даний спосіб дозволяє досліджувати пластичність в наступному діапазоні показників напруженого стану:

$$\frac{1}{3} \leq \eta \leq \frac{2}{3}. \quad (1.11)$$

Е) Розтяг плоского зразка з прорізами під кутом 45° [9]. У роботі [9] наведено метод дослідження пластичності металу при простому зсуві шляхом розтягування плоского зразка з прорізами до вертикальної осі симетрії зразка, розташованими на паралельних прямих під кутом 45° до горизонтальної осі зразка. Відповідно до В. А. Огородникова [1] внаслідок цього випробування в перемичці, що утворилася, між прорізами реалізуються умови близькі до простого зсуву, причому в ній можуть виникати не лише дотичні напруження, але й осьові в напрямку осі розтягування, що призводить до появи гідростатичного тиску та зменшенню показника напруженого стану:

$$\eta \rightarrow 0. \quad (1.12)$$

Ж) Кручення суцільних чи трубних циліндричних зразків [3]. При крученні циліндричних зразків у всьому об'ємі заготовки забезпечується постійна, рівна нулю величина показника напруженого стану:

$$\eta = 0. \quad (1.13)$$

У разі проведення випробувань на суцільних зразках необхідно враховувати градієнт деформації, як у радіальному, так і в осьовому напрямі. Усунення градієнта деформації у радіальному напрямку досягається застосуванням трубних зразків, але тоді виникає ймовірність втрати стійкості, чого також необхідно уникати.

3) *Осадка циліндричних зразків гладких і з виточенням* [4]. В ідеальному випадку відсутності тертя на торцях зразка напружений стан – лінійний стиск. Практично показник напруженого стану буде дещо більшим за рахунок дії сил тертя та утворення "бочки" на бічній поверхні зразка. Для зменшення величини показника напруженого стану при осадці, авторами роботи [4] запропоновано використання циліндричних зразків з круглим виточенням, у цьому випадку величина показника напруженого стану визначається рівнянням:

$$\eta = -\left[\frac{1}{3} + \sqrt{2} \ln\left(1 + \frac{d_{13}}{4R_{13}}\right)\right]. \quad (1.14)$$

Таким чином, за допомогою осадки циліндричних зразків гладких і з виточкою можна дослідити пластичність металів за показниками напруженого стану, що визначаються наступною сукупністю:

$$\begin{cases} \eta \rightarrow -1/3^+, \\ \eta \leq -1/3. \end{cases} \quad (1.15)$$

І) *Осадку призматичних зразків у щільному штампі* [3]. При осадці призматичних зразків у щільному штампі, у разі відсутності тертя на всіх контактних поверхнях, величина показника напруженого стану дорівнює $-\frac{1}{\sqrt{3}}$, але практично це не можна досягти, і діапазон показників напруженого стану характерний для даного способу дослідження пластичності визначається як:

$$\eta \rightarrow -\frac{1}{\sqrt{3}^+} \quad (1.16)$$

К) *Радіальне видавлювання канал певної форми* [3]. Операція радіального видавлювання передбачає збільшення діаметра заготовки на частини її висоти шляхом витіснення металу в радіальну порожнину по периметру бічної поверхні заготовки [10, 11] (рис. 1.1).

Відповідно до роботи [3], правильний вибір форми порожнини, що заповнюється металом при випробуванні, дозволяє здійснювати формозміну з постійним показником напруженого стану на бічній поверхні зразка, що витісняється, при цьому діапазон варіювання показника напруженого стану визначається нерівністю:

$$-\frac{2}{3} \leq \eta \leq \frac{1}{3}. \quad (1.17)$$

Розглянутий вище матеріал у вигляді діаграми узагальнений на рис. 1.2 (діапазон зміни показника напруженого стану обраний від $-2/3$ до $2/3$, що відповідає всім можливим процесам із плоским напруженим станом, до яких відносять більшість операцій листового штампування), з якого слідує, що без залучення кількох способів, що вимагають різного випробувального обладнання з досить широким діапазоном варіювання показника напруженого стану, що включає позитивні та негативні величини, найбільш придатним для дослідження пластичності об'ємного матеріалу є спосіб радіального видавлювання суцільних циліндричних зразків в канал певної форми, а для листового матеріалу такого способу немає. У свою чергу діапазон варіювання показника напруженого стану при радіальному видавлюванні в канал певної форми вимагає додаткових досліджень, оскільки він отриманий за допомогою аналітичного рішення, заснованого на низці припущень.

1.2 Огляд можливостей комерційних програм моделювання процесів обробки матеріалів тиском

Проектування процесів обробки матеріалів тиском на сучасному рівні передбачає розв'язання комплексу різних задач, основними цілями яких є: виявлення закономірностей процесу, визначення ступеня впливу різних факторів, оцінка спадкових ознак на експлуатаційні властивості виробу, що створюється, для управління та оптимізації процесу.

До згаданих завдань належать: визначення характеристик напружено-деформованого стану у процесі формозміни, прогнозування структури одержуваного виробу та технологічних відмов, розрахунок інструменту тощо. Для їх вирішення необхідно визначити компоненти тензорів напруженого та деформованого станів матеріальних точок тіла у довільний момент часу виконання технологічної операції. Сучасна теорія пластичності дозволяє сформулювати у загальному вигляді задачу їх визначення.

Наприклад, при стаціонарному об'ємному напруженому стані в кожній точці необхідно визначити шість компонентів тензора напруженого стану (з урахуванням закону парності дотичних напружень) та три параметри деформованого стану – компоненти вектора швидкості. Для цього є [12]: рівняння рівноваги, фізичні рівняння зв'язку напруженого та деформованих станів, рівняння О. Л. Коші. З умови пластичності Мізеса та гіпотези єдиної кривої інтенсивність напружень у загальному випадку є функцією ступеня деформації, інтенсивності швидкостей деформації та температури [12]. Напружено-деформований стан тіла повинен задовольняти граничним силовим та кінематичним умовам. В результаті виходить замкнута система рівнянь, розв'язком якої є шукані невідомі компоненти тензорів напруженого та деформованого станів та компоненти вектора швидкості у вигляді функцій координат та часу. Аналітичними методами вирішення цієї системи рівнянь виконати неможливо, тому були розроблені різні методи, які дозволяють це зробити, використовуючи припущення. Один із варіантів – відмова від пошуку рішення у всьому об'ємі тіла, обмежившись певною кількістю точок з наступною апроксимацією рішення на всю область. В результаті система нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних зводиться до системи алгебраїчних рівнянь великої розмірності. Таким чином, шукається чисельне рішення, замість аналітичного. Додаткова перевага чисельних методів – набута спільність підходу замість спільності рішення, властивого аналітичним методам. Чисельне рішення складається з наступної послідовності дій:

1) Ідеалізація - перехід від реальної фізичної системи до її математичної моделі.

2) Дискретизація - заміна безперервної розрахункової області дискретним аналогом.

3) Рішення.

4) Аналіз результатів.

Процедура дискретизації тісно пов'язана з процедурою алгебраїї - апроксимації алгебраїчними рівняннями взаємозв'язку вузлових змінних вихідних диференціальних та інтегральних рівнянь.

Розрізняють три основні чисельні методи вирішення задач пружнопластичності та теплопровідності [13, 14]:

- метод кінцевих різниць;
- метод граничних елементів;
- метод кінцевих елементів.

Метод кінцевих різниць у задачах теорії пружності та пластичності практично не застосовується, через низьку точність одержуваних результатів.

Також не набув широкого поширення у практиці розрахунків задач пластичності метод граничних елементів, незважаючи на очевидні переваги; його обґрунтованість доведено для досить вузького кола задач.

У свою чергу метод кінцевих елементів є строго обґрунтованим, багаторазово перевірений експериментальною верифікацією. У методі кінцевих елементів дискретизація здійснюється за рахунок поділу просторової області на кілька елементів, заданої форми. Кінцеві елементи взаємодіють між собою лише у деяких точках (вузлах). Завдяки можливості використання кінцевих елементів різної форми, розмірів та просторової орієнтації полегшується дискретизація довільних просторових областей із різними граничними умовами. Спосіб алгебраїї полягає в апроксимації шуканої функції в аналізованій області. Реальне поле шуканої величини замінюється деякою функцією Φ_{14_1} , яка залежить від значень шуканої величини у вузлах сітки. Ця

функція особливого вигляду: складається з простих функцій f_{14_2} кожна з яких визначена лише на своєму кінцевому елементі:

$$\Phi_{14_1} = \sum_{i=1}^L f_{14_2_i}, \quad (1.18)$$

де i – номер елемента;

L – кількість елементів.

В результаті задача зводиться до вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь, невідомими якої є значення шуканої величини у вузлах кінцевого елемента.

Інтенсивний розвиток методу кінцевих елементів та комп'ютерної техніки в останній час створив передумови розвитку математичних моделей процесів обробки матеріалів тиском і призвів до появи різних комерційних програм. Комерційні програмні продукти інженерного аналізу, що дозволяють моделювати процеси обробки матеріалів тиском, прийнято розділяти на дві групи: універсальні та спеціалізовані.

Універсальні програми дозволяють вирішувати широкий спектр різних за своєю природою задач: тепловий аналіз, гідродинаміка, розрахунки на міцність тощо. До них належать: ANSYS, MSC.NASTRAN та ін. Ці системи мають конструкторську спрямованість і, у загальному випадку, дозволяють із достатньою точністю моделювати тільки пружні та незначні пластичні деформації, що пов'язано з відсутністю або суттєвим обмеженням, автоматичного адаптивного перерозбиття моделі на кінцеві елементи при значних пластичних деформаціях, характерних для процесів обробки металів тиском, коли спотворення форми окремих елементів перевищує критичну величину.

З-поміж універсальних програмних комплексів варто виділити пакети програм LS-DYNA та MSC.Marc. Ці продукти не позбавлені можливості автоматичного адаптивного перерозбиття сітки кінцевих елементів, та, отже, дозволяють моделювати завдання зі значними пластичними деформаціями. В

якості критеріїв граничного деформування в них реалізовані моделі з числа механічних теорій міцності.

Спеціалізовані програмні продукти спрямовані на моделювання технологічних процесів машинобудівного виробництва. До них відносяться: QForm, DEFORM, FORGE та ін. Можливості прогнозування граничного деформування в них різні так, у QForm тільки в сьомій версії засобами постпроцесорного перерахунку [15] було запроваджено енергетичний критерій (Cockcroft та Latham)

$$\int_0^{t_p} \sigma_1 d\varepsilon_i = c_{112_2}, \quad (1.19)$$

де c_{112_2} – коефіцієнт.

До цього оцінка граничного деформування не здійснювалася. У найбільш функціональних для аналізу граничного деформування спеціалізованих програмах, таких як DEFORM, із макроскопічних феноменологічних моделей руйнування, крім механічних теорій міцності, реалізовані різні енергетичні критерії.

Кручення під високим тиском відноситься до обробки металів, під час якої зразки піддаються стискаючій силі та одночасному крученню. Незважаючи на те, що фундаментальні принципи цієї схеми були вперше запропоновані більше 60 років тому, кручення під високим тиском набуло великого значення лише протягом останніх 20 років, коли було визнано, що цей процес обробки металу тиском дає можливість досягти виняткової дрібної зернистості, часто до нанометрового рівня та винятково високої міцності. Підсумки, передумови та основні принципи обробки кручення під високим тиском окреслюють найважливіші нещодавні розробки, про які повідомлялося щодо матеріалів, оброблених таким чином. Продемонстровано, що Кручення під високим тиском забезпечує високе значення міцності матеріалу, вдалу мікроструктурну однорідність, якщо обробка продовжується через достатню кількість обертів

кручення, і існує потенціал для досягнення здатності до різних необхідних характеристик.

Таким чином, комерційні програмні продукти інженерного аналізу процесів обробки тиском, є високоефективним перспективним інструментом теоретичного аналізу, але критерії, реалізовані в них, в загальному випадку, не дозволяють точно оцінювати граничне деформування в процесах холодного листового штампування заготовок з ізотропного металу.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ВІД ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ І ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

2.1 Вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації для побудови діаграм пластичності

Проведений у розділі аналіз показників напруженого стану та накопиченої деформації, які застосовуються при побудові діаграм пластичності, показав, що на даний момент запропоновано безліч різних виразів для їх визначення, але немає підстав вважати якісь із них об'єктивно найкращими. Як вважає Г. Д. Дель [16] обґрунтованим є вибір величин, що дозволяють побудувати єдину діаграму пластичності для різних видів напруженого стану.

Таким чином, метою підрозділу був вибір показників напруженого стану та накопиченої деформації, що дозволяють мінімізувати відносне відхилення діаграм пластичності, що відповідають різним видам напруженого стану.

2.2 Матеріал дослідження

Для досягнення поставленої мети було виконано теоретичне дослідження напружено-деформованого стану зразків у експериментах щодо визначення залежності пластичності матеріалу від показників напруженого стану та виду напруженого стану. В якості експериментальної основи дослідження було прийнято результати роботи [1] щодо визначення діаграм пластичності різних металів, відповідних двом видам випробувань: кручення та розтягування зразків у камері високого тиску. Створення певної величини показника напруженого стану у різних випробуваннях досягалося зміною тиску у камері за певним законом.

Досліджуваним матеріалом була сталь 12Х1МФ.

Опір деформації матеріалу σ_s визначався рівнянням [1]:

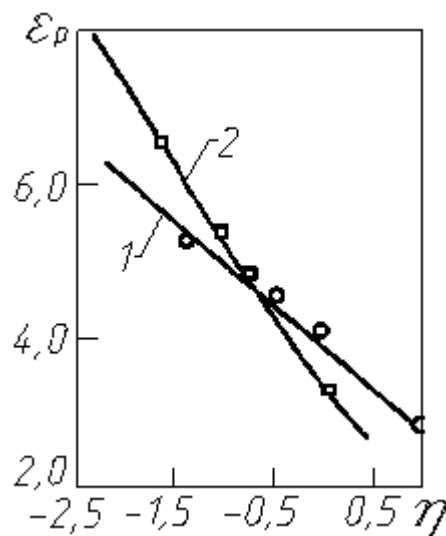
$$\sigma_s = 309 + 482,2\Lambda^{0,279}. \quad (2.1)$$

Діаграми пластичності з зазначеним положенням експериментально отриманих точок представлені на рис. 2.1, міра накопиченої деформації яких визначається виразом

$$\varepsilon_p = \Lambda \Big|_{t=t_p}, \quad (2.2)$$

а показник напруженого стану – виразом

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (2.3)$$



1 і о – при $\mu_\sigma = -1$; 2 і □ – при $\mu_\sigma = 0$

Рисунок 5 – Діаграми пластичності сталі 12Х1МФ із зазначеним положенням експериментально отриманих точок

2.3 Комп'ютерне моделювання випробувань

Для теоретичного дослідження напружено-деформованого стану матеріалу зразків у процесі випробувань було виконано відтворення експериментів за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі. У процесі аналізу можливостей програмного продукту були

розроблені методики, представлені у вигляді алгоритмів на рис. 2.2 та 2.3, що дозволяють виконати перебудову діаграм пластичності, отриманих у роботі [1], у різні координати.

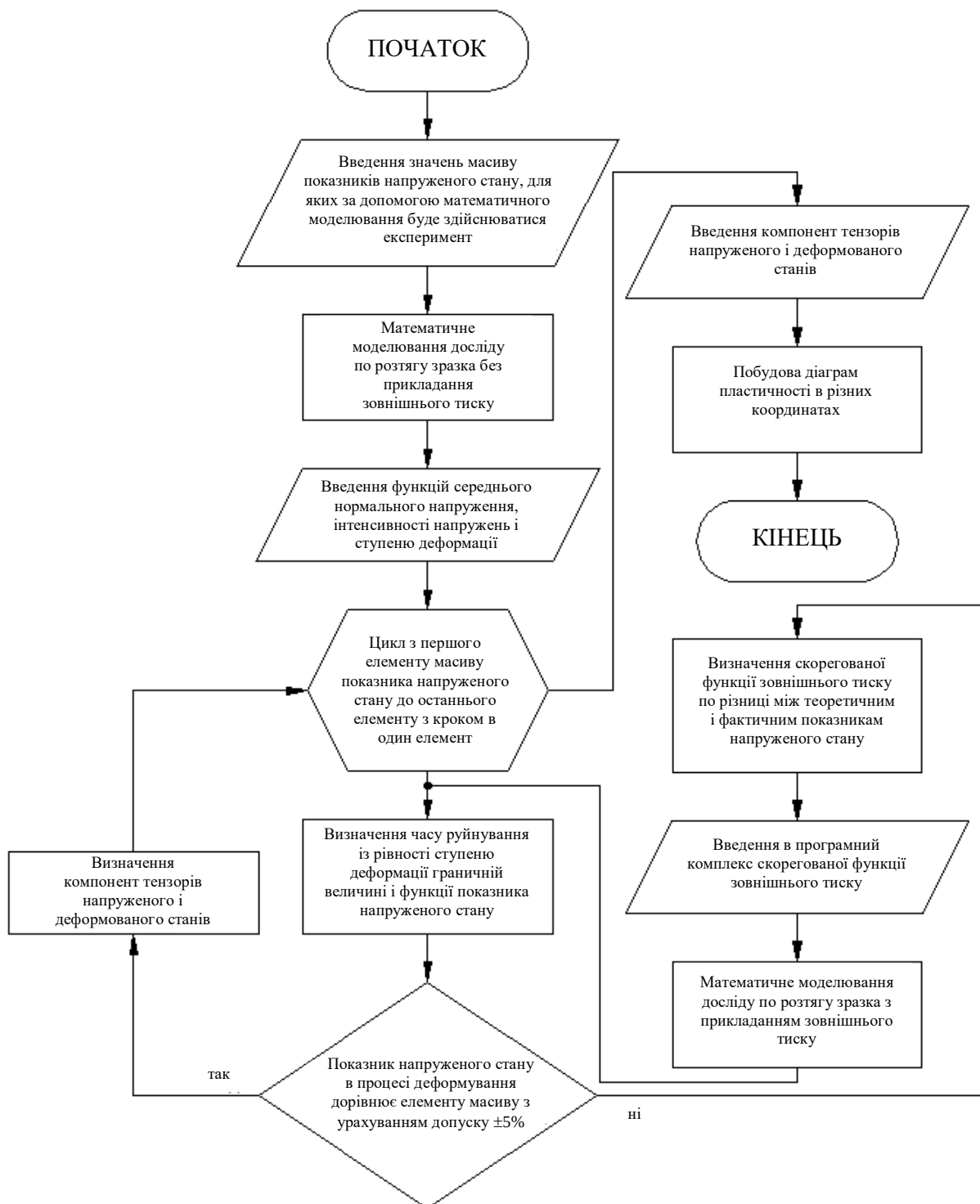


Рисунок 2.2 – Алгоритм визначення показників напруженого стану та накопиченої деформації при руйнуванні зразків у випробуваннях на розтягування під зовнішнім тиском на основі моделювання в програмному комплексі

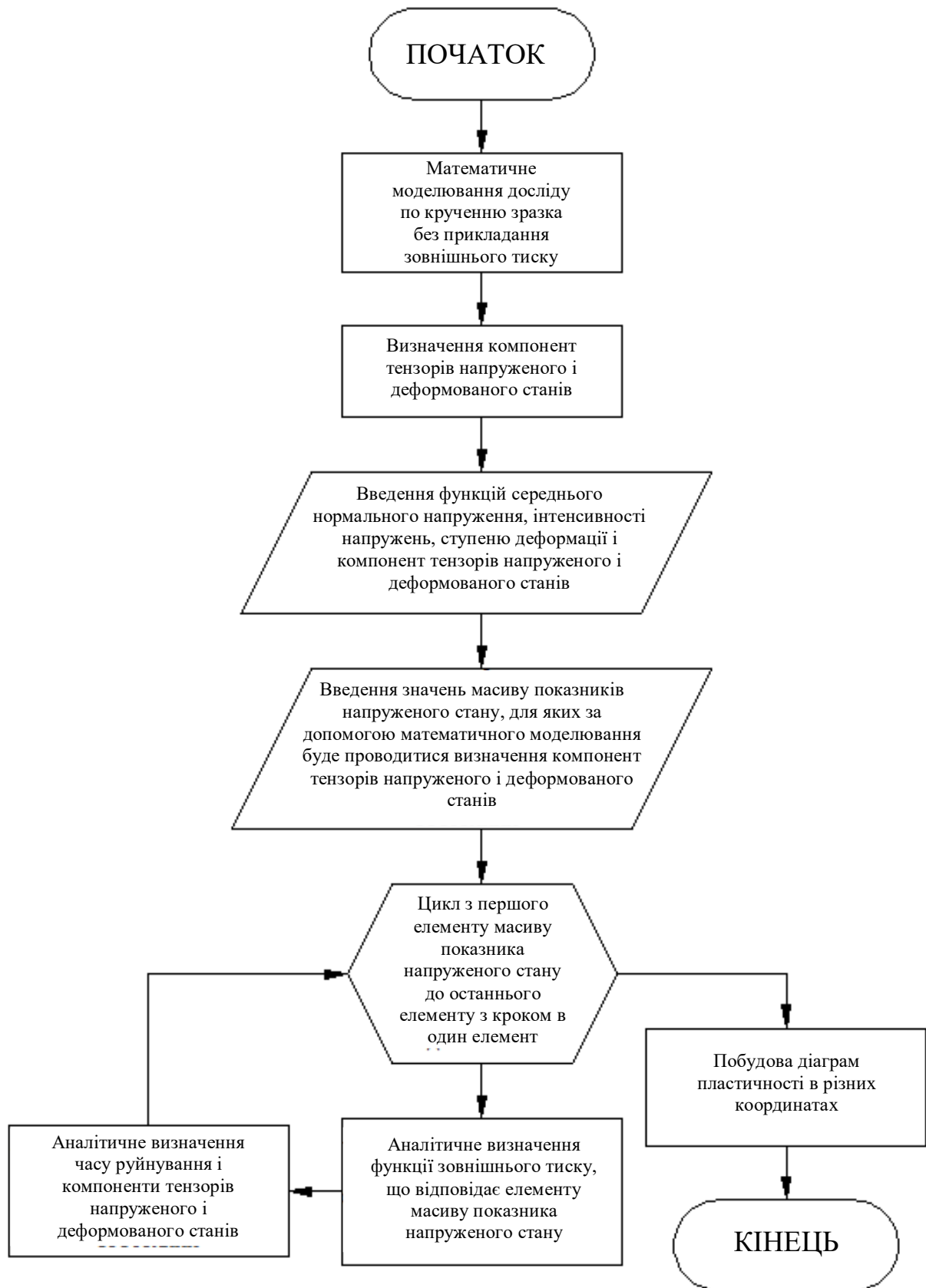


Рисунок 2.3 – Алгоритм визначення показників напруженого стану та накопиченої деформації при руйнуванні зразків у випробуваннях на кручення під зовнішнім тиском на основі моделювання в програмному комплексі

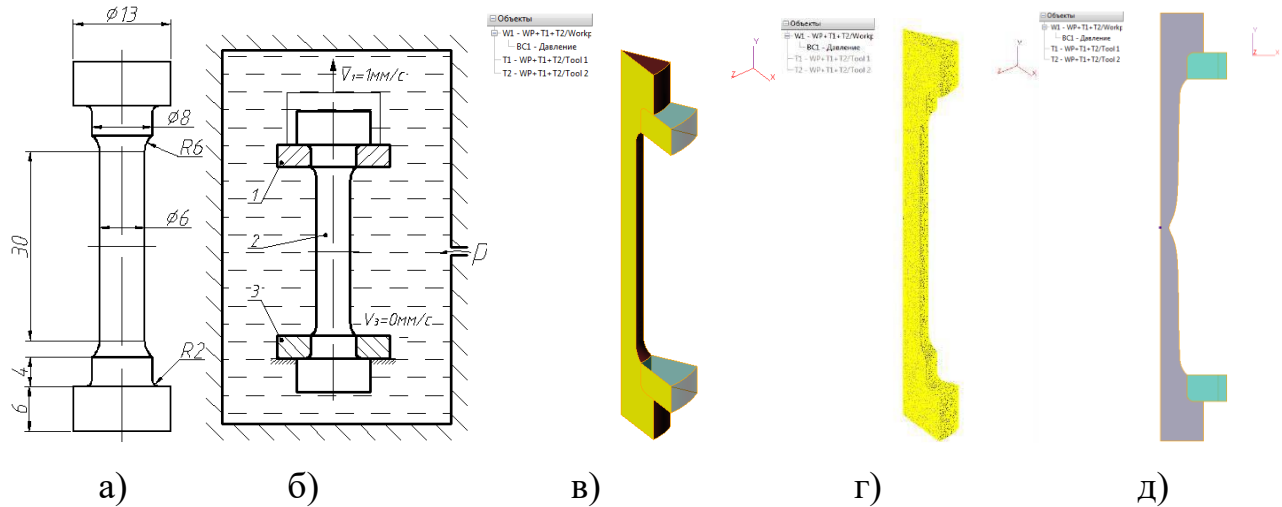
Достовірність результатів комп'ютерного моделювання забезпечується застосуванням у програмі вирішувача, заснованого на чисельному методі кінцевих елементів, що неодноразово пройшов експериментальну верифікацію.

Процедура методу кінцевих елементів у загальному випадку складається з наступних етапів:

- 1) Аналіз вихідних даних та вибір розрахункової схеми.
- 2) Завдання геометрії об'єкта.
- 3) Вибір типів кінцевих елементів та дискретизація заданих об'ємів.
- 4) Завдання фізичних властивостей аналізованого суцільного середовища.
- 5) Упорядкування системи рівнянь.
- 6) Розв'язання системи рівнянь щодо невідомих вузлових змінних.
- 7) Обчислення передбачених постановкою завдання вихідних параметрів.

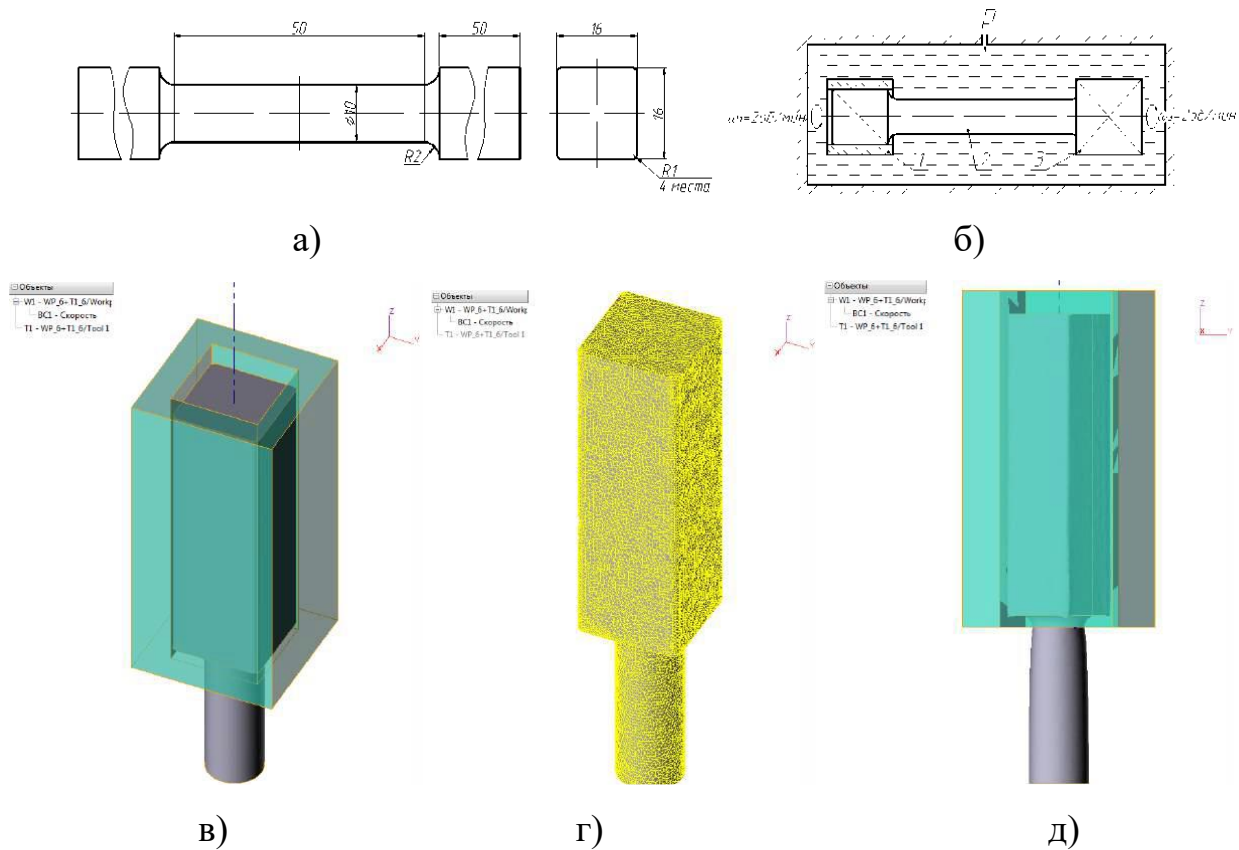
Прийняті у дослідженні розрахункові схеми наведено на рис. 2.4, б та 2.5,

б.



а – ескіз зразка; б – розрахункова схема; в – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі; г – кінцево-елементна сітка зразка; д – положення на зразку трасованої точки; 1, 3 – захвати випробувальної машини; 2 – зразок; V_1 – лінійна швидкість і-ої ланки

Рисунок 2.4 – Моделювання випробувань на розтягування зразка



а – ескіз зразка; б – розрахункова схема; в – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі; г – кінцево-елементна сітка зразка; д – положення на зразку трасованої точки; 1, 3 – захвати випробувальної машини; 2 – зразок; ω_i – кутова швидкість і-ої ланки

Рисунок 2.5 – Моделювання випробувань на кручення зразка

Моделювання дослідів на розтягування проводилося для другого зразка, ескіз якого представлений малюнку 2.4, а. Геометрія зразка для моделювання дослідів на кручення підбиралася відповідно до вимог та внутрішніми обмеженнями програмного комплексу (див. рис. 2.5, а).

Для зменшення часу розрахунку, що витрачається на одне моделювання, а також загального часу проведення необхідної кількості моделювань, були прийняті такі спрощення:

- моделювання дослідів на розтяг проводилося для 1/12 частини зразка, із завданням відповідних властивостей геометричної симетрії (див. рис. 2.4, в);

- моделювання дослідів на кручення зразка проводилося для половини задачі із жорстким закріпленням нижньої грані (див. рис. 2.5, в);

- у разі дослідів на кручення моделювання проводилося тільки для задачі без застосування зовнішнього тиску; для випробувань під тиском передбачалася незалежність деформованого стану від величини зовнішнього тиску, визначення компонентів тензора напруженого стану здійснювалося за відомими аналітичними залежностями [17]:

$$\sigma_1 = \sigma_S / \sqrt{3} - p, \quad \sigma_2 = -p, \quad \sigma_3 = -\sigma_S / \sqrt{3} - p, \quad (2.4)$$

де p - величина зовнішнього тиску, МПа:

$$p = -\eta \sigma_S / \sqrt{3}. \quad (2.5)$$

У програмному комплексі вибір типів кінцевих елементів, складання та рішення системи рівнянь здійснюються автоматично, так само значно спрощений процес дискретизації, від якого залежить якість створеної сітки кінцевих елементів та, як наслідок, точність отриманого рішення.

Для якісної побудови кінцево-елементної сітки (див. рис. 2.4, г і 2.5, г) застосовувалося обмеження – максимальний розмір кінцевого елемента 0,5мм.

Фізичні властивості, аналізованого суцільного середовища, визначалися рівнянням (2.1) та рис. 2.1. Опір деформації задавався користувацькою підпрограмою написаною на мові програмування Fortran в наступному вигляді:

```
F0 = parameter ("F0", 1) * 1e6
g = parameter ("g", 0) * 1e6
b = parameter ("b", 0)

function FlowStress(strain)
  L = strain*3^0.5
  F = F0+g*L^b
  return F
end

function InitFlowStress(T, strain, strainRate)
  return FlowStress(strain)
end
```

В якості вихідних параметрів моделювання приймалися характеристики напружено-деформованого стану в трасованих точках, необхідні для визначення показників напруженого стану та накопиченої деформації. Розташування точок показано на рис. 2.4, д і 2.5, д, при їх виборі враховувалися такі положення:

- 1) при розтягуванні руйнування відбувається на осі зразка на місці утворення шийки з мінімальним діаметром поперечного перерізу;
- 2) при крученні руйнування ініціюється на зовнішній поверхні зразка в перерізі, що прилягає до галтелі зразка в місці його кріплення в захватах випробувальної машини.

2.4 Математична обробка результатів моделювання

Взявши до уваги висновки деяких дослідників [18, 3] про незначущість впливу на пластичність матеріалу середнього головного напруження і виконання гіпотези єдиної кривої, побудованої не в традиційній системі координат, а координатах максимальний зсув – максимальне дотичне напруження, в якості заходів щодо напруженого стану і накопиченої деформації, крім величин, розглянутих у розділі, були прийняті величини, що представлені нижче.

В якості міри накопиченої на момент руйнування деформації також розглядалася наступна величина:

$$\varepsilon_p = \gamma_{13}/2|_{t=t_p}, \quad (2.6)$$

де γ_{13} – максимальна зсувна деформація:

$$\gamma_{13} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3. \quad (2.7)$$

В якості міри напруженого стану – вирази

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{|\sigma_{\max}|} \quad (2.8)$$

де $\sigma_{\max}$ – максимальне за абсолютною величиною головне напруження, МПа;

$$\eta = \frac{1 - c_{121_5} \sigma_{cp} / \sigma_i}{\tau_{13} / \sigma_i}, \quad (2.9)$$

де c_{121_5} - коефіцієнт.

$$\eta = \frac{1 - c_{121_6} \sigma_{cp} / \sigma_i}{\sigma_1 / \sigma_i}, \quad (2.10)$$

де c_{121_6} - коефіцієнт.

$$\eta = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (2.11)$$

$$\eta = 3 \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (2.12)$$

та (1.1) і (1.3) з заміною σ_{cp} на σ_{13} ; вирази

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (2.13)$$

де σ_{max} – максимальне за абсолютною величиною головне напруження, МПа;

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\mu_\sigma \sigma_i} \quad (2.14)$$

де μ_σ – параметр Надаї-Лоде;

$$\eta = \frac{c_{121_2} \sigma_1 + c_{121_3} \sigma_2 + c_{121_4} \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{\tau_{13}}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)}; \quad (2.16)$$

$$\eta = 1 - \frac{\tau_{13}}{|\sigma_{max}|} \quad (2.17)$$

та (1.1), (2.9) – (2.12) із заміною σ_i на τ_{13} та вирази (1.1), (1.3), (2.9-2.15) із заміною σ_{cp} та σ_i на, відповідно, σ_{13} та τ_{13} . Під σ_{13} розуміється величина нормального напруження у майданчиках з максимальним дотичним напруженням:

$$\sigma_{13} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (2.18)$$

Коефіцієнти, що входять до виразів

$$\varepsilon_p = c_{121-1} \varepsilon_1 \Big|_{t=t_p}; \quad (2.19)$$

де c_{121-1} - коефіцієнт;

та (2.9), (2.10), (2.15), внаслідок відсутності інформації про їх фактичне значення, прийняті рівними одиниці, в результаті чого, рівняння (2.15) перетворилося на вираз (2.12), і в подальшому аналізі не розглядалося. Не має сенсу розглядати обидві величини, що визначаються виразами

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i \Big|_{t=t_p}; \quad (2.20)$$

і (2.2), оскільки вони відрізняються постійним множником, який при визначенні відносного відхилення діаграм пластичності скорочується; далі розглядався тільки показник, що визначається виразом (2.20). З тієї ж причини з виразів (1.1), (1.3), (2.11), (2.12) розглядалася лише величина (1.3).

У процесі обробки результатів моделювання випробувань на кручення зразків при побудові графіків зміни величин, що визначаються виразами (2.6), (2.19), (2.20) та

$$\varepsilon_p = g_{окт} \Big|_{t=t_p}; \quad (2.21)$$

де $g_{окт}$ – октаедричний зсув;

з аналізу були виключені показники накопиченої деформації у вигляді (2.6), (2.19) та (2.21), оскільки вони в процесі випробування не є монотонно зростаючими функціями (рис. 2.6), а значить, руйнація може відбуватися після проходження ними свого максимуму і виникає невизначеність, яке значення приймати в якості граничного. Таким чином, у дослідженні для визначення величини накопиченої деформації використовувався лише вираз (2.20).

Оскільки показники напруженого стану у процесі випробувань не є постійними величинами, у розрахунках використовувалися середні за процес величини, що визначаються як:

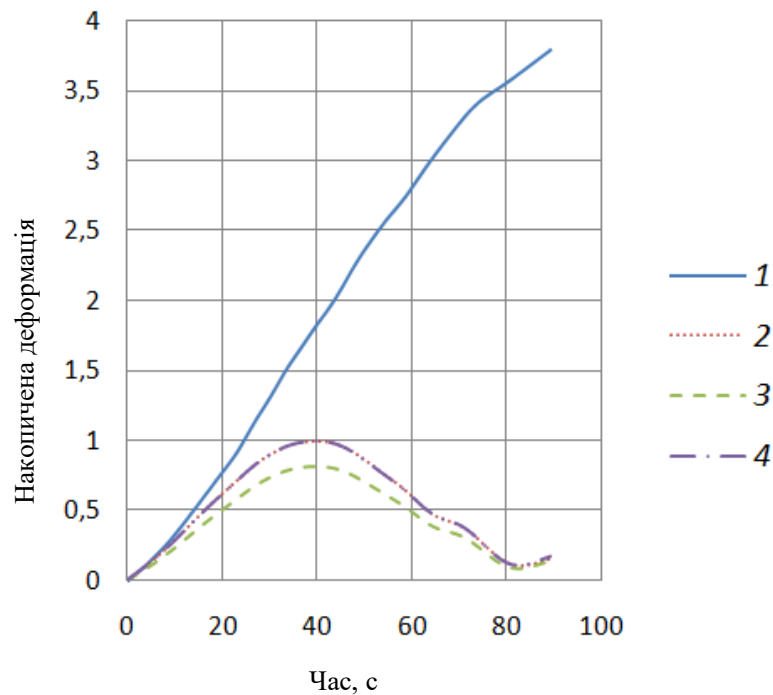
$$\eta_{\text{ср}} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \eta d\varepsilon_i \Big|_{t=t_p} . \quad (2.22)$$

Після завершення математичної обробки результатів комп'ютерного моделювання були побудовані діаграми пластичності для всіх можливих показників напруженого стану та визначено величини їх середнього відносного відхилення δ (табл. 2.1), відповідно до формули:

$$\delta = \frac{1}{\max(\eta_{\text{срР}} \cup \eta_{\text{срК}}) - \min(\eta_{\text{срР}} \cup \eta_{\text{срК}})} \int_{\min(\eta_{\text{срР}} \cup \eta_{\text{срК}})}^{\max(\eta_{\text{срР}} \cup \eta_{\text{срК}})} \left| \frac{\varepsilon_{\text{Р}} - \varepsilon_{\text{К}}}{\min(\varepsilon_{\text{Р}}, \varepsilon_{\text{К}})} \right| d\eta \quad (2.23)$$

де $\eta_{\text{срР}}$, $\eta_{\text{срК}}$ – одновимірний масив показника напруженого стану, що відповідає випробуванням на розтягування та на кручення;

$\varepsilon_{\text{Р}}$, $\varepsilon_{\text{К}}$ – функція, що апроксимує результати перебудови діаграми пластичності відповідно випробувань на розтяг і на кручення.



1 – (2.20); 2 – (2.19); 3 – (2.21); 4 – (2.6)

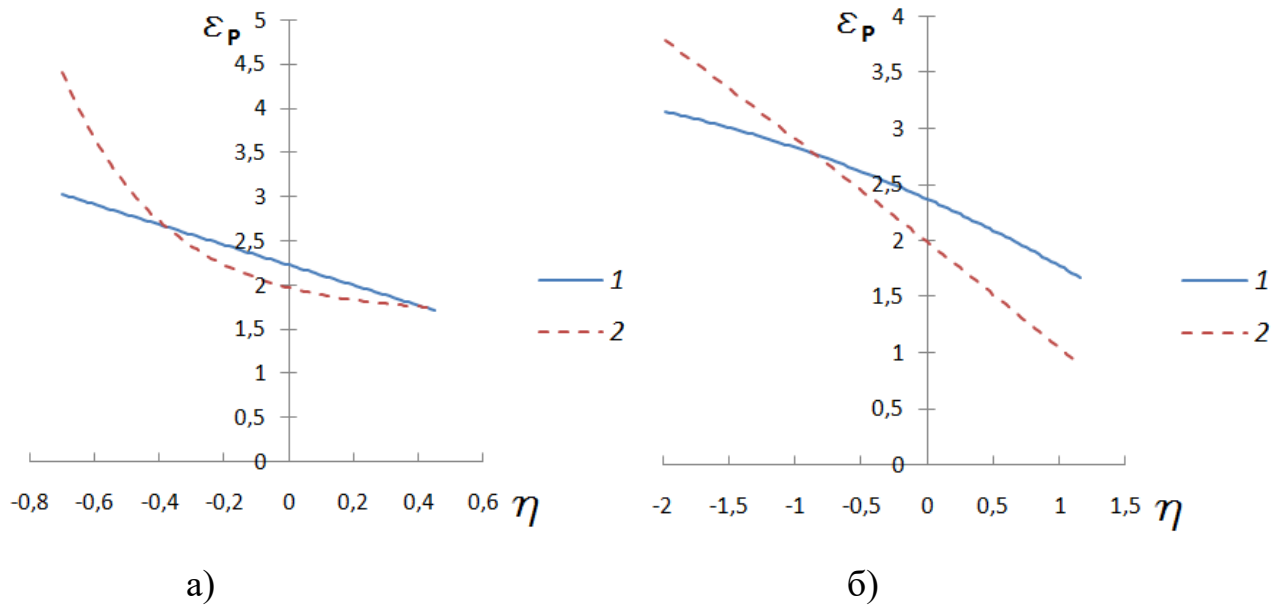
Рисунок 2.6 – Величина показника накопиченої деформації у процесі кручення зразка, що визначається виразом

Таблиця 2.1 – Середнє відносне відхилення діаграм пластичності

Вираз для визначення показника напруженого стану	Середнє відносне відхилення діаграм пластичності побудованих для показників напруженого стану, %			
	прийнятих без змін	прийнятих із заміною σ_{cp} на σ_{13}	прийнятих із заміною σ_i на τ_{13}	прийнятих із заміною σ_{cp} і σ_i на σ_{13} і τ_{13}
(2.16)	224,078	-	-	-
(2.8)	11,265	15,998	-	-
(2.17)	33,333	-	-	-
(2.13)	27,178	-	51,249	-
(2.14)	∞	-	∞	-
(2.9)	24,826	48,645	29,458	59,908
(2.10)	71,627	91,492	72,500	97,978
(1.3)	22,595	40,952	29,458	59,908
Примітка – комірки з прочерком, відповідають виразам, для яких прийнята заміна не застосовується через відсутність замінної величини				

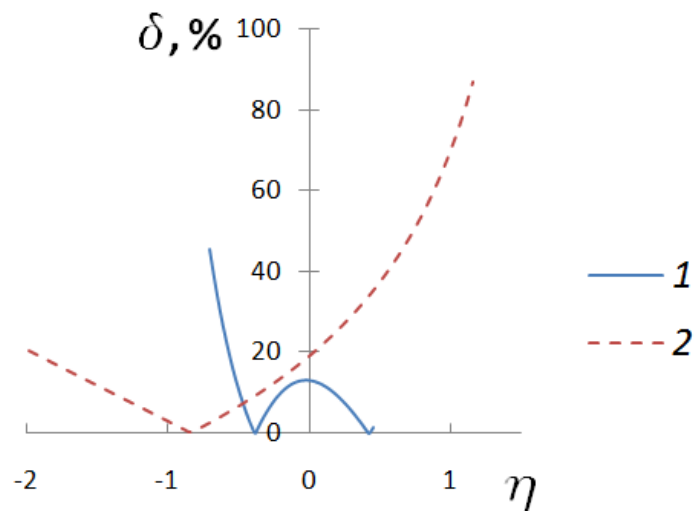
Як впливає з табл. 2.1, мінімальне середнє відносне відхилення мають діаграми пластичності, побудовані для показника напруженого стану у вигляді (2.8) без будь-яких змін. Традиційно застосовувані більшістю дослідників для побудови діаграми пластичності показники напруженого стану у вигляді виразу (1.3), або такі, що відрізняються від нього постійним множником, мають значно більшу (більш ніж 2 рази) величину середнього відносного відхилення.

На рис. 2.7 та 2.8 представлені діаграми пластичності для показників напруженого стану у вигляді (1.3) та (2.8) та відповідні їм графіки відносного відхилення.



а - (2.8); б - (1.3); 1 - для $\mu_\sigma = -1$; 2 – для $\mu_\sigma = 0$

Рисунок 2.7 – Діаграми пластичності, що відповідають показнику напруженого стану у вигляді



1 - (2.8); 2 – (1.3)

Рисунок 2.8 – Відносне відхилення діаграм пластичності, що відповідають показнику напруженого стану у вигляді

2.5 Аналіз результатів

Підсумовуючи дослідження слід зазначити таке:

1) В якості міри накопиченої деформації з відомих показників у загальному випадку застосовні лише величини у вигляді виразу (2.20), або таким, що відрізняється від нього постійним множником.

2) Використання традиційно вживаних мір напруженого стану у вигляді виразу (1.3), і таких, що відрізняються від нього величиною постійного множника, при побудові діаграм пластичності не завжди має кращий результат з позиції мінімізації відносного відхилення діаграм пластичності, що відповідають різним видам напруженого стану.

3) Єдиної діаграми пластичності для різних видів напруженого стану не існує, і в загальному випадку при аналізі ступеня використання ресурсу пластичності необхідно застосовувати поверхню пластичності шляхом введення на розгляд окрім показника напруженого стану показник виду напруженого стану.

Надалі в якості міри накопиченої деформації ε_p використовувалась величина:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i \Big|_{t=t_p} \quad (2.24)$$

показник напруженого стану η прийнятий у вигляді:

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i}, \quad (2.25)$$

а показник виду напруженого стану χ визначається як:

$$\chi = \mu_\sigma. \quad (2.26)$$

Показник напруженого стану у прийнятому вираженні враховує вплив першого інваріанту тензора напружень та другого інваріанту девіатора напружень, а показник виду напруженого стану – третього та другого інваріантів девіатора напружень. Таким чином, вибір цих величин дозволяє повною мірою відобразити напружений стан матеріалу.

Для знаходження області визначення у просторі показників η та χ процесів із плоским напруженим станом, до яких відноситься більшість технологій листового штампування необхідно розглянути величини (2.25) і (2.26) при рівності нулю одного з головних напружень. Таким чином, отримали три ділянки області визначення:

- перша ділянка:

$$\sigma_1=0, \sigma_2<0, \sigma_3<0; \quad (2.27)$$

- друга ділянка:

$$\sigma_1>0, \sigma_2=0, \sigma_3<0; \quad (2.28)$$

- третя ділянка:

$$\sigma_1>0, \sigma_2>0, \sigma_3=0. \quad (2.29)$$

Величина показника виду напруженого стану, що відповідає першій ділянці, визначається як:

$$\chi = (-2\sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_3. \quad (2.30)$$

Виразивши з рівняння (2.30) відношення другого головного напруження до третього через величину показника виду напруженого стану отримали:

$$\sigma_2 / \sigma_3 = (1 - \chi) / 2. \quad (2.31)$$

Рівняння для визначення показника напруженого стану на першій ділянці має вигляд:

$$\eta = -\frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} + 1 \right) / \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right)^2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_3} + 1}, \quad (2.32)$$

з урахуванням виразу (2.31) виведено наступне рівняння області визначення на першій ділянці:

$$\eta = -\frac{1}{3} \left(\frac{1-\chi}{2} + 1 \right) / \sqrt{\left(\frac{1-\chi}{2} \right)^2 - \frac{1-\chi}{2} + 1} = (\chi - 3) / \left(6\sqrt{(\chi+1)^2/4 + (\chi+1)/2} \right). \quad (2.33)$$

Повторивши аналогічний висновок для другої та третьої ділянок, відповідно, маємо:

$$\eta = (2 - 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 3} \right), \quad (2.34)$$

і

$$\eta = (1 + 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 1} \right). \quad (2.35)$$

Об'єднавши вирази (2.33), (2.34) і (2.35), отримали область визначення в просторі показників напруженого стану та виду напруженого стану процесів із плоским напруженим станом:

$$\eta = \begin{cases} (\chi - 3) / \left(6\sqrt{(\chi + 1)^2 / 4 + (\chi + 1)/2} \right), \\ (2 - 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 3} \right), \\ (1 + 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 1} \right). \end{cases} \quad (2.36)$$

На рис. 2.9 представлено графічну інтерпретацію рівняння (2.36).

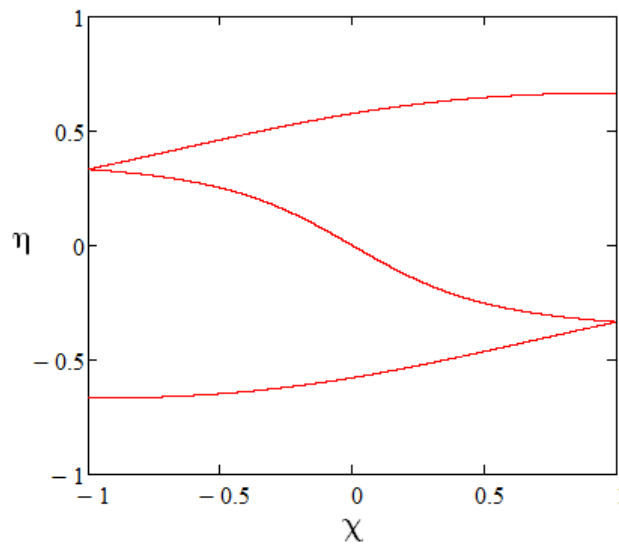


Рисунок 2.9 – Область визначення процесів із плоским напруженим станом

З рис. 2.9 випливає, що для процесів із плоским напруженим станом поверхня пластичності перетворюється на діаграму пластичності, показник напруженого стану якої пов'язаний із показником виду напруженого стану рівнянням (2.36).

Параметри процесу та закономірності їх зміни визначають вид та закономірності зміни напружено-деформованого стану. Достовірно визначений напружено-деформований стан є необхідною складовою точного визначення величини використаного ресурсу пластичності. Це величини, яка є одним із важливих показників якості готових виробів. Тому подальше удосконалення та розробка методів оцінки деформованості заготовок при холодному пластичному листовому деформуванні є актуальною задачею.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ РОЗТЯГУВАННЯМ/СТИСКОМ СПЕЦІАЛЬНИХ СМУГ

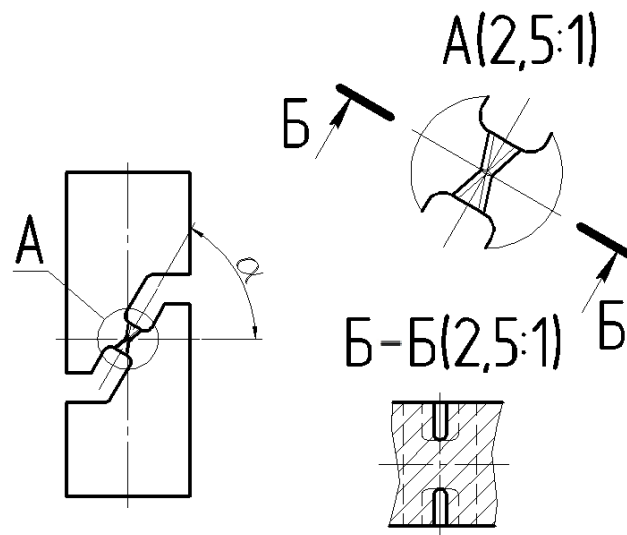
Проведений підрозділі аналіз показав, що у теперішній час залишається актуальною проблемою розробки універсального способу дослідження пластичності листового металу, що має широкий діапазон варіювання показника напруженого стану, що включає позитивні і негативні величини, що не потребує застосування декількох видів випробувального обладнання та спеціалізованих пристроїв. Таким чином, метою підрозділу було вирішення згаданої проблеми.

Для її досягнення було запропоновано новий спосіб дослідження пластичності листового металу в залежності від показників напруженого стану та виду напруженого стану, та виконано дослідження його можливостей з урахуванням комп'ютерного моделювання.

3.1 Метод дослідження пластичності металів залежно від показників напруженого стану та виду напруженого стану розтягуванням/стисненням спеціальних смуг

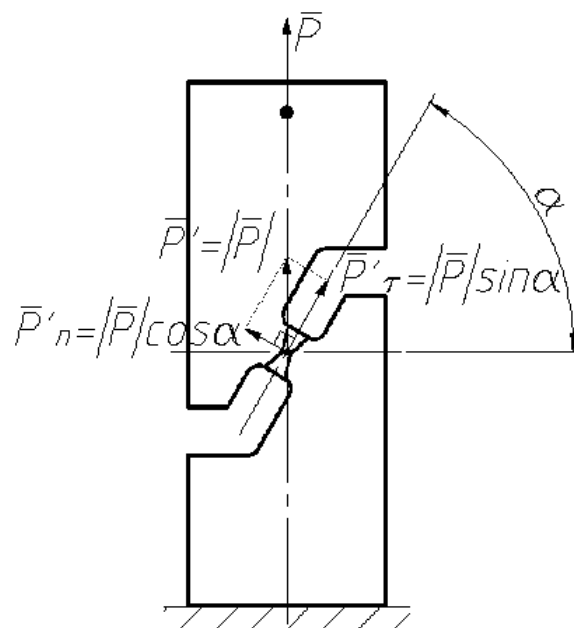
За результатами аналізу існуючих методів дослідження пластичності металів, був запропонований новий спосіб, заснований на випробуваннях по розтягуванню/стиску, що полягає в тому, що для дослідження залежності пластичності металу від показників напруженого стану та виду напруженого стану, випробуванням піддаються зразки типу "спеціальна смуга", представлена на рис. 3.1, з пропилами та перемичкою із проточками.

Варіювання величин показників досягається зміною кута нахилу пропилів, внаслідок чого в центрі перемички реалізуються різні комбінації двох видів навантаження: розтягування, чи стискування і зсуву (рис. 3.2). Для локалізації виникнення руйнування у згаданому місці перемичка додатково ослаблена спеціальними проточками.



α – кут нахилу пропилів, град

Рисунок 3.1 – Зразок типу "спеціальна смуга"



$\bar{P}$ – сила, що розтягує/стискає, прикладена до зразка, Н; $\bar{P}'$ – сила, що є результатом приведення $\bar{P}$ до центру перемички; $\bar{P}'_n$ – розтягуюча/стискаюча компонента $\bar{P}'$, Н; $\bar{P}'_\tau$ – зсувна компонента $\bar{P}'$, Н

Рисунок 3.2 – Схема навантаження зразка у перемичці:

Для нового способу справедливі такі гіпотези:

- залежності показників напруженого стану та виду напруженого стану від кута нахилу пропилів симетричні відносно 0° ;
- значення показників для одного з видів випробувань на зразках із кутом нахилу пропилів α більшим 90° дорівнюють значенням показників для іншого виду випробувань на зразках із кутом нахилу пропилів $180^\circ - \alpha$.

Таким чином, максимальні діапазони варіювання величин показників, при проведенні випробувань двох видів: розтягування та стиснення, досягаються зміною кута нахилу пропилів у межах від 0° до 90° . У випадку застосування випробування одного виду збільшення діапазонів досягається застосуванням зразків з кутом нахилу пропилів більше 90° , при цьому необхідно змінювати габаритні розміри зразка та геометрію пропилів для локалізації деформації у проточці.

3.2 Дослідження методу оцінки пластичності металу розтягуванням/стисненням спеціальних смуг на основі комп'ютерного моделювання

3.2.1 Матеріал дослідження

У відповідність з вище викладеним в якості варійованих факторів в дослідженні були прийняті: кут нахилу пропилів та вид випробування.

Випробування використовувалися двох типів:

- Розтягування;
- Стиснення.

Кути нахилу пропилів приймалися в діапазоні від 0° до 90° з кроком 15° .

У табл. 3.1 представлені прийняті рівні варіювання факторів. Комп'ютерне моделювання проводилося для всіх можливих комбінацій рівнів

варіювання. В якості досліджуваного матеріалу приймався алюмінієвий сплав Д16.

Таблиця 3.1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	Рівні варіювання						
	1	2	3	4	5	6	7
Кут нахилу пропилів, град	0	15	30	45	60	75	90
Вид випробування	розтяг	стиск	-	-	-	-	-

3.2.2 Комп'ютерне моделювання

Для визначення параметрів напружено-деформованого стану матеріалу зразків при випробуваннях було виконано комп'ютерне моделювання процесів у програмному комплексі.

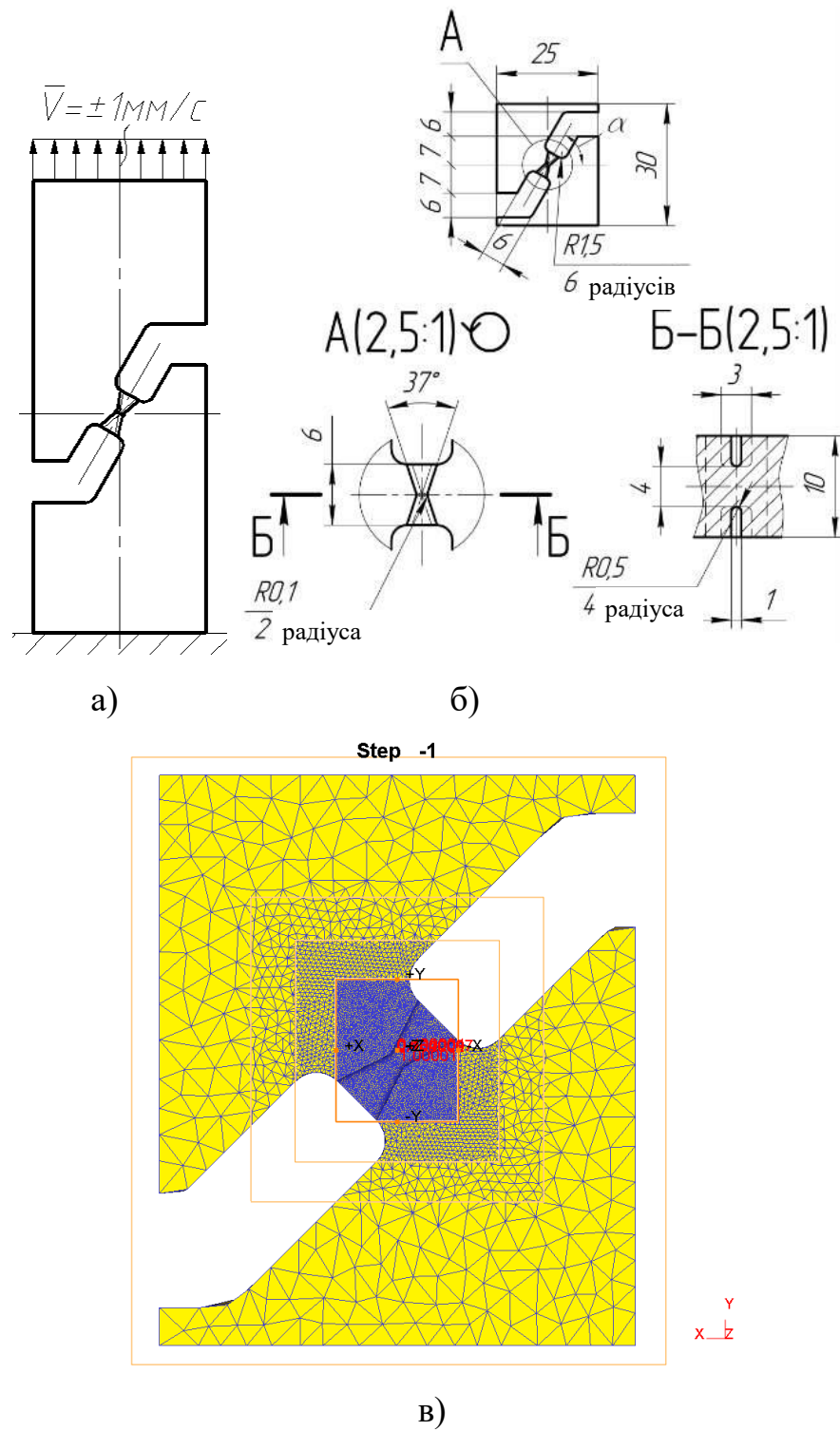
Прийняті в дослідженні розрахункова схема та геометричні розміри зразків представлені на рис. 3.3, а та 3.3, б; кути нахилу пропилов визначено у таблиці 3.1.

Моделювання виконувалося для половини задачі із завданням властивостей геометричної симетрії.

Для якісної побудови кінцево-елементної сітки (рис. 3.3, в) зі згущенням в області, що цікавить, застосовувалися вікна щільності з відносним розміром елементів – 0,064, 0,16 та 0,4.

Попередження виродження елементів сітки кінцевих елементів та якісного виконання розрахунку визначалося умовою: максимальне збільшення часу без перерозподілу сітки кінцевих елементів - 0,06 с.

Модель матеріалу заготовки – жорстков'язкопластична. Фізичні властивості, аналізованого суцільного середовища, були прийняті з розділу.



а – розрахункова схема; б - ескіз зразка; в – кінцево-елементна модель зразка

Рисунок 3.3 – Моделювання розтягування/стискання спеціальних смуг

Вихідними даними моделювання були параметри напружено-деформованого стану у місці виникнення руйнування, необхідні для визначення величин показників напруженого стану та виду напруженого стану у процесі формозміни. Місце та момент утворення руйнування визначалися засобами користувальницької підпрограми, аналогічної до підпрограми використаної в розділі в наступному вигляді:

```

C*****
C*****

      SUBROUTINE USRVAR(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,
      $  DAMG,RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,
      $  IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE,ROUTINE)

C*****
C*****
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER (I-N)
      CHARACTER*24 VNAME(95)
      DIMENSION RZ(3),STS(6),EPS(6),TSR(6),VAR1(95),VAR2(95),WEAR(5)

C
C  Branch to PROPER routine
C
      GO TO (10,20,30,40,50,60,70,80,90,100) ROUTINE

C
10  CALL USRPS1(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,DAMG,
      $  RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,
      $  IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE)
      RETURN

C
20  CALL USRPS2(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,DAMG,
      $  RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,
      $  IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE)
      RETURN

C
30  CALL USRPS3(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,DAMG,
      $  RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,

      $  IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE)
      RETURN

C
40  CALL USRPS4(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,DAMG,
      $  RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,
      $  IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE)
      RETURN

C
50  CALL USRPS5(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,DAMG,

```

```

ENDIF
C
C   Phase 2

C
  IF(INIT.EQ.1) THEN
    VAR2(1) = 0.D0
    VAR2(2) = 0.D0
    RETURN
  ENDIF
C
C   Phase 3
C
  IF(INIT.EQ.2) THEN
    DAM = 0.D0
    IF (EFSTS.LE.0.) GO TO 10
    sx = STS(1)
    sy = STS(2)
    sz = STS(3)
    txy = STS(4)
    tyz = STS(5)
    tzx = STS(6)
    r = -(sx+sy+sz)
    s = sx*sy+sy*sz+sz*sx-(txy*txy+tyz*tyz+tzx*txz)
    t = -(sx*sy*sz+2.D0*txy*tyz*txz)+sx*tyz*tyz+sy*txz*txz+sz*txy*txy
    p = (3.D0*s-r)/3.D0
    q = 2.D0*r*r/27.D0-r*s/3.D0+t
    D = (p/3.D0)*(p/3.D0)*(p/3.D0)+(q/2.D0)*(q/2.D0)
    IF (ABS(D).LE.0.D0) THEN
      IF (ABS(p).LE.0.D0.AND.ABS(q).LE.0.D0) THEN
        X(1) = 0.D0-r/3.D0
        X(2) = X(1)
        X(3) = X(1)
      ELSE
        u = (-q/2.D0)**(1.D0/3.D0)
        v = u
        X(1) = u+v-r/3.D0
        X(2) = -(u+v)/2.D0-r/3.D0
        X(3) = X(2)
      ENDIF
    ELSE
      rg = DSQRT(-p*p*p/27.D0)
      fi = ACOS(-q/(2.D0*rg))
      X(1) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(fi/3.D0)-r/3.D0
      X(2) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(fi/3.D0+2.D0*PI/3.D0)-r/3.D0

```

```

      X(3) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(f/3.D0+4.D0*PI/3.D0)-r/3.D0
ENDIF
s1 = X(1)
n1 = 1
s3 = X(1)
n3 = 1
DO 20 I = 2, 3
  IF(X(I).GT.s1) THEN
    n1 = I
    s1 = X(I)
  ENDIF
  IF(X(I).LT.s3) THEN
    n3 = I
    s3 = X(I)
  ENDIF
20 CONTINUE
DO 30 I = 1, 3
  IF(INE.n1.AND.INE.n3) THEN
    s2 = X(I)

    GOTO 40
  ENDIF
30 CONTINUE
40 VAR2(2) = TEPS
   dei = VAR2(2)-VAR1(2)
   h = (STS(1)+STS(2)+STS(3))/(3.D0*EFSTS)
   DAM = dei/(1.146D0*exp(-0.871D0*h)+0.031D0)
10 VAR2(1) = VAR1(1)+DAM
   ENDIF
C
   RETURN
   END
C
C *****
C
C   SUBROUTINE USRPS3(TNOW,DTMAX,RZ,TEMP,EFEPS,TEPS,EFSTS,
$   DAMG,RDTY,STS,EPS,TSR,WEAR,VAR1,VAR2,VNAME,ISTEP,INIT,
$   IOBJ,NUMNP,NUMEL,ICURNE)

C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER (I-N)
C   CHARACTER*24 VNAME(95)
C   DIMENSION RZ(3),STS(6),EPS(6),TSR(6),VAR1(95),VAR2(95),WEAR(5)
C   DIMENSION X(3)
C   DATA PI/3.1415926535898D0/
C   AMr=5B
C   Phase 1

```

```

C
IF(INIT.EQ.0) THEN
  VNAME(2) = 'Kolmogorov criterion'
  RETURN
ENDIF
C
C   Phase 2
C
IF(INIT.EQ.1) THEN
  VAR2(1) = 0.D0
  VAR2(2) = 0.D0
  RETURN
ENDIF
C
C   Phase 3
C
IF(INIT.EQ.2) THEN
  DAM = 0.D0
  IF (EFSTS.LE.0.) GO TO 10
  sx = STS(1)
  sy = STS(2)
  sz = STS(3)
  txy = STS(4)
  tyz = STS(5)
  tzx = STS(6)
  r = -(sx+sy+sz)
  s = sx*sy+sy*sz+sz*sx-(txy*txy+tyz*tyz+tzx*txz)
  t = -(sx*sy*sz+2.D0*txy*tyz*txz)+sx*tyz*tyz+sy*txz*txz+sz*txy*txy
  p = (3.D0*s-r)/3.D0
  q = 2.D0*r*r/27.D0-r*s/3.D0+t
  D = (p/3.D0)*(p/3.D0)*(p/3.D0)+(q/2.D0)*(q/2.D0)
  IF (ABS(D).LE.0.D0) THEN
    IF (ABS(p).LE.0.D0.AND.ABS(q).LE.0.D0) THEN
      X(1) = 0.D0-r/3.D0
      X(2) = X(1)
      X(3) = X(1)
    ELSE
      u = (-q/2.D0)**(1.D0/3.D0)
      v = u
      X(1) = u+v-r/3.D0
      X(2) = -(u+v)/2.D0-r/3.D0
      X(3) = X(2)
    ENDIF
  ELSE
    X(1) = X(1)
  ENDIF

```

```

rg = DSQRT(-p*p/27.D0)
fi = ACOS(-q/(2.D0*rg))
X(1) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(fi/3.D0)-r/3.D0
X(2) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(fi/3.D0+2.D0*PI/3.D0)-r/3.D0
X(3) = 2.D0*(rg)**(1.D0/3.D0)*COS(fi/3.D0+4.D0*PI/3.D0)-r/3.D0
ENDIF
s1 = X(1)
n1 = 1
s3 = X(1)
n3 = 1
DO 20 I = 2, 3
  IF(X(I).GT.s1) THEN
    n1 = I
    s1 = X(I)
  ENDIF
  IF(X(I).LT.s3) THEN
    n3 = I
    s3 = X(I)
  ENDIF
20 CONTINUE
DO 30 I = 1, 3
  IF(I.NE.n1.AND.I.NE.n3) THEN
    s2 = X(I)
    GOTO 40
  ENDIF
30 CONTINUE
40 VAR2(2) = TEPS
dei = VAR2(2)-VAR1(2)
h = (STS(1)+STS(2)+STS(3))/(3.D0*EFSTS)
DAM = dei/(0.855D0*exp(-0.908D0*h)+0.06D0)
10 VAR2(1) = VAR1(1)+DAM
ENDIF
C
RETURN
END
C
C *****

```

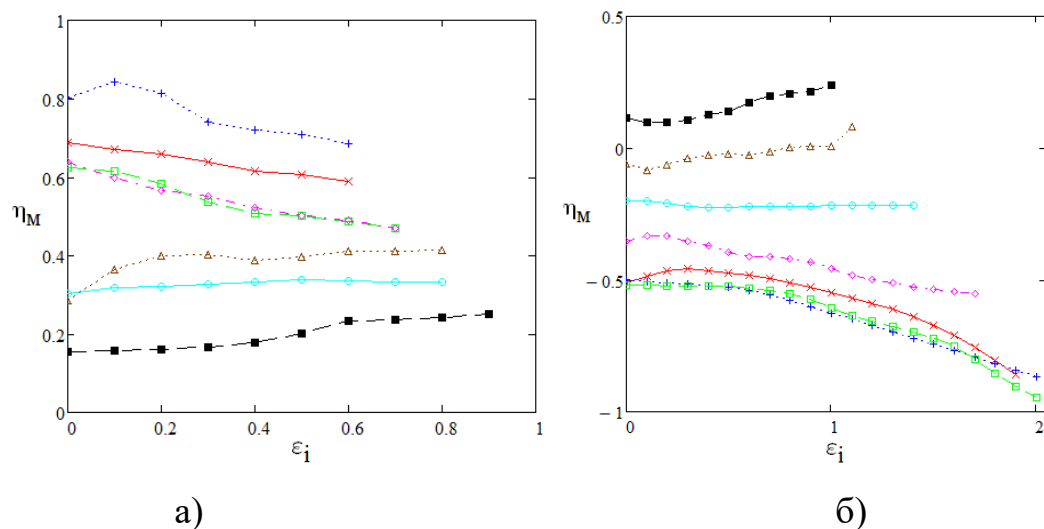
Місця ініціювання руйнування призначалися як трасовані точки, в яких здійснювалося визначення вихідних параметрів, із записом в окремий файл для наступної математичної обробки. Як уже згадувалося, спеціальні смуги мають перемичку ослаблену проточками, внаслідок чого руйнування в усіх випробуваннях відбувалося в центрі перемички.

3.2.3 Математична обробка результатів моделювання

Математична обробка результатів моделювання проводилася в програмі математичної обробки даних. При обробці було визначено функції величин показників напруженого стану η_M та виду напруженого стану χ_M у місці виникнення руйнування у процесі формозміни, отримані результати у вигляді графіків представлені на рис. 3.4 та 3.5. З яких видно, що в ході деформування показники напруженого стану та виду напруженого стану змінюються. Подальшу обробку проводили для середніх величин показників η_Φ і χ_Φ , що визначаються виразами

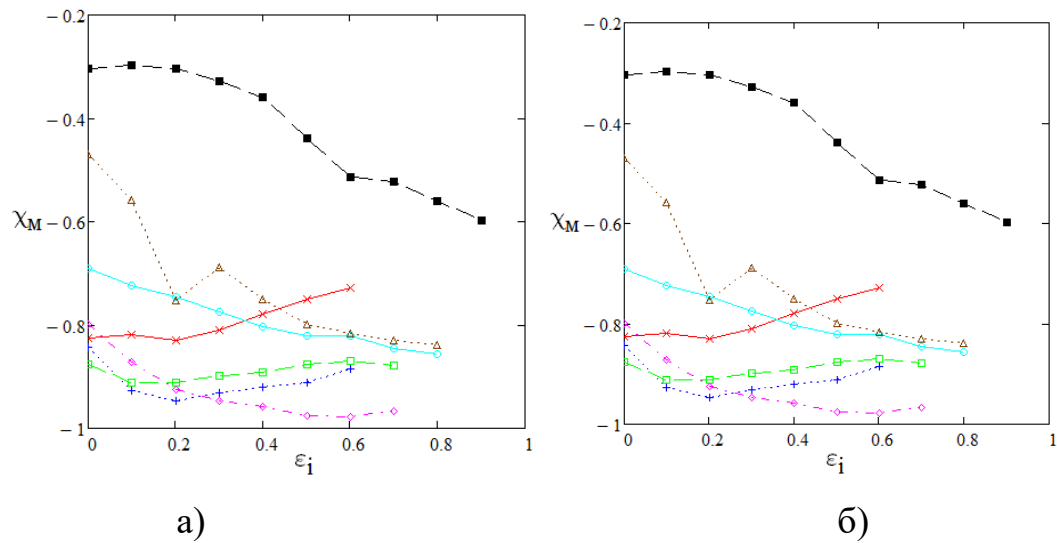
$$\eta_\Phi = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \eta_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}, \quad \chi_\Phi = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \chi_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}. \quad (3.1)$$

У табл. 3.2 представлений план повнофакторного чисельного експерименту з результатами.



а – розтяг; б – стиск; × × × - 0°; + + + - 15°; □ □ □ - 30°; ◇ ◇ ◇ - 45°; о о о - 60°;
Δ Δ Δ - 75°; ■ ■ ■ - 90°

Рисунок 3.4 – Величини показника напруженого стану на місці виникнення руйнування, отримані з чисельних експериментів



а – розтяг; б – стиск; $\times \times \times$ - 0° ; $+++$ - 15° ; $\square \square \square$ - 30° ; $\diamond \diamond \diamond$ - 45° ; ooo - 60° ;
 $\Delta \Delta \Delta$ - 75° ; $\blacksquare \blacksquare \blacksquare$ - 90°

Рисунок 3.5 – Величини показників виду напруженого стану на місці виникнення руйнування, отримані з чисельних експериментів

Положення результатів чисельних експериментів щодо області визначення процесів із плоским напруженим станом у просторі показників напруженого стану та виду напруженого стану, представлено рис. 3.6.

Для виявлення залежностей показників напруженого стану та виду напруженого стану в місці і в момент руйнування від варійованих факторів була застосована вбудована функція програми математичної обробки даних кускової апроксимації поліномами другого ступеня [19]. При визначенні регресійних функцій також враховувалися гіпотези розділу. Отримані результати у вигляді графіків представлені рис. 3.7. Коефіцієнт кореляції Пірсона результатів моделювання та апроксимуючих функцій для показників напруженого стану та виду напруженого стану при стиску склав відповідно 97,995% і 92,334%; при розтягуванні – 91,091% та 91,14%.

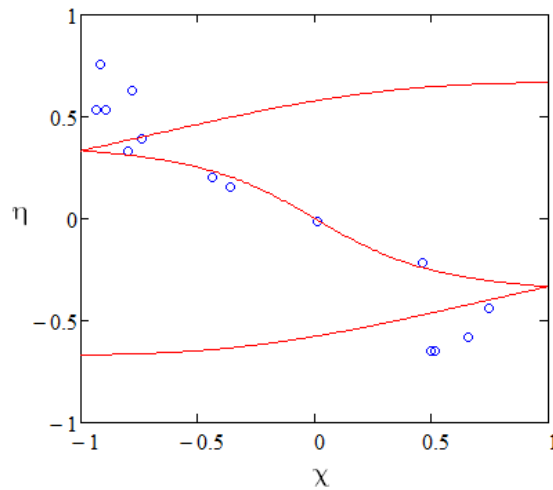
Таблиця 3.2 - План повнофакторного чисельного експерименту

№ досліду	Рівень фактора		Результати моделювання	
	α , град	Вид випробування	η_f	χ_f
1	0	стиск	-0,579	0,658
2	15	стиск	-0,648	0,512
3	30	стиск	-0,648	0,495
4	45	стиск	-0,44	0,746
5	60	стиск	-0,216	0,46
6	75	стиск	-0,011	0,015
7	90	стиск	0,155	-0,359
8	0	розтяг	0,631	-0,784
9	15	розтяг	0,76	-0,917
10	30	розтяг	0,535	-0,891
11	45	розтяг	0,535	-0,937
12	60	розтяг	0,329	-0,796
13	75	розтяг	0,329	-0,737
14	90	розтяг	0,202	-0,436

3.2.4 Аналіз результатів

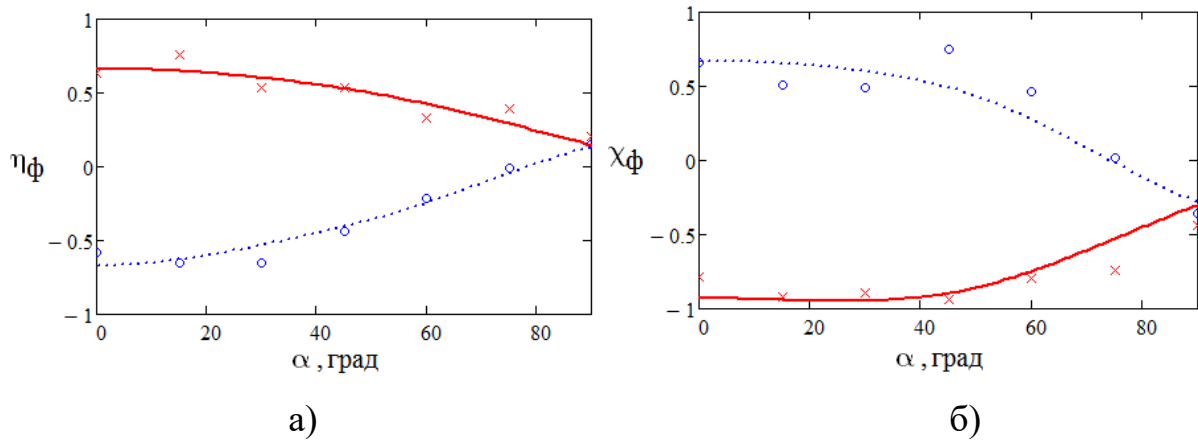
Підсумовуючи дослідження слід зазначити таке:

1) Отримані з моделювання результати свідчать про те, що знову запропонований спосіб є ефективним методом дослідження пластичності листових металів, що мають широкі діапазони зміни показників напруженого стану та виду напруженого стану, які включають як позитивні, так і негативні



— - (2.36); o o o – результати моделювання

Рисунок 3.6 – Положення результатів експериментів



а – показника напруженого стану; б – показника виду напруженого стану:
 × × × і — — результати моделювання та апроксимуюча функція випробувань на
 розтяг; o o o і ··· — результати моделювання та апроксимуюча функція
 випробувань на стиск

Рисунок 3.7 – Залежності величин показників у місці та в момент руйнування
 від кута нахилу пропилів

величини, на випробувальному обладнанні одного виду та не вимагають застосування спеціалізованих пристроїв: для алюмінієвого сплаву Д16 діапазони показників відповідно рівні – $-0,648...0,76$ та $-0,917...0,746$.

2) Новий спосіб дослідження пластичності металів є найбільш придатним для аналізу процесів листового штампування, оскільки не вимагає застосування зразків, виготовлених із прутка.

3) Зіставлення області визначення процесів із плоским напруженим станом та результатами чисельних експериментів, підтверджує, що часто новий спосіб приблизно може застосовуватися для дослідження пластичності в процесах із плоским напруженим станом.

4) Спільне застосування нового способу оцінки пластичності металу та методики побудови кривих зміцнення листових матеріалів за допомогою дослідів на поздовжній стиск [20] дозволяє отримувати необхідний комплекс характеристик для точного аналізу процесів холодного листового штампування на стадії проектування за допомогою комп'ютерного моделювання.

4 ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПРИ РІШЕННІ ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

4.1 Удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування

Вироби конічно-циліндричної форми з конструкційних алюмінієвих сплавів широко застосовують у різних галузях промисловості, особливо в авіабудуванні. Для виробництва складних осесиметричних деталей, що поєднують у собі конічні та циліндричні ділянки змінної товщини зазвичай використовується багатоперехідне штампування на пресах. В залежності від складності форми конічно-циліндричної деталі число операцій штампування може досягати 10 і більше, а якщо врахувати, що кожна операція обробки тиском вимагає допоміжних операцій: мастило, відпал, травлення, то виробничий цикл таких виробів дуже тривалий та енерговитратний.

Ротаційна витяжка є процесом обробки металів тиском з локальним прикладанням деформуючого зусилля, при якій частка стискаючих напружень значно вище, ніж при звичайній витяжці у жорстких штампах тобто дає можливість отримати великі кінцеві деформації, а відповідно скоротити кількість основних та допоміжних операцій. Ротаційна витяжка залежить від правильного вибору режиму обробки, параметрів інструменту, механічних властивостей оброблюваного матеріалу та умов обробки, що визначає необхідність експериментального відпрацювання технологічного процесу для кожної деталі певної форми та розмірів. У той же час у процесі ротаційної витяжки можливе утворення «напливу» металу, втрата стійкості фланця, «лущення» або розрив заготовки, тобто дефектів що перешкоджають отриманню якісних деталей, у зв'язку з чим особливе значення набуває встановлення причин цих дефектів та з'ясування можливості їх усунення чи зниження рівня впливу.

Тому вивчення та накопичення експериментальних даних про вплив технологічних факторів на енергосилові параметри, аналіз точності та якості оброблюваних деталей для розробки раціональних техпроцесів на основі операцій ротаційної витяжки при виробництві складних конічно-циліндричних деталей із конструкційних алюмінієвих сплавів є актуальним завданням.

Тому необхідна розробка та дослідження технології виробництва осесиметричних конічних виробів з конструкційних алюмінієвих сплавів типу АМгбМ, на основі ротаційної витяжки, замість багатоперехідного процесу штампування виробів на пресах.

Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- визначення здатності листових конструкційних алюмінієвих сплавів до ротаційної витяжки проєцируванням;
- аналіз умов руйнування виробів при ротаційній витяжці та обґрунтування необхідного числа переходів;
- дослідження якості одержуваних виробів та вплив на якість різних факторів процесу;
- визначення раціональних розмірів та форми заготовки;
- теоретичне та експериментальне визначення енергосилових параметрів ротаційної витяжки з урахуванням особливостей процесу;
- обґрунтування характерних особливостей процесу ротаційної формозміни деталі «воронка» та підбір на їх основі спеціалізованого обладнання для ротаційної витяжки;
- розробка нової технології одержання виробів на основі ротаційної витяжки.

Це вимагає розробки методики визначення типу та кількості операцій витяжки деталі «воронка» на основі оцінки ступеня використання ресурсу пластичності для різних варіантів технології ротаційної витяжки виробу; виявлення закономірностей виникнення дефектів та встановленню факту, що дефекти виникають не в осередку деформації під інструментом, а на кінці уже продеформованої ділянки, які виникають під дією осьових напружень розтягу;

заготовку під ротаційну витяжку нової – конусоподібної форми. При вирубуванні заготовки вона одночасно формується з кутом конусності $\beta=80^0...85^0$, що знижує осьову складову зусилля деформації; розробки алгоритму розрахунку складових зусилля деформування з урахуванням особливостей протікання процесу: режим переутоніння та конусності заготовки, на моделі що імітує ротаційну витяжку, як простий зсув концентричного циліндра нескінченно малої товщини, роликом з радіусом округлення умовно рівним нулю, коли виконується рівність роботи внутрішніх сил та роботи зовнішніх сил; розробки технології прискореного відпалу заготовок із важко деформованих алюмінієвих сплавів з одночасним нанесенням підмастильного покриття на заготовку у спеціальному середовищі, що є розплавами солей хлоридів металів.

З урахуванням існуючих досліджень сформовані наступні рекомендації щодо використання технологічних процесів ротаційної витяжки при виробництві складних осесиметричних виробів із конструкційних алюмінієвих сплавів:

1) Експериментальні дослідження отримання складних осесиметричних деталей типу «воронка» з алюмінієвих сплавів АДІМ та АМгбМ проводяться у двох режимах: ротаційної витяжки проєкціюванням (за законом синуса) та ротаційної витяжки із потоншенням із визначення граничної деформації для кожного режиму.

2) Аналітичні та графічні залежності для визначення складових зусилля ротаційної витяжки проєкціюванням, а також величини потужності та крутного моменту на валу шпинделя можуть бути використані при проведенні розрахунків, пов'язаних із проєктуванням та вибором відповідного технологічного обладнання;

3) Дослідно-промислові дослідження двох варіантів технології виробництва деталі «воронка» з використанням операцій ротаційної формозміни містять: перший варіант включає - три операції ротаційної витяжки на токарно-гідрокопіювальному напівавтоматі та одну операцію глибокої

витяжки на пресі; другий варіант - складається з двох операцій ротаційної витяжки та однієї операції глибокої витяжки, які виконуються на тому ж устаткуванні. Для кожного варіанта необхідно визначити розмірні характеристики та калібрування інструменту по переходам. Вихід придатного в першому варіанті становить 95%, у другому варіанті 72%. Поява дефектів у 95% випадків відбувається на першій операції ротаційної витяжки;

4) Використання попередньо відформованої конусоподібної заготовки з кутом конусності $\beta=80^0 \dots 85^0$ помітно (14%) знижує осьову складову зусилля, призводить до зниження браку;

5) На основі операцій ротаційної витяжки та міжопераційної та прискореної термообробки заготовки в сольовому розплаві хлоридів $ZnCl_2$, KCl , $NaCl$ технологія виробництва деталей типу «воронка» з конструкційного алюмінієвого сплаву $AM_{Г6}M$.

Серед застосовуваних технологій виготовлення осесиметричних деталей процесами обробки металів тиском найбільш поширеними способами виготовлення порожнистих деталей конічної та конічно-циліндричної форми слід вважати багатоопераційне штампування, видавлювання та ротаційну витяжку.

Одним із перспективних напрямів вдосконалення технології отримання порожнистих деталей осесиметричної форми є автоматизована ротаційна витяжка. Цей процес має переваги перед іншими операціями обробки тиском, як у технологічному, так і в економічному плані.

Удосконаленню процесів отримання порожнистих виробів на основі ротаційної витяжки присвячено досить багато робіт [17, 19, 20].

Однак, труднощі у правильній оцінці силових параметрів позначаються на масштабах використання процесу ротаційної витяжки для виробництва високоточних виробів. Розробка та впровадження технологічних процесів ротаційної витяжки складних осесиметричних деталей зустрічає практичні ускладнення і часто стримується, поступаючись місцем менш раціональним процесам механічної обробки.

Опираючись на літературні та довідкові характеристики технологічних та механічних властивостей конструкційних алюмінієвих сплавів демонструє, що сплав АМг6 завдяки технологічним властивостям широко застосовується в якості конструкційного деформованого матеріалу у різних галузях промисловості, має достатню міцність для алюмінієвих сплавів, однак, сплав АМг6 має низьку пластичність, підвищену схильність до налипання (схоплювання) на інструмент; при цьому обробка тиском сплаву вимагає застосування спеціального мастила і підмастильних покриттів. Тому сплав АМг6 як і низку інших в повній мірі можна віднести до розряду важкодеформуємих матеріалів.

Метою досліджень має стати розробка технології виготовлення деталей складної форми із застосуванням обладнання для ротаційної витяжки з відповідними дослідженнями всіх стадій виробничого процесу, враховуючи особливості технологічних та механічних властивостей алюмінієвого сплаву АМг6.

Необхідна розробка варіантів технології виробництва осесиметричної деталі типу «воронка» з конструкційного алюмінієвого сплаву АМг6 на основі процесів ротаційної витяжки замість багатоопераційної штампування на пресах.

Для дослідження необхідні розміри та конструктивні особливості деталі «воронка», поверхні виробу, які мають бути утворені в результаті здійснення операцій пластичного деформування. Виріб «воронка» повною мірою відноситься до виробів складної форми, що складається з трьох основних ділянок:

- малої циліндричної ділянки: із зовнішньою бічною поверхнею; з внутрішньою бічною поверхнею; торцевою поверхнею; зовнішньою та внутрішньою поверхнями радіальної перемички;
- конічної ділянки із зовнішньою поверхнею та внутрішньою;
- великої циліндричної ділянки із зовнішньою поверхнею, внутрішньою та торцевою.

Спочатку деталь «воронка» виготовлялася багато перехідним штампуванням із загальною тривалістю 4,41 хв.

Виробництво малої циліндричної ділянки ротаційною витяжкою недоцільно, тому процес його штампування залишається без змін.

Ключовим питанням будь-якої технології обробки металів тиском є визначення необхідної кількості операцій деформування, які визначають продуктивність, якість виробів (зокрема, відсоток браку по тріщинах, розривів і подібним дефектам), а також тип, кількість і енергосилові параметри необхідного технологічного обладнання, особливо штампового оснащення. Процес ротаційної витяжки проєкціюванням дає можливість реалізувати схему напруженого стану, при якій частка стискаючих напружень значно вища, ніж при звичайній витяжці у жорстких штампах і, відповідно, дає можливість отримати великі кінцеві деформації.

В основі експериментального дослідження використовується спосіб випробування граничних деформацій при ротаційній витяжці виробів конічної форми по методиці Кегга [21-25]. Згідно з цим способом випробування проводяться на напівеліпсоїдному патроні - оправці, який фактично є конічним патроном з безперервно змінним від 180° до 0° кутом при вершині. Відповідно до закону синуса, деталь, що видавлюється на цій оправці, повинна поступово змінюватися по товщині від початкового значення до нуля.

У роботах Кегга [25-30] також зазначалося, що режим перерозкочування дає можливість збільшити стискаючі напруження. Відповідно до сучасної теорії руйнування збільшення частки стискаючих напружень веде до збільшення пластичності металу. Однак режим перерозкочування обмежується можливою втратою стійкості фланця, а також появою додаткових розтягуючих напружень за роликом.

Це вимагає проєктування та виготовлення спеціальні оправки з відповідним профілем, що дозволяє здійснювати ротаційну витяжку виробів конічної та циліндричної форм, при отриманні виробів необхідно передбачити як режим проєктування (за законом синуса), так і режим перепотоншення.

Отримання конічних виробів ротаційною витяжкою проєкціюванням засноване на законі синуса, згідно з яким товщина стінки виробу в будь-якому перерізі

$$t = t_0 \sin \alpha,$$

де t_0 і t - товщина стінки виробу початкова і після обробки.

Можна сказати при

$$t < t_0 \sin \alpha$$

має місце перерозкочування, а при

$$t > t_0 \sin \alpha$$

недорозкочування.

Якщо потоншення (обтискання по стінці) виразити як:

$$l = \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot 100\%,$$

то потоншення зразка, отриманого ротаційною витяжкою на оправці, має поступово помінятися від 0 до 100%, причому в момент руйнування, виконується умова

$$t = t_p,$$

воно буде граничним:

$$l_{zp} = \frac{t_0 - t_p}{t_0} \cdot 100\%$$

Дослідні оправки з необхідним профілем наступні:

1 - траєкторія руху вершини ролика, тобто профіль виробу який задається копіром, де центр кривизни точка C_1 ;

2 - профіль оправки, відповідний ротаційній витяжці у нормальному режимі (за законом синуса), де центр сферичної поверхні точка C_2 ;

3 - профіль оправки, відповідний ротаційній витяжці в режимі недопотоншення, де центр сфери точка C_4 , причому $C_1 C_4 < C_1 C_2$;

4 - профіль оправки, відповідний ротаційній витяжці в режимі перепотоншення, де центр сфери точка C_3 , при цьому $C_1 C_3 > C_1 C_2$.

Для дослідження на здатність до ротаційної витяжки було взято конструкційні алюмінієві сплави наступних марок: АД1М, А1, А2, АМг6, Д16М, В95М. Сплави АД1М, А1, А2 легко піддаються холодній пластичній деформації, сплави АМг6М, Д16М відносяться до категорії важкодеформованих та їх штампування ведеться як правило з нагріванням, нарешті, високоміцний сплав В95М деформують тільки з нагріванням.

Для реалізації експериментальних досліджень, оправки, розроблених форм діаметром 105 мм (за законом синуса) і 125 мм для режиму перепотоншення, були встановлені на гідрокопіювальному напівавтоматі моделі 1722, на який також встановлювалася розкатна головка з одним формозмінювальним роликом. В якості зразків для випробувань служили плоскі кругові заготовки товщиною $t_0=4...6$ мм і діаметром $D_0=107$ мм. Заготовки вирубувалися з листового металу в штампі на кривошипному пресі. Здатність алюмінієвих сплавів до ротаційної витяжки в режимі переутоніння випробовували на двох сплавах: АД1М і АМг6М, але при цьому варіювали товщиною заготовки. Зокрема, зразки заготовки вирубувалися з листових матеріалів завтовшки 2; 4; 6; 8 міліметрів.

Порівнюючи процес ротаційної витяжки з добре вивченим процесом глибокої витяжки з потоншенням стінки, необхідно визначити коефіцієнт витяжки:

$$m = \frac{d}{D} = \frac{t}{t_0},$$

який у момент руйнування буде граничним:

$$m_{gp} = \frac{t_p}{t_0}$$

Отже, граничне утоніння виразимо як:

$$I_{gp} = (1 - m_{gp}) \times 100\% = (1 - \sin\alpha_{gp}) \times 100\%$$

На основі випробувань для конструкційних алюмінієвих сплавів визначено граничні характеристики деформування: ступінь обтиснення I_{gp} ,

коефіцієнт витяжки $m_{гр}$, кут конусності оправки $\alpha_{гр}$, які мають стати основою для вибору режимів деформування у реальних технологічних процесах

Встановлено, що граничні деформації при ротаційній витяжці циліндричних виробів вище, ніж при ротаційній витяжці конічних виробів, але ці зміни неоднакові і залежать від складу та марки алюмінієвого сплаву. Так для пластичних сплавів А1, А2 та АД1М збільшення становить не більше 2,5%; для крихких сплавів типу Д16М та В95М таке збільшення досягає 20-21%; для сплаву АМг6М збільшення граничних деформацій становить 9,3%, тобто сплав займає середнє становище з аналізованих. Збільшення граничних деформацій при витяжці циліндричних виробів пояснюється відсутністю додаткових напружень від вигину, який характерний при витяжці конічних деталей.

Для оцінки механічних властивостей матеріалів проводяться стандартні випробування зразків на розтягування за допомогою універсальної розривної машини, для кожного зразка записуються всі параметри деформації, зміряються відносне звуження шийки $\psi_{ш}$ та відносне подовження δ , зразка при розриві та порівнювалися з показниками при ротаційній витяжці.

З огляду на те, що відносне звуження шийки $\psi_{ш}$ краще характеризує пластичні властивості сплаву і легко визначається у виробничих умовах, будуються графічні залежності $l_{гр} = f(\psi_{ш})$ та $\alpha_{гр} = f(\psi_{ш})$. Існуючий ступінь обтиснення у реальному процесі ротаційної витяжки проєкціюванням не повинен дорівнювати граничному, для процесів листового штампування деформація на першій операції повинен бути на 15-20% менше гранично допустимого, отже приймається запас пластичності 20%, тобто можна виділити область допустимих деформацій.

Здатність алюмінієвих сплавів до ротаційної витяжки в режимі перепотоншення визначаються за допомогою тих самих показників, що і в режимі проєкціювання. Для порівняння двох цих режимів було запроваджується новий показник - коефіцієнт переутоніння

$$f = \frac{t_p}{t'_p}$$

де t'_p - товщина заготовки в момент руйнування при витяжці з перепотоншенням;

t_p - товщина заготовки в момент руйнування при витяжки в режимі проєкціювання.

На підставі випробувань визначення граничних деформацій при ротаційній витяжці з переутоншенням можна зробити такі висновки:

- тонколистові ($t_0 = 2\text{мм}$) алюмінієві сплави, при ротаційній витяжці з перепотоншенням, втрачають стійкість з появою дефектів, що пояснюється виникненням додаткових стискаючих напружень, що діють на фланці в тангенціальному напрямку, внаслідок чого на поверхні фланця утворюються складки;

- товстолистові ($t_0=2\ldots 4\text{мм}$) алюмінієві сплави можна деформувати з деяким перепотоншенням, причому малопластичний сплав АМг6М допускає більше перепотоншення ($f=1,18\ldots 1,25$), ніж пластичний сплав АД1М у якого значення ($f=1,12\ldots 1,18$).

Деталь «воронка», у якої вихідною заготовкою служили кола зі сплаву АМг6М діаметром 107 мм та товщиною 6 мм з наступними прийнятими характеристиками: гранична ступінь обтиснення $l_{гр} = 64,7\%$. Коефіцієнт перепотоншення лежить у діапазоні $f = 1,1 \ldots 1,2$, приймаємо $f = 1,15$, з урахуванням його $l_{гр} = 74,2\%$. Однак, у практиці розрахунку процесів листового штампування зручніше користуватися таким показником, як коефіцієнт витяжки, який пов'язаний із граничним ступенем обтиснення залежністю, тобто. $m_{гр} = 0,258$. Цей гранично допустимий коефіцієнт витяжки (до першої термообробки) буде основним вихідним параметром для розрахунку числа операцій ротаційної витяжки.

Іншою умовою, що впливає на величину деформації на кожній операції і саме число операцій, і те, що необхідний коефіцієнт витяжки

$$m_n = \frac{t_n}{t_0} = \frac{1,0}{6,0} = 0,167,$$

котрий менше граничного, відповідно, необхідний ступінь обтиску більше гранично допустимою. Отже, для отримання виробу «воронка» необхідно здійснювати мінімум дві операції ротаційної витяжки, між якими має бути передбачена термічна обробка напівфабрикатів з метою відновлення пластичних властивостей металу.

Технологія виготовлення деталі «воронка» полягає в наступному:

- 1) вирубування кругової заготовки на пресі;
- 2) ротаційна витяжка на верстатах (не менше двох операцій);
- 3) витяжка крайової частини на пресі (1+2 операції);
- 4) видавлювання на пресі внутрішньої поверхні малої циліндричної ділянки (одна операція);
- 5) калібрування на пресі, щоб одержати остаточні розміри;
- 6) підрізування торців.

На основі теорії руйнування, можливість деформування того чи іншого сплаву без руйнування може бути оцінена ψ - ступенем використання ресурсу пластичності.

Ротаційна витяжка поєднує в собі велику кількість різноманітних операцій (рис. 4.1).

Під час процесу ротаційної витяжки в місці контакту деформуючого ролика і деталі утворюється осередок деформування, який розглядається як фрагмент оболонки (рис. 4.2, а). До геометричних параметрів осередку деформації відносяться конфігурація заготовки, геометрія деформуючого ролика. Кутом захвата δ , висота C в перетині максимальної деформації, довжина H і ширина B також є характеристиками осередку деформації (рис. 4.2, б).

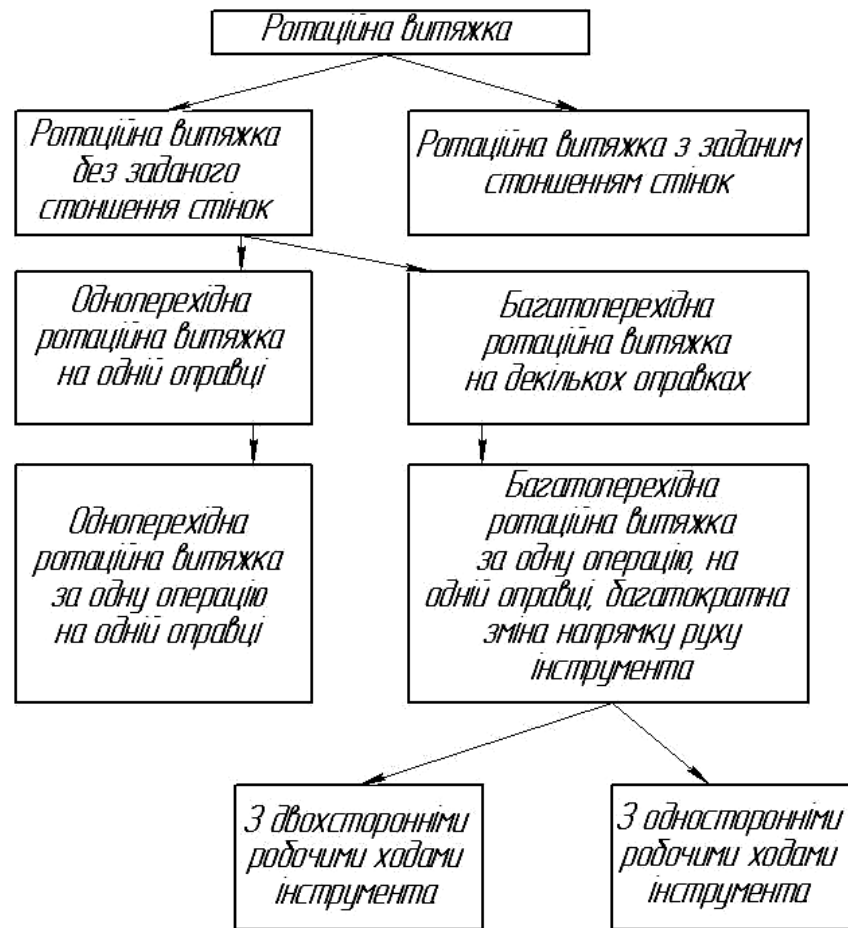
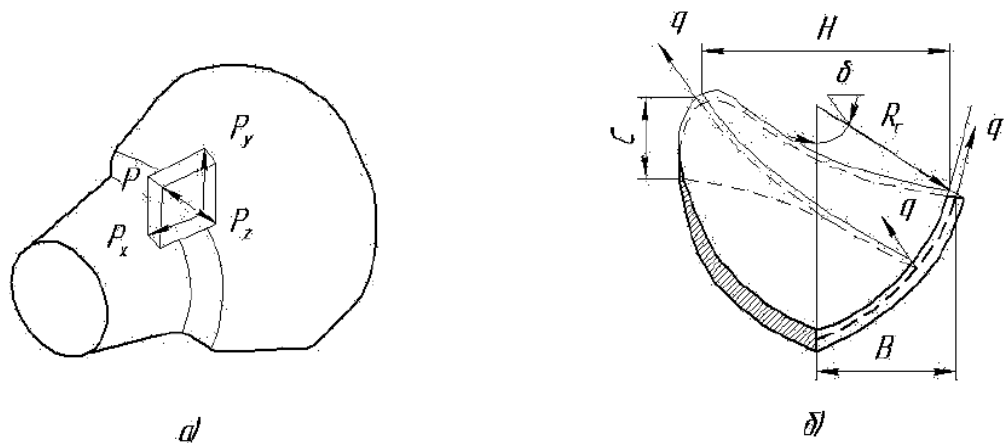


Рисунок 4.1 - Класифікація процесів ротаційної витяжки



а) положення осередку відносно напрямку дії сил; б) геометричні параметри осередку

Рисунок 4.2 - Геометричні параметри осередку деформації

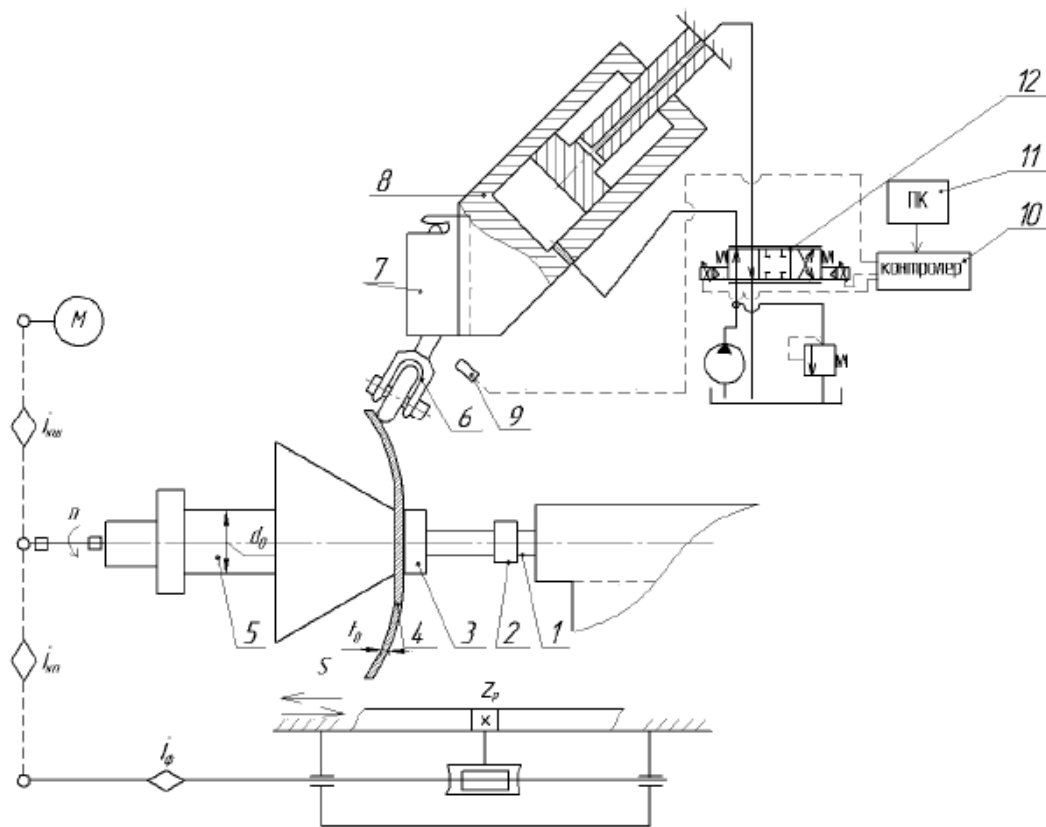


Рисунок 4.3 - Структурна схема установки з гідравлічним приводом та електрогідравлічним розподільником

Автоматизована багатоперехідна ротаційна витяжки здійснюється з використанням базового верстату оснащеного електрогідравлічним приводом з контролером. Інформацію з персонального компютера перетворюється контролером на сигнал керування золотником гідравлічного розподільника.

Функція гідравлічного розподільника полягає у керуванні рухом інструменту згідно програми по заданій траєкторії та величиною деформуючої сили. Структурна схема установки наведена на рис. 4.3.

Ротаційна витяжка оболонок виконується рухом інструменту, що відповідає заданому радіусу кривизни робочої поверхні. Рух інструменту здійснюється по траєкторіях, показаних на рис. 4.4.

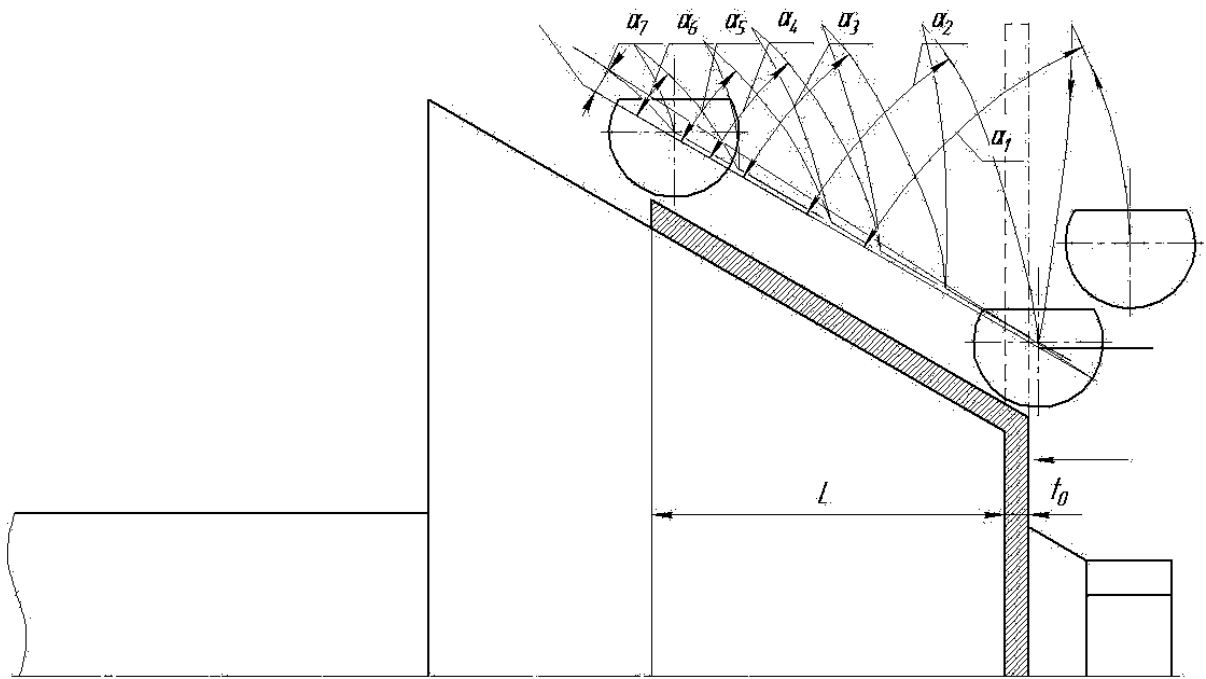


Рисунок 4.4 - Траєкторії руху інструменту під час формування деталі ротаційною витяжкою

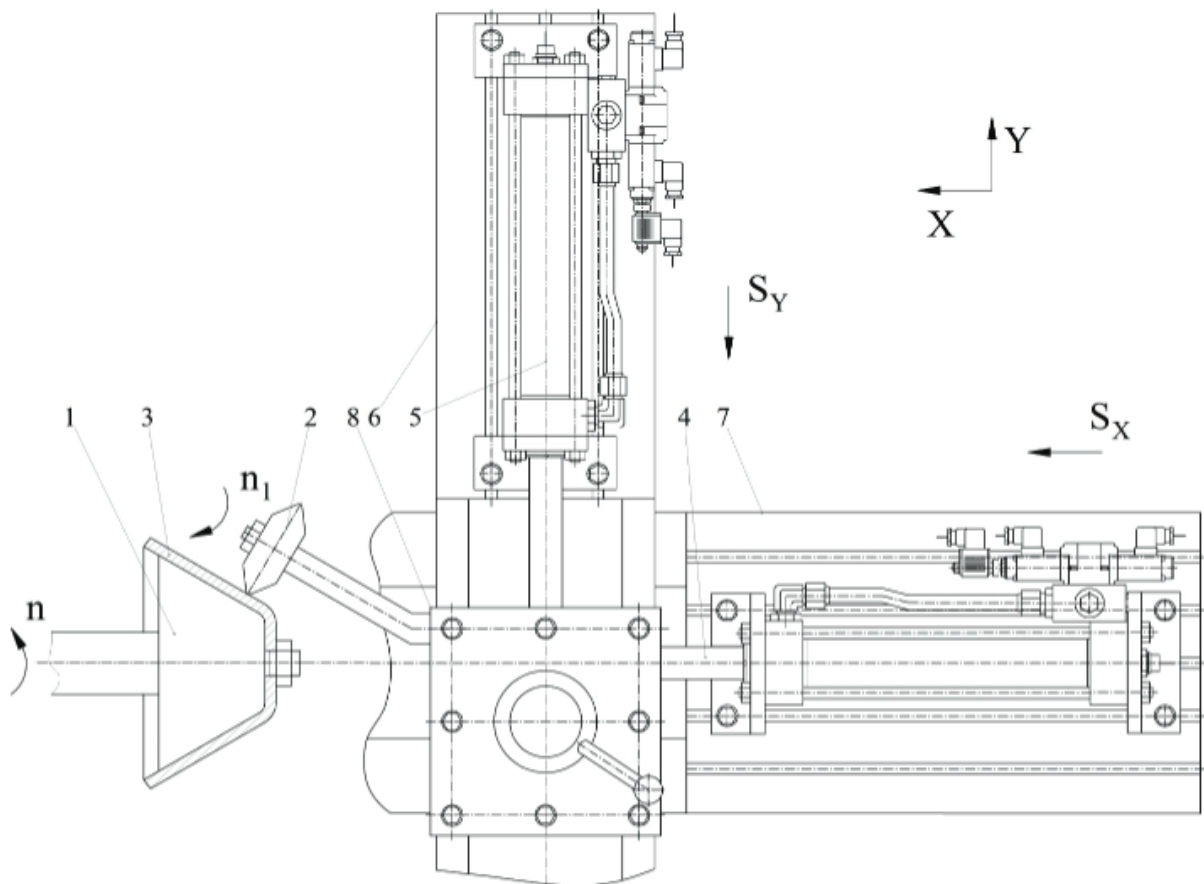


Рисунок 4.5 - Схема виготовлення деталі ротаційною витяжкою за допомогою пристрою з мехатронним приводом

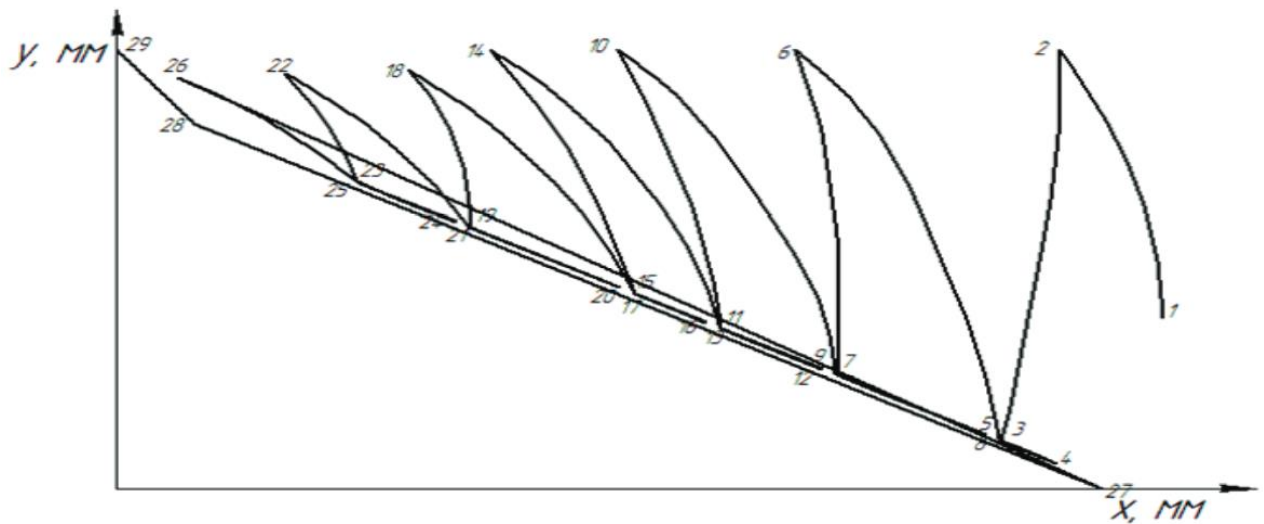


Рисунок 4.6 – Траєкторія руху ролика згідно функції $Y = f(x)$

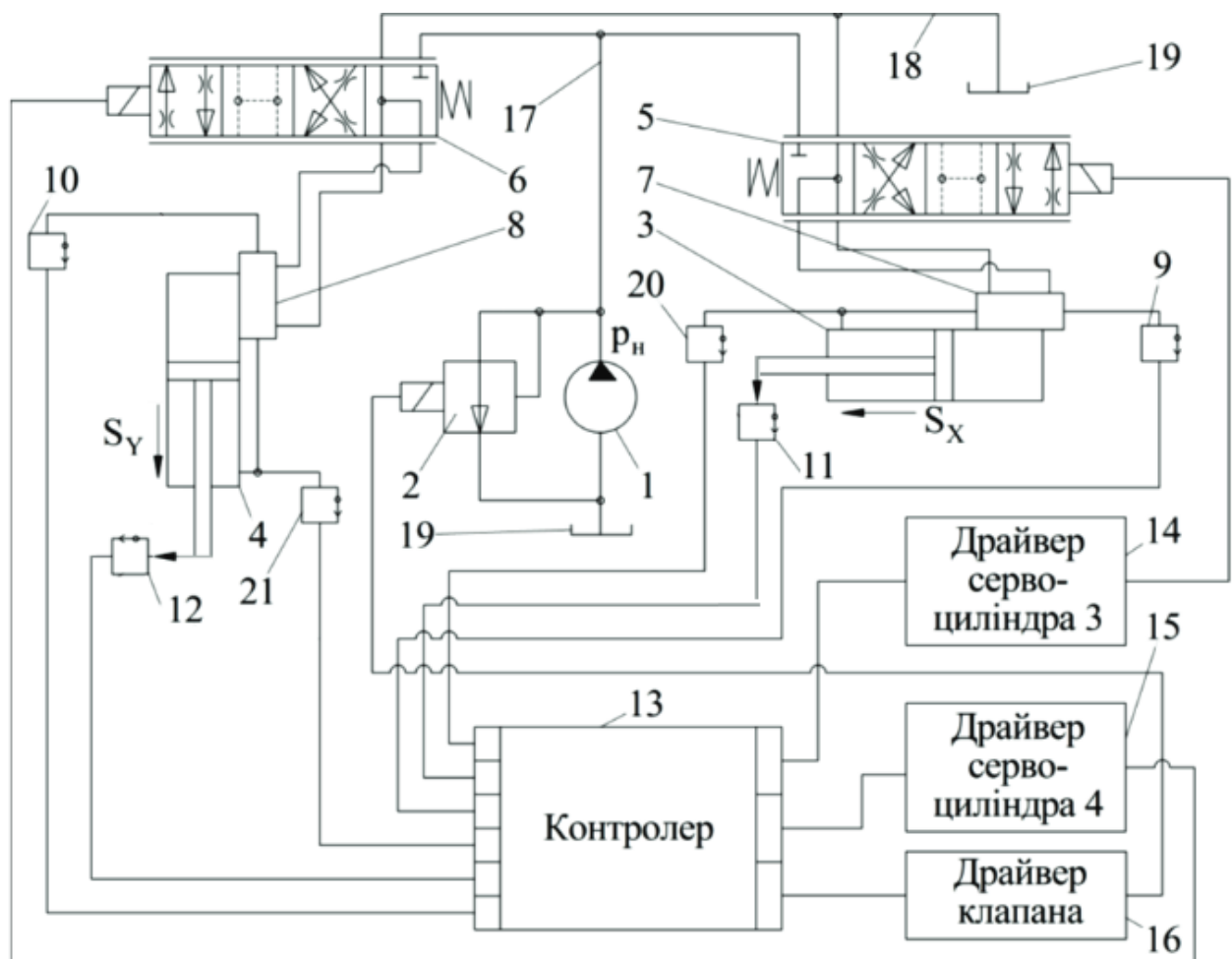


Рисунок 4.7 - Система керування мехатронним приводом

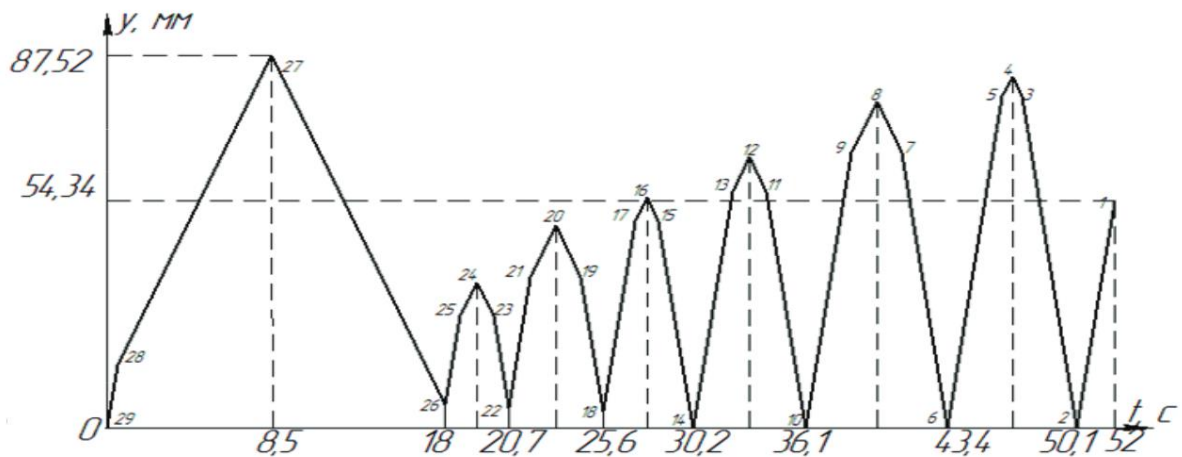


Рисунок 4.8 – Залежність координати y від часу обробки t

Схема виготовлення деталі методом ротаційної витяжки за допомогою пристрою з мехатронним приводом змонтованим на токарному верстаті показана на рис. 4.5. Траєкторія руху ролика між точками 1—29 забезпечується комбінацією подач SX та SY (рис. 4.6) з можливістю комбінування швидких та робочих переміщень. На рис. 4.7 показана схема системи керування мехатронним приводом пристрою.

Одним із етапів циклу обробки деталі є виведення штоків сервоциліндрів на початкову позицію з певними координатами та забезпечення в подальшому необхідної траєкторії. (рис. 4.8).

Залежність сили P , що діє на заготовку і забезпечує деформування без втрати стійкості і без руйнування при обкочуванні, від відстані u радіальному напрямку від центра осі обертання заготовки до певної точки поверхні після пластичного деформування r для прийнятої траєкторії руху інструменту показана на рис. 4.9.

Ротаційна витяжка є високоефективним технологічним процесом, що дозволяє з найпростіших заготовок отримувати деталі складної форми, без застосування багатоперехідної витяжки на пресах, зварювання та механічної обробки, що забезпечує скорочення зварних з'єднань в деталях, високу точність деталей та клас шорсткості поверхні, підвищені характеристики міцності,

збільшення коефіцієнта використання матеріалу, зниження трудомісткості та вартості оснастки тощо.

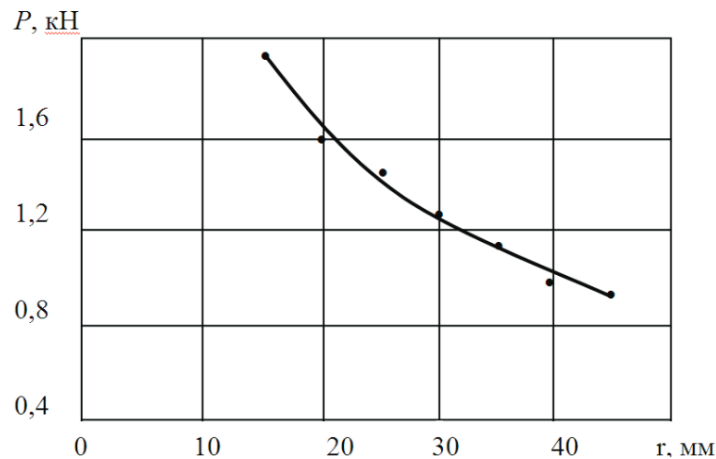


Рисунок 4.9 - Залежність сили формозмінення P заготовки від радіусу $г$ точки поверхні заготовки

Ротаційна витяжка знайшла широке застосування у різних сферах промисловості: виробництво деталей спеціальної техніки, корпусів прожекторів, екранів ламп тощо; але специфікою процесу є не висока продуктивність, через що застосування ротаційної витяжки найбільш доцільно в одиничному та дрібносерійному виробництві відповідальних виробів. У зв'язку з цим очевидна необхідність у наявності надійного теоретичного апарату, що дозволяє оцінювати граничне деформування ще на стадії розробки технологічного процесу. Це дозволить уникнути доопрацювання або виготовлення нового технологічного оснащення, звести до мінімуму кількість пробних прокаток дослідних деталей, і, отже, знизити собівартість та збільшити конкурентоспроможність одержуваної продукції.

В даний час для оцінки граничного деформування при ротаційній витяжці використовується гранична величина відносного обтиснення матеріалу, що не враховує важливі параметри процесу, що впливає на ступінь використання ресурсу пластичності.

Таким чином, метою підрозділу було вдосконалення процесу ротаційної витяжки на основі оцінки граничного деформування за допомогою теоретичної моделі

$$\Psi = c_{31_7} \int_0^t \cos^2(c_{31_4}\chi + c_{31_5}) e^{c_{122_25}\eta \frac{\tau_{13}}{\sigma_i} \varepsilon_i} d\varepsilon_i, \quad (4.1)$$

де $c_{31_7} = c_{122_24} c_{31_4}$ – коефіцієнт
на прикладі дослідної деталі.

4.2 Матеріал дослідження

У дослідженні в якості дослідної була прийнята деталь типу "Конус", зображена на рис. 4.1, оскільки конічні деталі нині знайшли широке поширення при виробництві виробів у різних галузях промисловості – горловини, обтічники, корпуси, воронки, перехідні конуси тощо.

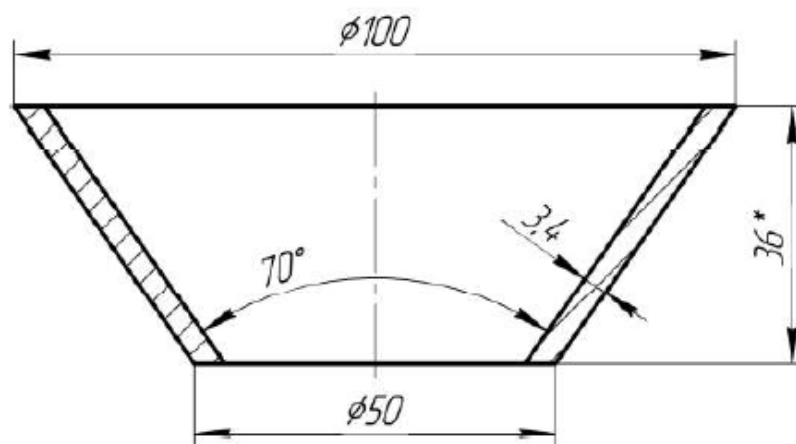


Рисунок 4.1 – Дослідна деталь

Початковий матеріал – лист алюмінієвого сплаву АМгб, підданий для забезпечення максимальної пластичності високому відпалу по режиму, наведеному в підрозділі. Також з підрозділу було прийнято опір деформації матеріалу та коефіцієнти, що входять у модель (4.1).

4.3 Теоретичний розрахунок

Розрахунок технологічної схеми формоутворення деталі методом ротаційної витяжки було здійснено відповідно "закону синуса", по якому номінальна товщина вихідної заготовки s_0 визначена як:

$$s_0 = s / \sin(\alpha) s_0 = 3,4 / \sin(35^\circ) = 6 \text{ мм}, \quad (4.2)$$

де s – товщина деталі, мм;

α – кут між твірною деталлю та віссю обертання, град:

$$\alpha = \frac{70}{2} = 35^\circ. \quad (4.3)$$

В якості вихідної була прийнята заготовка у вигляді плоского диска з технологічним центровим отвором, вирізана з листа. Діаметр заготовки $D_{\text{заг}}$ дорівнює:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{max}} + 2\Pi = 100 + 2 \cdot 15 = 130 \text{ мм}, \quad (4.4)$$

де D_{max} - максимальний зовнішній діаметр деталі, мм;

Π – односторонній технологічний припуск на фланець має бути не менше 15 мм і, виходячи з умови забезпечення необхідної жорсткості оброблюваної заготовки в кінці процесу, визначається співвідношенням:

$$\Pi \geq (3 \dots 4) s = (3 \dots 4) 3,4 = 10,2 \dots 13,6 \text{ мм} \Rightarrow \Pi = 15 \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Сумарне відносне обтиснення ε_Σ технологічного процесу знайдено з наступного рівняння:

$$\varepsilon_\Sigma = 1 - \sin \alpha = 42,642\%. \quad (4.6)$$

Гранична величина відносного обтиснення ε_{max} алюмінієвого сплаву АМг6 при ротаційній витяжці конусів та деталей з криволінійною твірною дорівнює:

$$\varepsilon_{\text{max}} = 45\%. \quad (4.7)$$

Таким чином, ротаційна витяжка проводиться за один перехід по технологічній схемі, представлений на рис. 4.2.

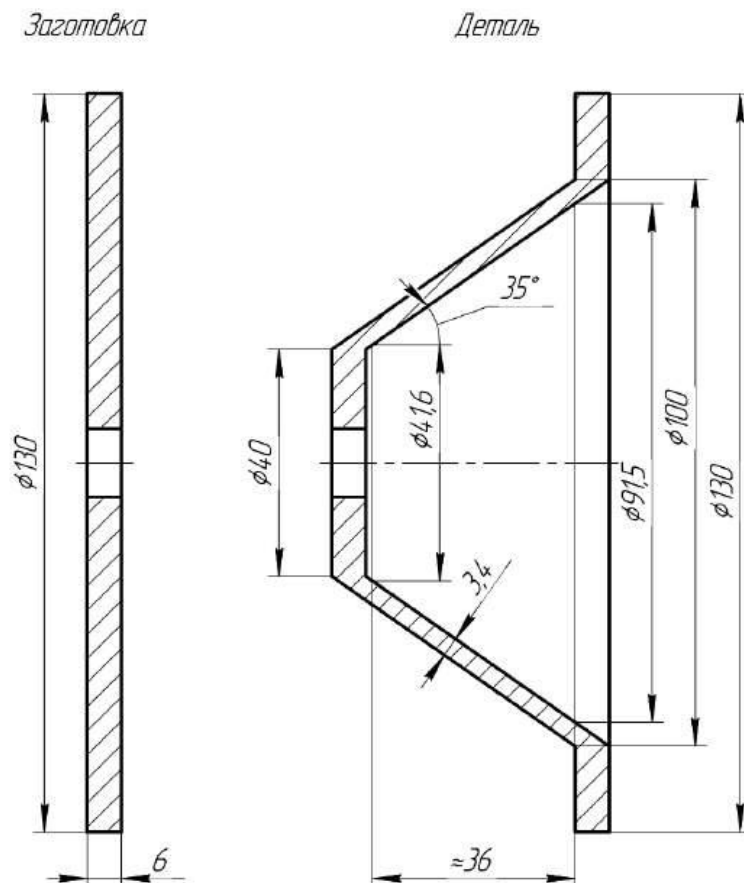


Рисунок 4.2 – Технологічна схема ротаційної витяжки дослідної деталі

Також прийнято такі параметри режиму обробки: кількість тискових роликів - 1 шт; частота обертання шпинделя – 60 об/хв; поздовжня подача – 1 мм/об.

Зважаючи на те, що дослідною є конічна деталь, для виконання операції ротаційної витяжки спочатку прийнято радіусний деформуючий ролик із кутом переднього конуса – 90° , кутом заднього конуса – 14° , габаритним діаметром – 370 мм, оскільки розроблена технологічна схема передбачає ротаційну витяжку з потоншенням, радіусом заокруглення робочого конуса – 18 мм.

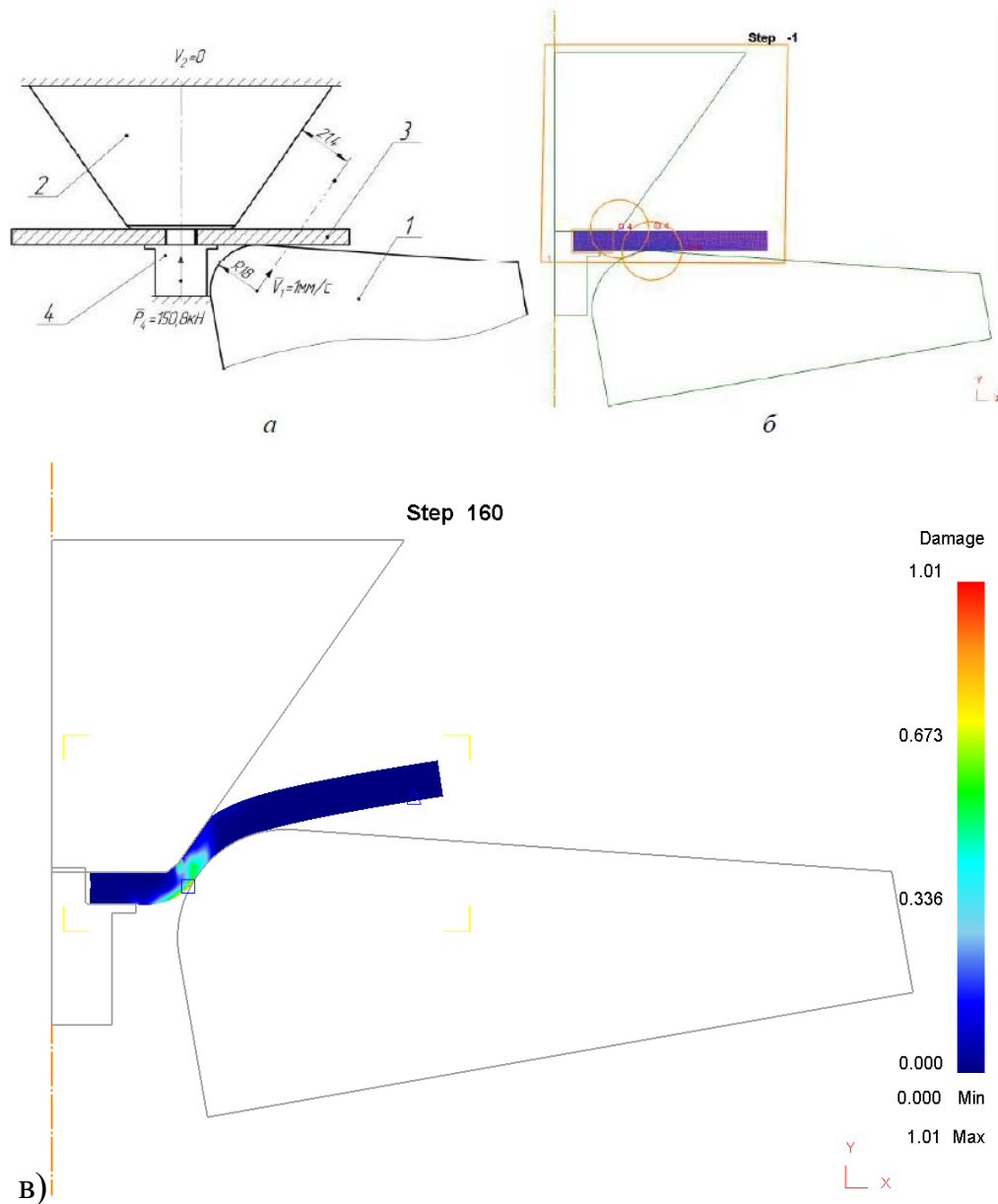
Для теоретичного визначення граничного деформування матеріалу дослідної деталі в ході формозміни, проводилося комп'ютерне моделювання процесу в програмному комплексі із застосуванням розробленої підпрограми. Дотримуючись [30-35], при моделюванні прийнято осесиметричну розрахункову схему, представлену рис. 4.3, а. Модель матеріалу заготовки – пружнопластична, з коефіцієнтом пружності першого роду - 66685 ГПа [40-35].

Для якісної побудови кінцево-елементної сітки зі згущеннями в області, що цікавить, застосовувалися вікна щільності з відносним розміром елементів 0,4, розташування яких на розрахунковій моделі в програмному комплексі відображено на рис. 4.3, б. Для попередження виродження елементів сітки кінцевих елементів та якісного виконання розрахунку застосовувалася умова: максимальна глибина проникнення – 0,03 мм. Перед ротаційною витяжкою заготовка та робочі поверхні оправи та ролика змащуються індустріальною олією. При моделюванні модель тертя приймалася в якості комбінованого закону

$$\tau_k = \begin{cases} c_{2222_1} p_k, & 0 \leq p_k < c_{2222_2} \sigma_s / (\sqrt{3} c_{2222_1}), \\ c_{2222_2} \sigma_s / \sqrt{3}, & c_{2222_2} \sigma_s / (\sqrt{3} c_{2222_1}) \leq p_k < \infty; \end{cases} \quad (4.8)$$

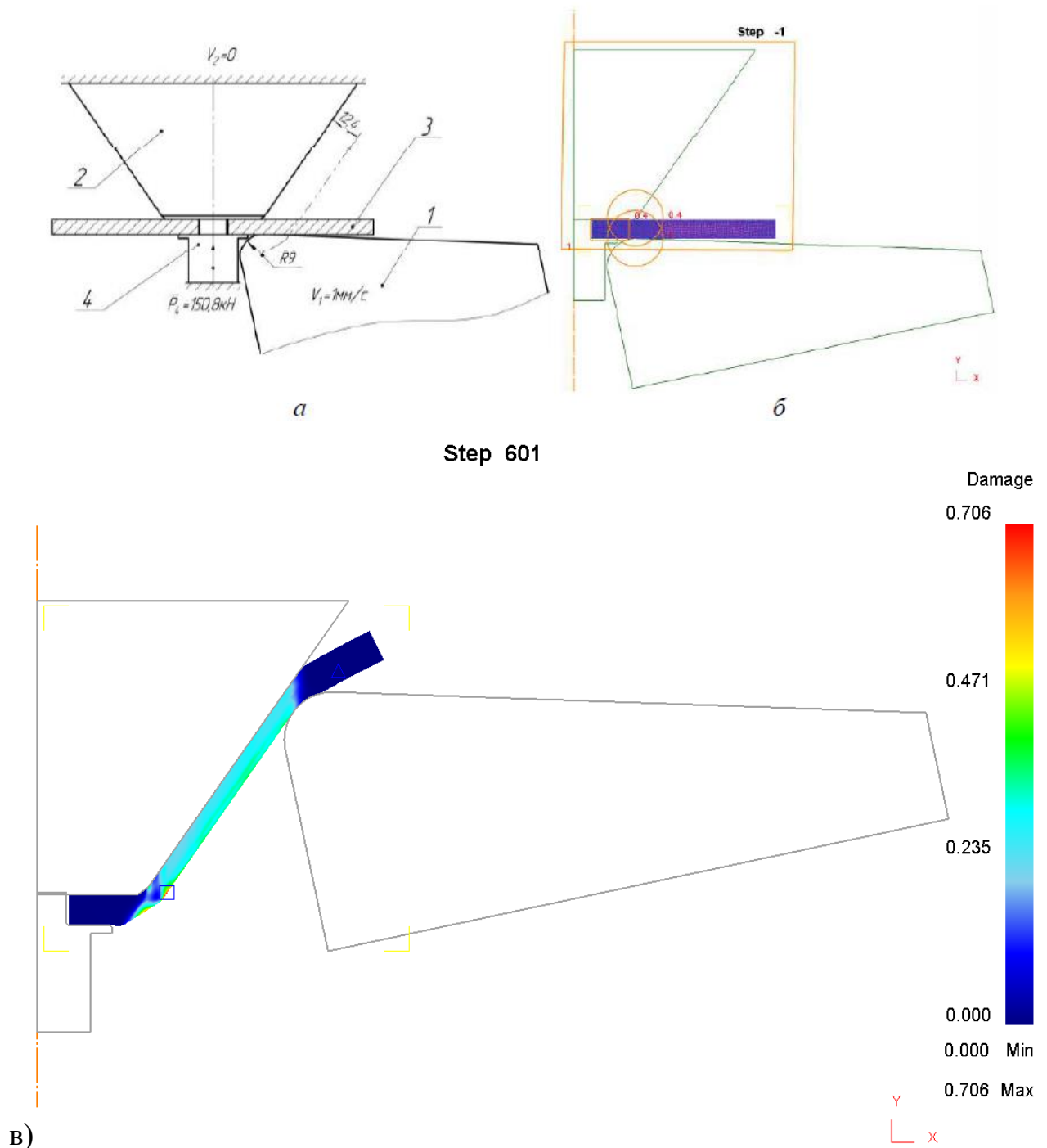
Отримані в результаті моделювання дані свідчать про перевищення граничного деформування при ротаційній витяжці по розробленій схемі. Так, на рис. 4.3, в представлено розподіл за об'ємом поковки величини критерію (4.1) у момент досягнення граничного деформування.

В результаті аналізу процесу, для усунення даного дефекту, було запропоновано змінити траєкторію переміщення ролика на початковому етапі ротаційної витяжки, таким чином, щоб знизити величину показника напруженого стану в місці досягнення граничного деформування і тим самим, зменшити використаний ресурс пластичності. Прийнята розрахункова схема ротаційної витяжки за скоригованим варіантом представлена на рис. 4.4, а. На малюнку 4.4, б представлена візуалізація розрахункової моделі програмного комплексу з кінцево-елементною моделлю заготовки та відображеним розташуванням вікон густини. Розподіл величини критерію (4.1) в поковці, отримане з моделювання процесу ротаційної витяжки із зміненою траєкторією переміщення ролика, відображене на рис. 4.4, в, із якого випливає, що зміна траєкторії переміщення ролика дозволила уникнути досягнення критичного стану з подальшим перевищенням граничного деформування.



а – розрахункова схема; б – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі з кінцево-елементною сіткою заготовки; в – розподіл по заготовці величини критерію (4.1); 1 – ролик; 2 – оправа; 3 – заготовка; 4 – притиск; — - - — - траєкторія переміщення інструменту 1; $\square$ і Δ – положення точки, відповідно, з максимальним та мінімальним значенням

Рисунок 4.3 – Моделювання ротаційної витяжки дослідної деталі розробленої технологічної схеми



в)

а – розрахункова схема; б – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі з кінцево-елементною сіткою заготовки; в – розподіл по заготовці величини критерію (4.1); 1 – ролик; 2 – оправа; 3 – заготовка; 4 – притиск; — - - — - траєкторія переміщення інструменту 1; $\square$ і Δ – положення точки, відповідно, з максимальним та мінімальним значенням

Рисунок 4.4 – Моделювання ротаційної витяжки дослідної деталі по скоригованій технологічній схемі

4.4 Експериментальна верифікація

Для перевірки отриманих результатів була здійснена ротаційна витяжка за двома розглянутими вище схемами. Ротаційна витяжка виконувалася на універсальному давильно-розкатному горизонтальному двороликовому стані з числовим програмним управлінням.

При установці технологічного оснащення для усунення биття оправи застосовувався індикатор із магнітною стійкою. Регулювання зазору між роликом та оправою здійснювали за допомогою клинового щупа. Вимірювання товщини одержуваних деталей здійснювали з допомогою індикаторної скоби.

4.5 Аналіз результатів

Отримані з прикладу дослідної деталі результати підтверджують працездатність створеного теоретичного апарату оцінки граничного деформування заготовки з металу при ротаційній витяжці на стадії проектування технологічного процесу.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Для оцінки комерційного потенціалу наукової розробки необхідно провести технологічний аудит, основною якого є підвищенні ефективності процесів холодного листового штампування та удосконалення технології ротаційної витяжки деталей шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу листової заготовки.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету: Савуляк В. І., кафедра галузевого машинобудування; Шиліна О. П., кафедра галузевого машинобудування; Кириця І. Ю., кафедра опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 5.1 [41] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів

4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки пові-домлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

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

В таблиці 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.4 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Шиліна О. П.	Кириця І. Ю.
	Бали, виставлені експертами:		
1	3	2	3
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	3	4
5	3	3	3
6	3	3	3
7	1	0	1
8	3	3	3
9	1	2	3
10	4	4	4
11	4	4	4
12	2	3	2
Сума балів	СБ ₁ =31	СБ ₂ =32	СБ ₃ =33
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{31 + 32 + 33}{3} = 32$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 32 бали, і згідно з табл. 5.3, це вказує на рівень вище середнього комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результатом магістерської роботи є теоретичний апарат оцінки граничного деформування заготовки з металу при ротаційній витяжці на стадії проектування технологічного процесу. Металева воронка для спеціальної техніки з покращеними фізико-механічними властивостями матеріалу може бути реалізована для техніки (машини, механізми та обладнання) для виконання спеціальних робочих функцій, використання у виробничому процесі (будівельна та будівельно-дорожня техніка, вантажна техніка, збиральна техніка, сільгосптехніка, техніка для лісопромислового комплексу, навісне та виробниче обладнання, устаткування тощо)

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано воронка отримана зварюванням. Основними недоліками аналога є непроварювання, що відбувається при недостатньому плавленні та склеюванні. Також до недоліків можна віднести пористість при зварюванні означає утворення невеликих повітряних кишень або пір, які послаблюють зварний шов.

У розробці дана проблема вирішується безшовні воронка будь-якої конфігурації отримані холодним пластичним деформуванням

В табл. 5.5 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Таблиця 5.5 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Механічна стійкість, Н	4000	4300	1,08	0,2
Функціонал, бар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1,13	0,2
Похибка, %	2	1	2	0,1
Напрацювання на відмову, год	3000	5000	1,67	0,3
Масо-габарити, кг	0,2	0,2	1	0,2

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

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (5.1) та (5.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 5.6.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (5.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (5.2)$$

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

$$q_1 = \frac{4300}{4000} = 1,08;$$

$$q_2 = \frac{1,8}{1,6} = 1,13.$$

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

$$q_4 = \frac{5000}{3000} = 1,67;$$

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

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 1,08 \cdot 0,2 + 1,13 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,1 + 1,67 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,2 = 1,34$$

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

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

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

В табл. 5.6 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 5.6 – Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
1. Нормативно-технічні показники		
Механічна стійкість, Н	4000	4300
Функціонал, бар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Похибка, %	2	1
Напрацювання на відмову, год	3000	5000
Масо-габарити, кг	0,2	0,2
2. Економічні показники		
Ціна придбання, грн.	250	200

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

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (5.4)$$

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

$I_{e.n.}$ – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (5.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (5.5)$$

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

$$I_{e.n.} = \frac{200}{250} = 0,8;$$

$$K = \frac{1,34}{0,8} = 1,68.$$

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

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

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

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

$$Z_o = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (5.6)$$

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

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

t – число робочих днів роботи дослідника.

Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 4.7.

Таблиця 5.7 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату грн.
Керівник	20000	952,4	5	4762
Інженер	18000	857,1	22	18857
Всього				23619

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

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.7)$$

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

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

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

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.8)$$

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

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

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

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

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 5.8 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1.Підготовчі	3	1	47,6	142,9
2.Монтажні	3	3	64,3	192,9
3.Складальні	2	5	81,0	161,9
4.Налагоджувальні	4	2	52,4	209,5
5.Випробувальні	2	4	71,4	142,9
Всього				850,0

3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

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

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

$$З_d = (З_o + З_p) * \frac{Н_{дод}}{100\%} \quad (5.9)$$

$$З_d = 0,11 * (23619 + 850) = 2691,6(\text{грн})$$

4. Наррахування на заробітну плату $Н_{зп}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (5.10):

$$Н_{зп} = (З_o + З_p + З_d) * \frac{\beta}{100} (\text{грн}) \quad (5.10)$$

де $З_o$ – основна заробітна плата розробників, грн.;

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

$З_p$ – основну заробітну плату робітників, грн.;

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

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

$$H_{3п} = (23619 + 850 + 2691,6) * \frac{22}{100} = 5975,34 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

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

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{вj}, \quad (5.11)$$

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

Проведені розрахунки зведені в таблицю 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Алюмінієвий сплав АМг6	168	200	33600
Витратні матеріали	200	1	200
Всього			33800
З врахуванням коефіцієнта транспортування			37180

6. Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.12)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;
 $C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

Отримані результати необхідно звести до таблиці:

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Ролики	1	200	200
Всього з врахуванням налагодження			220-

7. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.13)$$

де $C_{\text{прог}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

Отримані результати необхідно звести до табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
САЕ-система	1	1000	1000
Всього			1100

8. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.14)$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
1. Персональний комп'ютер	40000	2	1	1666,67
2. Гідравлічний прес	20000	4	1	416,67
3. Фрезерний верстат	15000	4	1	312,50
4. Універсальний давильно-розкатний горизонтальний двороликовий стан з числовим програмним управлінням	400000	4	1	8333,33
Всього				10729,17

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

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot \Pi_e \cdot K_{\text{впн}}}{\eta_i} \quad (5.15)$$

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

Π_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

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

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

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

$$B_e = \frac{0,5 \cdot 270 \cdot 10,5 \cdot 0,5}{0,8} = 885,94$$

10. Службові відрядження.

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

$$B_{\text{св}} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{\text{св}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

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

$$B_{\text{св}} = 0,2 \cdot (23619 + 850) = 4893,81$$

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

$$B_{\text{нзв}} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.17)$$

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

$$B_{\text{нзв}} = (23619 + 850) \cdot \frac{100}{100\%} = 24469,05 \text{ грн}$$

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

$$B = 23619 + 850 + 2691,6 + 5975,34 + 37180 + 220 + 1100 + 10729,17 + 885,94 + 4993,81 + 24469,05 = 112613,95$$

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

$$ЗВ = \frac{B}{\eta}, \quad (5.18)$$

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

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,7$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{112613,95}{0,7} = 160877,07 \text{ грн.}$$

5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

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

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.19)$$

де ΔC_o – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

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

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

Π_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

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

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

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

x – ставка податку на прибуток. У 2024 році – 18%.

Припустимо, що при впровадженні результатів наукової розробки підвищенні ефективності процесів холодного листового штампування та удосконалення технології ротаційної витяжки деталей шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу листової заготовки. Припустимо, що ціна зросте на 50 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 2000 шт., протягом другого року – на 2500 шт., протягом третього року на 3500 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 2500 шт., а її ціна до 200 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\P_1 &= [50 \cdot 2500 + (200 + 50) \cdot 2000] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 106766,56 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_2 &= [50 \cdot 2500 + (200 + 50) \cdot (2000 + 2500)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 317179,81 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_3 &= [50 \cdot 2500 + (200 + 50) \cdot (2000 + 2500 + 3500)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \\ &\cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 466653 \text{ грн.}\end{aligned}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

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

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

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (5.20)$$

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

$$PV = 2 \cdot 160877,07 = 321754,13$$

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

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (5.21)$$

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

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.22)$$

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

T – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДЦКР, роки;

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

t – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{106766,56}{(1 + 0,2)^1} + \frac{317179,81}{(1 + 0,2)^2} + \frac{466653}{(1 + 0,2)^3} = 580545,78 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (580545,78 - 321754,13) = 258791,65 \text{ грн.}$$

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

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

$$E_e = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.23)$$

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

$$E_e = \sqrt[3]{1 + \frac{258791,65}{321754,13}} - 1 = 0,38 = 38\%$$

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

$$\tau = d + f, \quad (5.24)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2024 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

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

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

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

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

$$T_{ок} = \frac{1}{E_e} \quad (5.25)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,38} = 2,7 \text{ роки}$$

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

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що для достовірної оцінки граничного деформування заготовки в процесах обробки металів тиском, необхідно виконати дослідження щодо визначення пластичності металу в широких діапазонах зміни показників напруженого стану та виду напруженого стану, які включають як позитивні, так і негативні величини.

2. Внаслідок пошуку показника напруженого стану, що дозволяє мінімізувати відносне відхилення діаграм пластичності для різних видів напруженого стану, встановлено, що максимальне відносне відхилення діаграм пластичності сталі 12Х1МФ, побудованих для показника напруженого стану, що має мінімальну середньою відносною похибкою може перевищувати 40%; для традиційно застосовуваного показника та показників, що відрізняються від нього величиною постійного множника - 80%, у зв'язку з чим при визначенні діаграм пластичності крім показника напруженого стану необхідно також розглядати показник виду напруженого стану

3. Розроблено спосіб дослідження пластичності листового металу на одному випробувальному устаткуванні, без застосування спеціалізованих пристроїв, що дозволяє варіювати в широких діапазонах величини показника напруженого стану та показника виду напруженого стану (Для алюмінієвого сплаву Д16, відповідно, рівних $-0,6 \dots 0,8$ і $-0,9 \dots 0,7$), заснований на розтягуванні/стисканні спеціальних смуг. Також встановлено, що розтягування/стиснення спеціальних смуг у деяких випадках дозволяє дослідити пластичність листового металу в умовах плоского напруженого стану.

4. Внаслідок модернізації програмного комплексу імітаційного моделювання процесів обробки матеріалів тиском, що полягає в його інтеграції з розробленою теоретичною моделлю використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу у процесах холодного листового

штампування засобами розробленої підпрограми, створено розрахунковий апарат, що дозволяє прогнозувати граничне деформування заготовки.

5. Проведено апробацію розробленої теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки у процесах холодного листового штампування та створеного на її основі розрахункового апарату на процесі ротаційної витяжки конічної деталі стосовно використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки, в результаті чого підтверджена їх ефективність.

6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на рівень комерційного потенціалу вище середнього. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в дослідження деформування листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей в процесі ротаційної витяжки окупляться через 2,7 роки, загальні витрати на розробку складуть 160877,07 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., Sivak, R. I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 2018, 54(3), pp. 326–332. DOI 10.1007/s11003-018-0188-x.
2. Aliiev, I. S., Sivak, R. I., Markov, O. E., Levchenko, V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(3-4), pp. 1345–1353.
3. Hrudkina, N., Levchenko, V., Aliiev, I., Sivak, R., Sukhovirska, L. Estimating the initial stage in the process of radial-reverse extrusion using a triangular kinematic module / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 2(7-116), pp. 51–59.
4. Aliieva, L. I., Markov, O. E., Aliiev, I. S., Levchenko, V. N., Malii, K. V. Analysis of Power Parameters of Combined Three-Direction Deformation of Parts with Flange / *FME Transactions*, 2021, 49(2), pp. 344–355.
5. Hrudkina, N. S., Markov, O. E., Shapoval, A. A., Abhari, P., Malii, K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion / *FME Transactions*, 2022, 50(1), pp. 90–98.
6. Markov, O. E., Aliiev, I. S., Aliieva, L. I., Hrudkina, N. S. Computerized and physical modeling of upsetting operation by combined dies / *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2020, 55(3), pp. 640–648.
7. Hrudkina, N., Aliiev, I., Markov, O., Sukhovirska, L., Tahan, L. Designing a kinematic module with rounding to model the processes of combined radial-longitudinal extrusion involving a tool whose configuration is complex / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 2(1-110), pp. 81–89.
8. Allieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhibankov, I., Markov, O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with

compression / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 2(1-104), pp. 15–22.

9. Huber, D., Vogel, L., & Fischer, A. (2021). The effects of sintering temperature and hold time on densification, mechanical properties and microstructural characteristics of binder jet 3D printed 17-4 PH stainless steel. *Additive Manufacturing*, 46, 102114.
10. Hoan, T. D., Loan, T. T., Nga, T. T. V., & Hue, H. T. M. (2024). Combined Solution for Critical Damage Determination and Fracture Prediction in AA1050-O Alloy Sheets. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1-11.
11. Staat, M. (2021). An extension strain type Mohr–Coulomb criterion. *Rock mechanics and rock engineering*, 54(12), 6207-6233.
12. Kukhar, V., Hrushko, O., Markov, O., Anishchenko, O., Prysiachnyi, A. Bypass Bends Deformability of CuZn5 Brass, X10CrNiTi18-9 and C22 Steel at Forming by Euler-Mode Buckling / *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, 510, pp. 1533–1542.
13. Kukhar, V., Povazhnyi, O., Grushko, O. Analysis of CuZn5 Tube Buckling During Producing of the Crossover Bend for Metallurgical Unit / *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, pp. 444–454.
14. Modanloo, V., Talebi-Ghadikolaee, H., Alimirzaloo, V., & Elyasi, M. (2021). Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells. *International journal of hydrogen energy*, 46(7), 5729-5739.
15. Lin, L., Peng, W., Zhu, S., Oleksandr, M., Titov, V. Cross wedge roll bonding process for laminated shafts forming: Interface microstructure, bonding mechanism, and parameter influence / *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317, 117971.
16. Sheykin, S. Y., Grushko, O. V., Melnichenko, V. V., Iefrosinin, D. V., Melnichenko, Y. V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products / *Journal of Superhard Materials*, 2021, 43(3), pp. 222–230.

17. Titov, A. V., Balushok, K. B., Ostash, O. P., Polyvoda, S. L., Chepil, R. V. Pressing of Semi-Finished Al–Mg–Sc Alloy Products in Isothermal Conditions / *Materials Science*, 2023, 58(5), pp. 636–642.
18. Lin, L., Peng, W., Titov, V., Wu, X., Li, H. Interface phenomena and bonding mechanism in the new method of cross wedge rolling bimetallic shaft / *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24, pp. 1132–1149.
19. Shao, Y., Peng, W., Cao, F., Oleksandr, M., Titov, V. Effect of process parameters on AA6061/Q345 bimetal composite for hot stamping / *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, 236(6), pp. 2515–2525.
20. Titov, V., Mozghovyi, O., Borys, R., Amirgaliyev, Y., Aitkulov, Z. Theoretical and experimental substantiation of the extraction process with thinning bimetallic tubular elements of dissimilar metals and alloys / *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 2023, 13(2), pp. 44–49.
21. Ostash, O. P., Polyvoda, S. L., Chepil, R. V., Voron, M. M., Holovchuk, M. Y. Influence of Rare-Earth Metals on the Structure and Properties of Cast and Deformed Alloys of the Al-Mg-Cr-Sc-Zr System *Materials Science*, 2022, 57(6), pp. 846–857.
22. Zhu, S., Peng, W., Chen, Z., Oleksandr, M., Titov, V. The effect of the pre-rolling high-rolling curve of the ring rolling on the forming quality of large ring / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1-2), pp. 1081–1089.
23. Є. І. Шевчук. Застосування гідравлічного приводу з електрогідравлічним розподільником для виготовлення вісесиметричних деталей з листової заготовки ротаційною витяжкою. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 2 (73). С. 117-122.
24. Savchenko, I., Shapoval, O., Chupilko, T., Titov, V., Shchepetov, V. Computer Simulation of Safety Processes of Composite Structures Rheological Properties

/ *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.

- 25.Л. Г. Козлов, І. О. Сивак, Є. І. Шевчук, В. А. Ковальчук. Ротаційна витяжка вісесиметричних деталей з використанням мехатронного приводу, *Вісник ВПІ*, вип. 1, 2017. С. 93–98.
- 26.Kuzmov, A. V., Shtern, M. B., Kirkova, O. G. The Effect of Additional Shear Strains Induced by Die Rotation on the Radial Pressing of Metal Powder Billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2020, 59(3-4), pp. 127–133.
- 27.Shtern, M. B., Mikhailov, O. V., Mikhailov, A. O. *Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis*, 2021, 60(1-2), pp. 20–34.
- 28.Yelistratov, V., Pavlenko, O., Kharkov, O., Chernysh, A., Puzyr, R. Peculiarities of the of Engineering Disciplines Teaching Process Organization Using Three-Dimensional Computer Modeling Methods. *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.
- 29.Maslov, A., Savielov, D., Salenko, Y., Puzyr, R. Research process of vibration platform movement for compacting polymer concrete mixtures. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2522, 040005.
- 30.. Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В., Таган Л. В. Моделювання та розробка процесів точного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ : ДДМА. 2021. 210 с.
- 31.Puzyr, R., Savielov, D., Dolhikh, O., Kulynych, V., Baikova, M. Theoretical Study of the Extending Electric Cable Operation. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings*, 2022.
- 32.Калюжный В. Л., Ярмоленко О. С., Малій Х. В. Горяче штампування сталевих порожнистих виробів з інтенсивною пластичною деформацією стінки і донної частини. Обработка материалов давлением. Краматорск : ДГМА. 2020. 1 (50). С. 98–103.

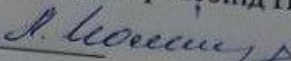
33. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: collective monograph “Mechatronics”. Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100.
34. Тітов В., Гожій С., Мироненко В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1).
35. Yu Z., Chen M., Ma C., Luo S., Zhu C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767.
36. Калюжний В.Л., Бісик С.П, Калюжний О.В., Горностай В.М. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні латунних гільз великої довжини. *Озброєння та військова техніка*. Київ. 2021. 2(30). С. 85–95.
37. Калюжний В. Л., Ярмоленко О. С., Марчук К. Л. Штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи середніх розмірів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1. С. 113–121.
38. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp.14004.
39. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive*. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenchuk. 2020, pp. 510–513.
40. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. *Material Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 751–756.

- 41.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

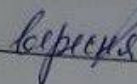
ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

д. т. н., професор Леонід ПОЛЩУК,



(підпис)

« 26 »  2024

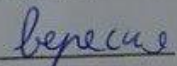
ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дослідження деформування листових заготовок при виготовленні
осесиметричних деталей машин в процесі ротаційної витяжки

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

Артем ЧЕРНОВ

« 24 »  2024 р.

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК



1 Найменування і область застосування

Найменування – деталь типу "конус" для спеціальної техніки з покращеними фізико-механічними властивостями матеріалу, що задовольняють підвищеним вимогам жаростійкості, корозійної стійкості, високої питомої міцності, які викликані особливостями умов експлуатації, що полягають у взаємодії з високошвидкісними потоками плазми, газу, з агресивними середовищами тощо.

2 Підстава для виконання роботи

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

3 Мета і призначення дослідження

Мета: підвищення ефективності процесів холодного листового штампування та удосконалення технології ротаційної витяжки деталей машин шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу листової заготовки.

Призначення розробки – створення розрахункового апарату, що дозволяє оцінювати граничне деформування листової заготовки в процесі ротаційної витяжки.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

- 4.1 Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., Sivak, R. I. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. Materials Science, 2018, 54(3), pp. 326–332. DOI 10.1007/s11003-018-0188-x.
- 4.2 Є. І. Шевчук. Застосування гідравлічного приводу з електрогідравлічним розподільником для виготовлення вісесиметричних деталей з листової

заготовки ротаційною витяжкою. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 2 (73). С. 117–122.

4.3 Aliiev, I. S., Sivak, R. I., Markov, O. E., Levchenko, V. N. The evaluation of workpiece deformability for the process of two-stage extrusion of hollow hull / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(3-4), pp. 1345–1353.

4.4 Hrudkina, N. S., Markov, O. E., Shapoval, A. A., Abhari, P., Malii, K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion / *FME Transactions*, 2022, 50(1), pp. 90–98.

4.5 Л. Г. Козлов, І. О. Сивак, Є. І. Шевчук, В. А. Ковальчук. Ротаційна витяжка вісесиметричних деталей з використанням мехатронного приводу, *Вісник ВПІ*, вип. 1, 2017. С. 93–98.

5 Вихідні дані для розробки:

1	Матеріал	Алюмінієвий сплав АМг6, сталь 12Х1МФ
2	Кількість тискових роликів, шт	1
3	Частота обертання шпинделя, град	60 об/хв
4	Поздовжня подача, мм	1 мм/об
5	Кут переднього конуса ролика, град	90
6	Кут заднього конуса ролика, град	14
7	Габаритний діаметр ролика, мм	370
8	Радіус заокруглення робочого конуса ролика, мм	18

5.1 Технічні вимоги

- універсальний давильно-розкатний горизонтальний двороликовий стан з числовим програмним управлінням з потужністю головного приводу – 8,5 кВт;
- діаметр висувного шпинделя – 110 мм;
- швидкість обертання шпинделя – $10 \dots 1250 \text{ хв}^{-1}$;
- швидкість обертання план-шайби – $6,3 \dots 160 \text{ хв}^{-1}$;
- найбільший момент на висувному шпинделі – 3000 Нм;

5.2 Вимоги до надійності:

довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

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

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час формування деталі типу «конус» ротаційною витяжкою на універсальному давильно-розкатному горизонтальному двороликовому стані використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

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

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

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

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговуванню і ремонту:

–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

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

–вид обслуговування - періодичний;

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

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

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

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,
- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,
- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 890 599,37 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
Артем ЧЕРНОВ

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- моделювання процесу формування деталі типу «конус» ротаційною витяжкою на універсальному давильно-розкатному горизонтальному двороликовому стані;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
- техніко-економічне обґрунтування МКР;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

9 Порядок контролю і прийомки

- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ПРИ
ВИГОТОВЛЕННІ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕСІ
РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ

СТАН ПИТАННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТИСКОМ

Таблиця 1 - Показники напруженого стану та виду напруженого стану у різних способах обробки металів тиском

Спосіб обробки	η	χ
Волочіння дроту	-1,15...0,50	-1,0
Волочіння труб на оправці	-1,00...0,40	-1,0...0
Безоправочне волочіння труб	-0,58...0,40	-0,3...0,3
Гідропресування круглих прутків	-6...-1,15	-1,0...-0,3
Валкове редукування труб	-1...-0,58	-0,5...0,5
Прокатування труб на станах холодного прокатування труб	-3,5...0,60	-0,6...0,5
Прокатування листа (за виключенням кромки листа)	-5,00...1,00 (до 1,00)	-
Прокатування сортаменту в калібрах простої форми	-3,0...0,7 (до 1,50)	-0,8...0,0



Рисунок 1 – Показники напруженого стану, характерні для різних способів визначення пластичності

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i}, \quad (1)$$

$$\chi = (-2\sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_3. \quad (2)$$

Листок №

Листок №

0

Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробка		Версія А. 1		
Перевірка		Сивак Р. І.		
Т. контр.				
Н. контр.		Слабко А. В.		
Затв.		Павлюк Д. К.		

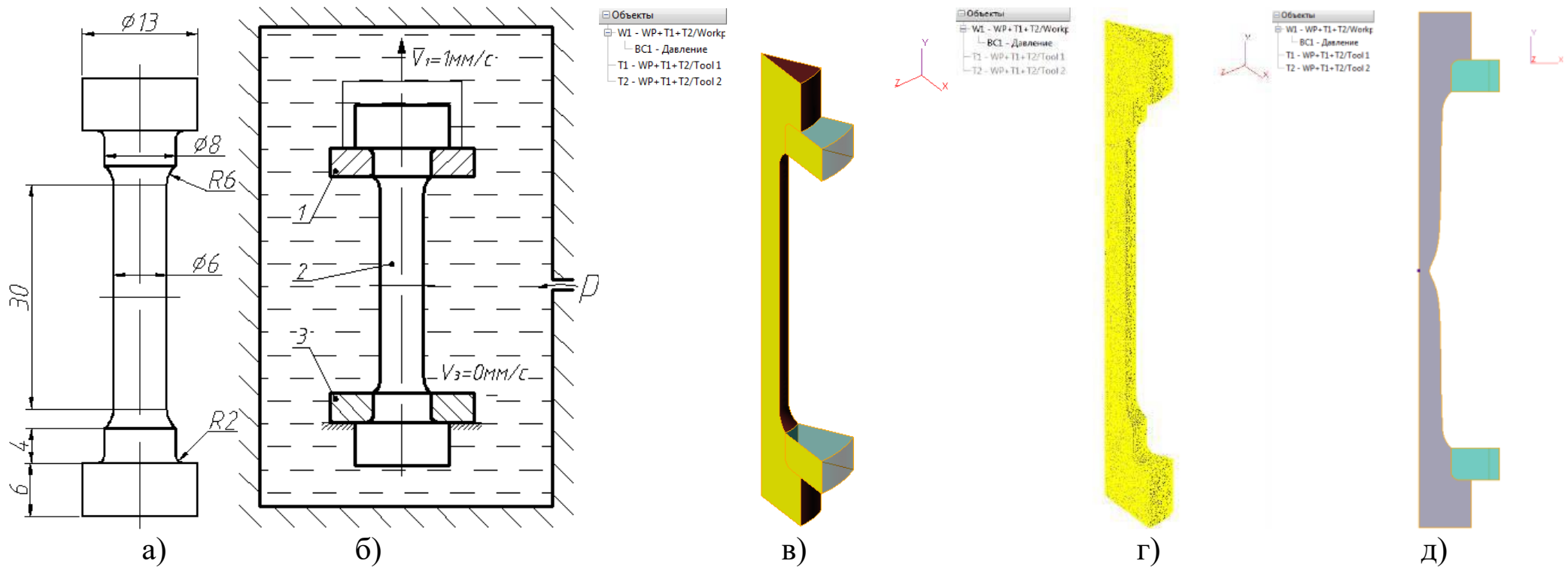
08-62.МКР.09.00.001ПЛ

Стан литання граничного деформування металів при обробці тиском

Літера	Маса	Масштаб
Аркуш 1	Аркуш 11	

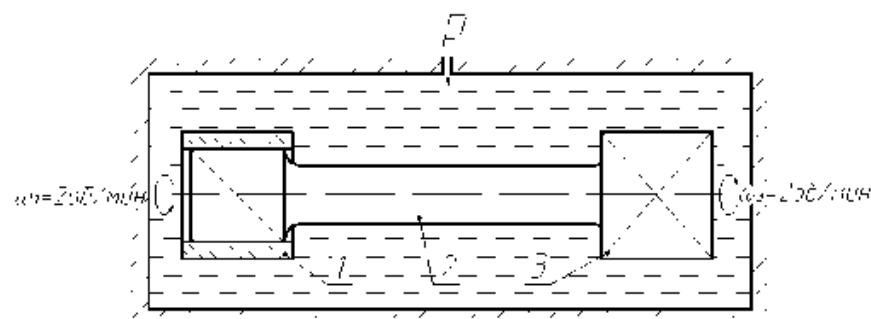
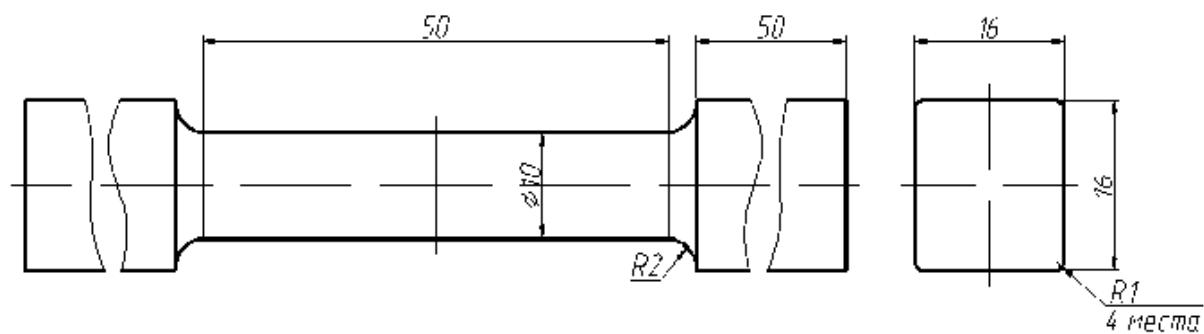
ВНТУ, см. гр. 1ГМ-23м

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ВІД ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ І ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ



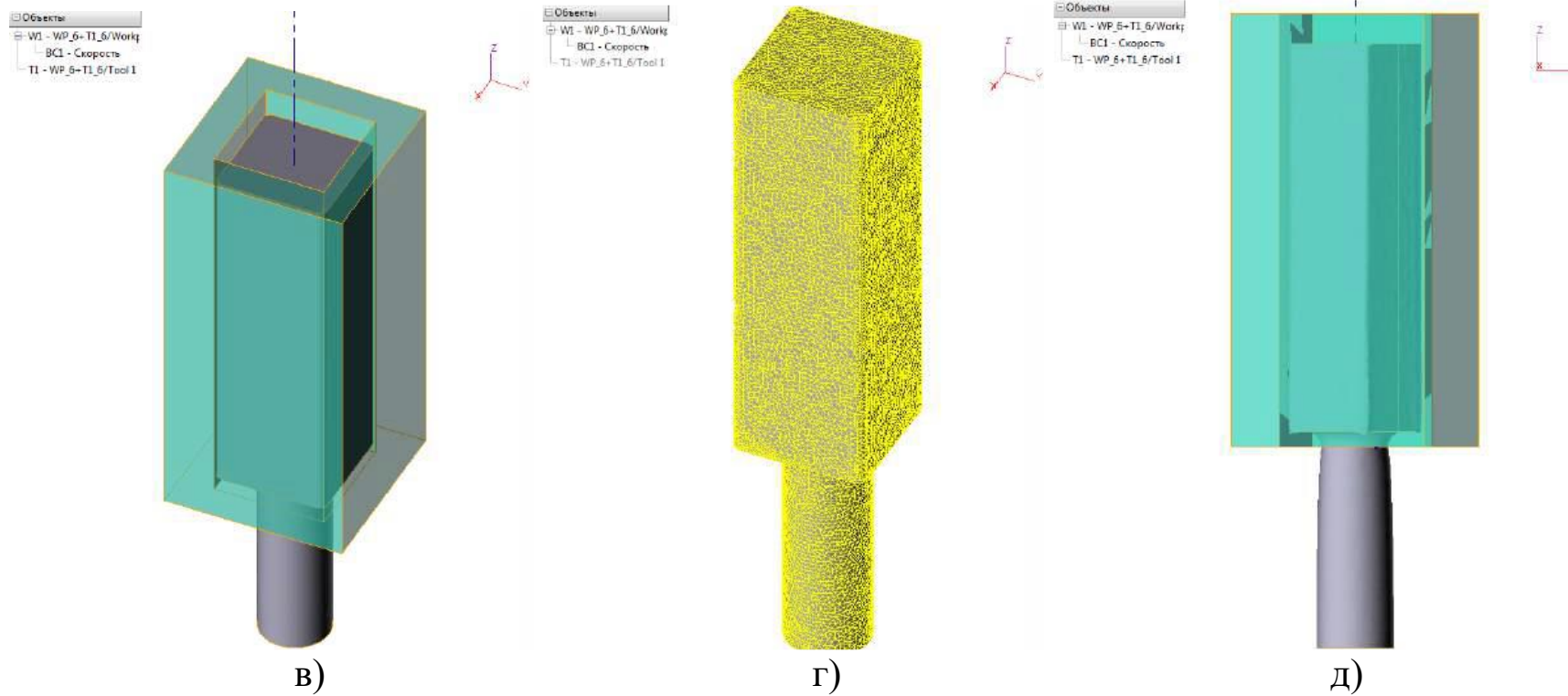
а – ескіз зразка; б – розрахункова схема; в – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі; г – кінцево-елементна сітка зразка; д – положення на зразку трасованої точки; 1, 3 – захвати випробувальної машини; 2 – зразок; V_i – лінійна швидкість i -ої ланки

Рисунок 2 – Моделювання випробувань на розтяг зразка



a)

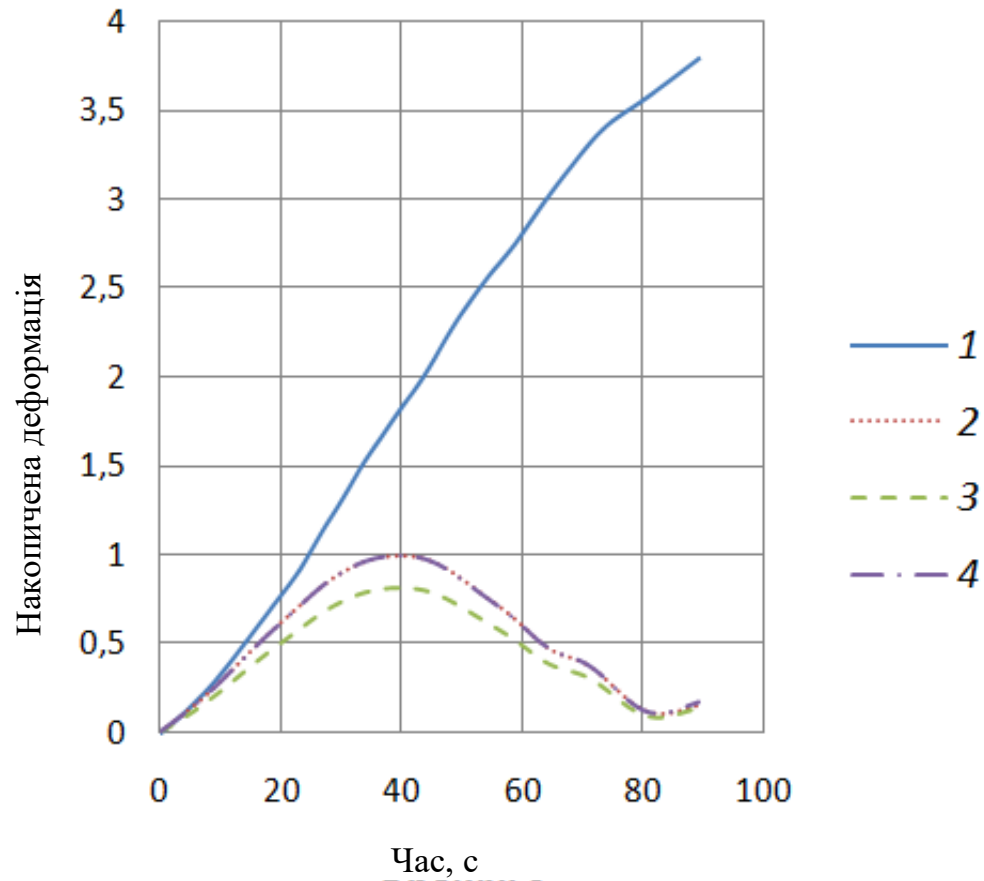
б)



а – ескіз зразка; б – розрахункова схема; в – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі; г – кінцево-елементна сітка зразка; д – положення на зразку трасованої точки; 1, 3 – захвати випробувальної машини; 2 – зразок; ω_i – кутова швидкість i -ої ланки

Рисунок 3 – Моделювання випробувань на кручення зразка

[illegible]



1 – (1); 2 – (2); 3 – (3); 4 – (4)

Рисунок 4 – Величина показника накопиченої деформації у процесі кручення зразка, що визначається виразом

Накопичена деформація:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i \Big|_{t=t_p}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_p = c_{121-1} \varepsilon_1 \Big|_{t=t_p}; \quad (2)$$

де c_{121-1} - коефіцієнт;

$$\varepsilon_p = g_{окт} \Big|_{t=t_p}; \quad (3)$$

де $g_{окт}$ – октаедричний зсув;

$$\varepsilon_p = \frac{\gamma_{13}}{2} \Big|_{t=t_p} \quad (4)$$

де γ_{13} – максимальна зсувна деформація

Довідок №	Герб. знак																																											
Підпис / Ім'я	Підпис / Ім'я	Підпис / Ім'я	Підпис / Ім'я	Підпис / Ім'я	Підпис / Ім'я																																							
Ім'я / Прізвище	Ім'я / Прізвище	Ім'я / Прізвище	Ім'я / Прізвище	Ім'я / Прізвище	Ім'я / Прізвище																																							
<table border="1" style="width: 40%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Зм.</td><td>Арх.</td><td>№ докум.</td><td>Підпис</td><td>Дата</td></tr> <tr><td>Розробив</td><td>Чернов А. Т.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Перевірив</td><td>Сивак Р. І.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Т. комп.</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Н. контр.</td><td>Слабко А. В.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Затв.</td><td>Поліщук Л. К.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> 08-62.МКР.09.00.004ПЛ Методи дослідження залежності пластичності металу від показників напруженого стану і виду напруженого стану (продовження) <table border="1" style="width: 30%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Літера</td><td>Маса</td><td>Масштаб</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Аркуш 4</td><td colspan="2">Аркуш 11</td></tr> </table> ВНТУ, см. зр. 1ГМ-23м						Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробив	Чернов А. Т.				Перевірив	Сивак Р. І.				Т. комп.					Н. контр.	Слабко А. В.				Затв.	Поліщук Л. К.				Літера	Маса	Масштаб				Аркуш 4	Аркуш 11	
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата																																								
Розробив	Чернов А. Т.																																											
Перевірив	Сивак Р. І.																																											
Т. комп.																																												
Н. контр.	Слабко А. В.																																											
Затв.	Поліщук Л. К.																																											
Літера	Маса	Масштаб																																										
Аркуш 4	Аркуш 11																																											

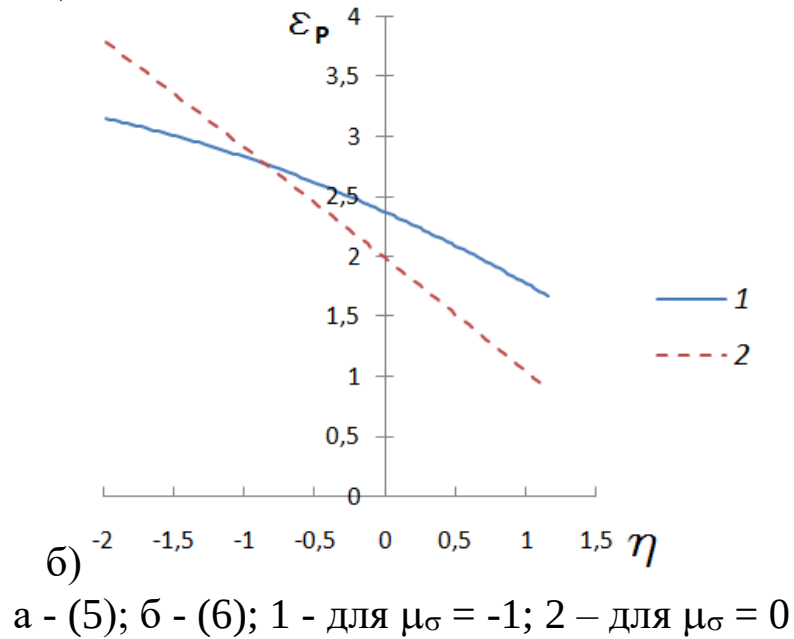
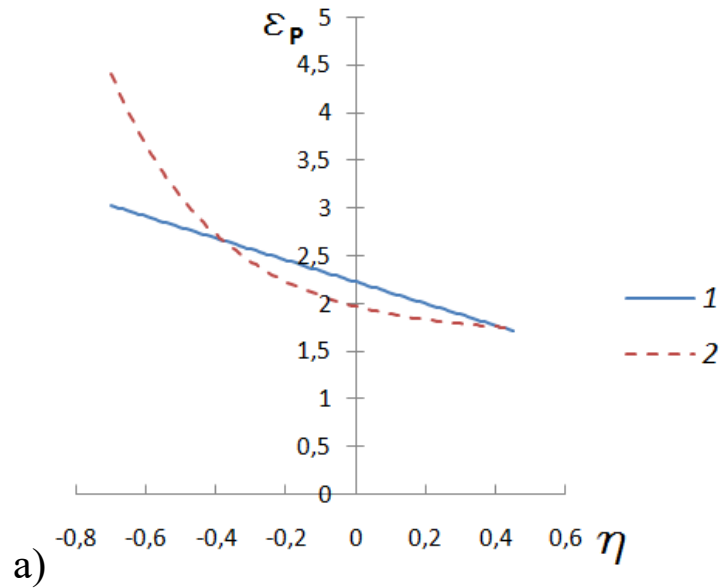


Рисунок 5 – Діаграми пластичності, що відповідають показнику напруженого стану у вигляді

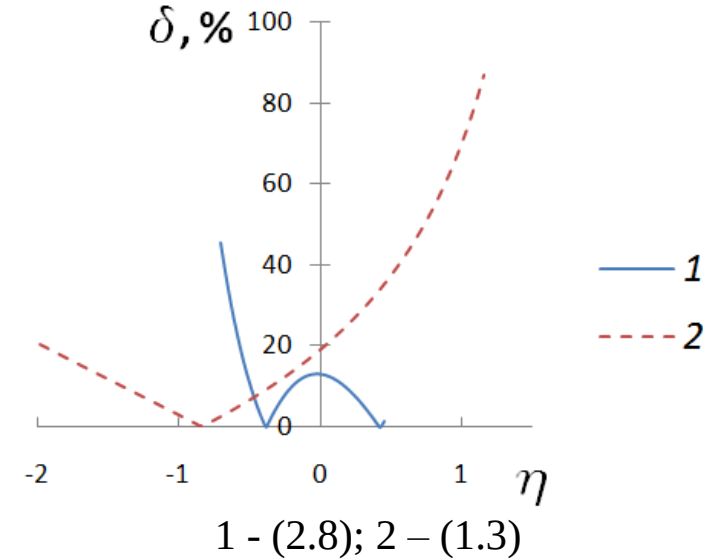


Рисунок 6 – Відносне відхилення діаграм пластичності, що відповідають показнику напруженого стану у вигляді

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{|\sigma_{max}|} \quad (5)$$

де σ_{max} – максимальне за абсолютною величиною головне напруження, МПа;

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{d_{13}}{4R_{13}} \right), \quad (6)$$

де d_{13} – діаметр зразка у найменшому поперечному перерізі, мм;

R_{13} – радіус кривизни контуру поздовжнього перерізу зразка в шийці або виточки, мм

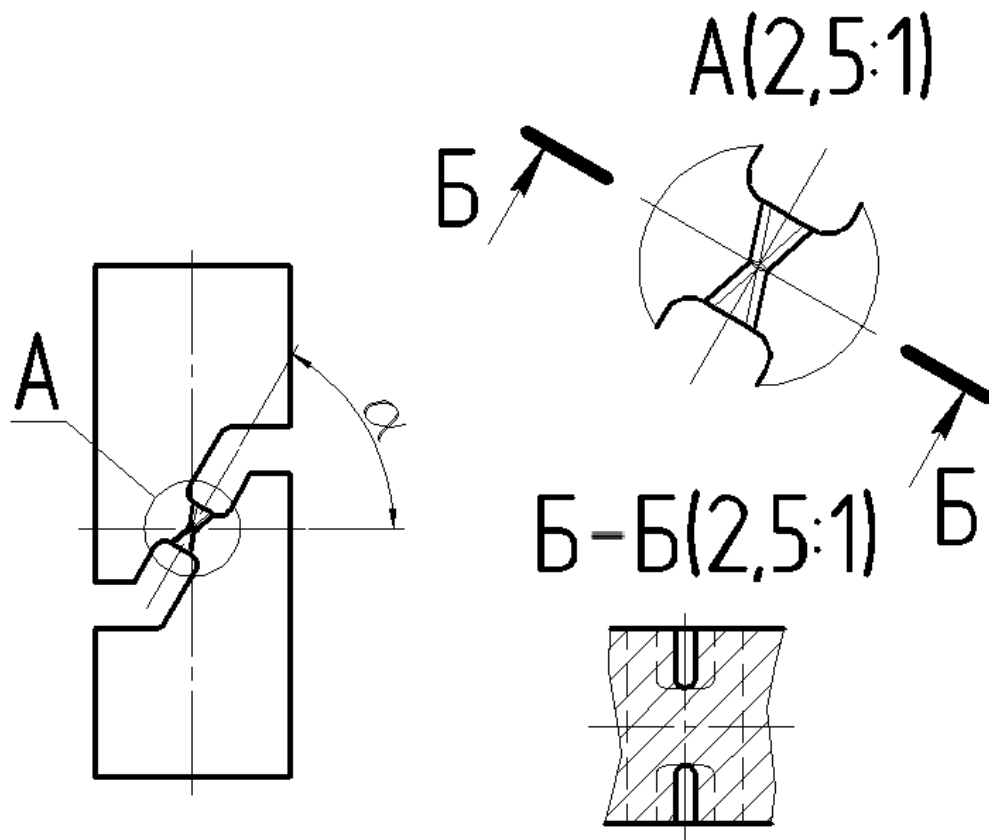
Додаток №

Лист 1 з 1

08-62

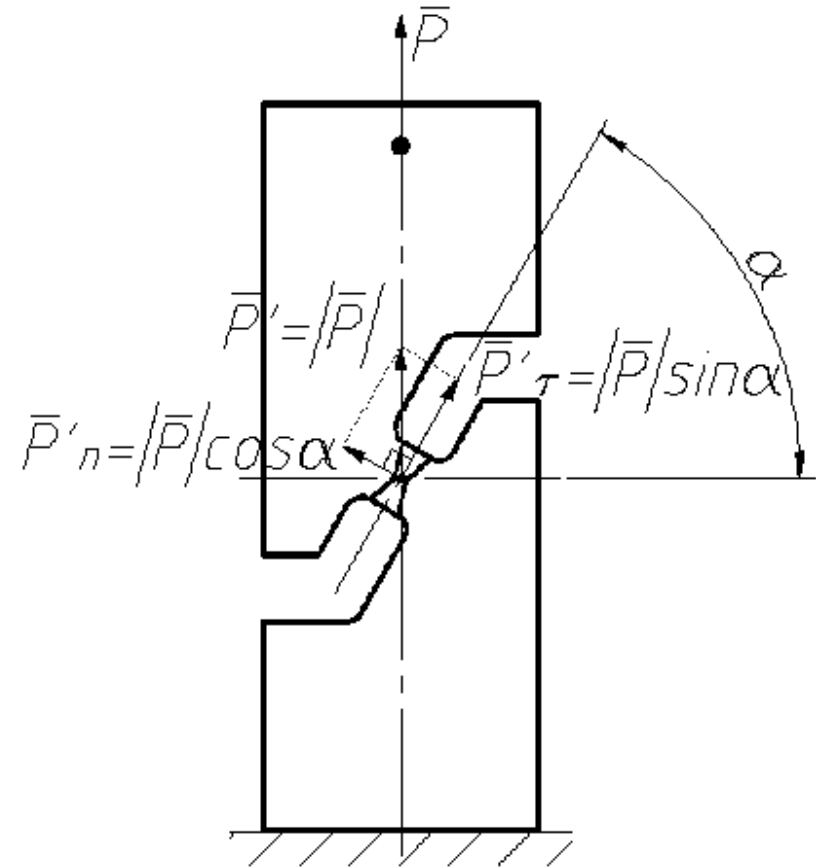
08-62.МКР.09.00.005ПЛ				
Зм.	Док.	№ докум.	Годус.	Дата
Розробив	Чернов А. Т.			
Перевірив	Сивак Р. І.			
Т. контр.				
Методи дослідження залежності пластичності металу від показників напруженого стану і виду напруженого стану (продовження)				
Н. контр. Слабко А. В.				
Затв. Попішук П. К.				
Літера	Маса	Масшт.		
Аркуш 5	Аркуш 11			
ВНТУ, см. ар. 1ГМ-23м				

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ РОЗТЯГОМ/СТИСКОМ СПЕЦІАЛЬНИХ СМУГ



α – кут нахилу пропилів, град

Рисунок 7 – Зразок типу "спеціальна смуга"



$\bar{P}$ – сила, що розтягує/стискає, прикладена до зразка, Н;
 $\bar{P}'$ – сила, що є результатом приведення $\bar{P}$ до центру перемички; $\bar{P}'_n$ – розтягуюча/стискаюча компонента $\bar{P}'$, Н; $\bar{P}'_\tau$ – зсувна компонента $\bar{P}'$, Н

Рисунок 8 – Схема навантаження зразка у перемичці

Перш. дас.

Довідок №

Підп. і дата

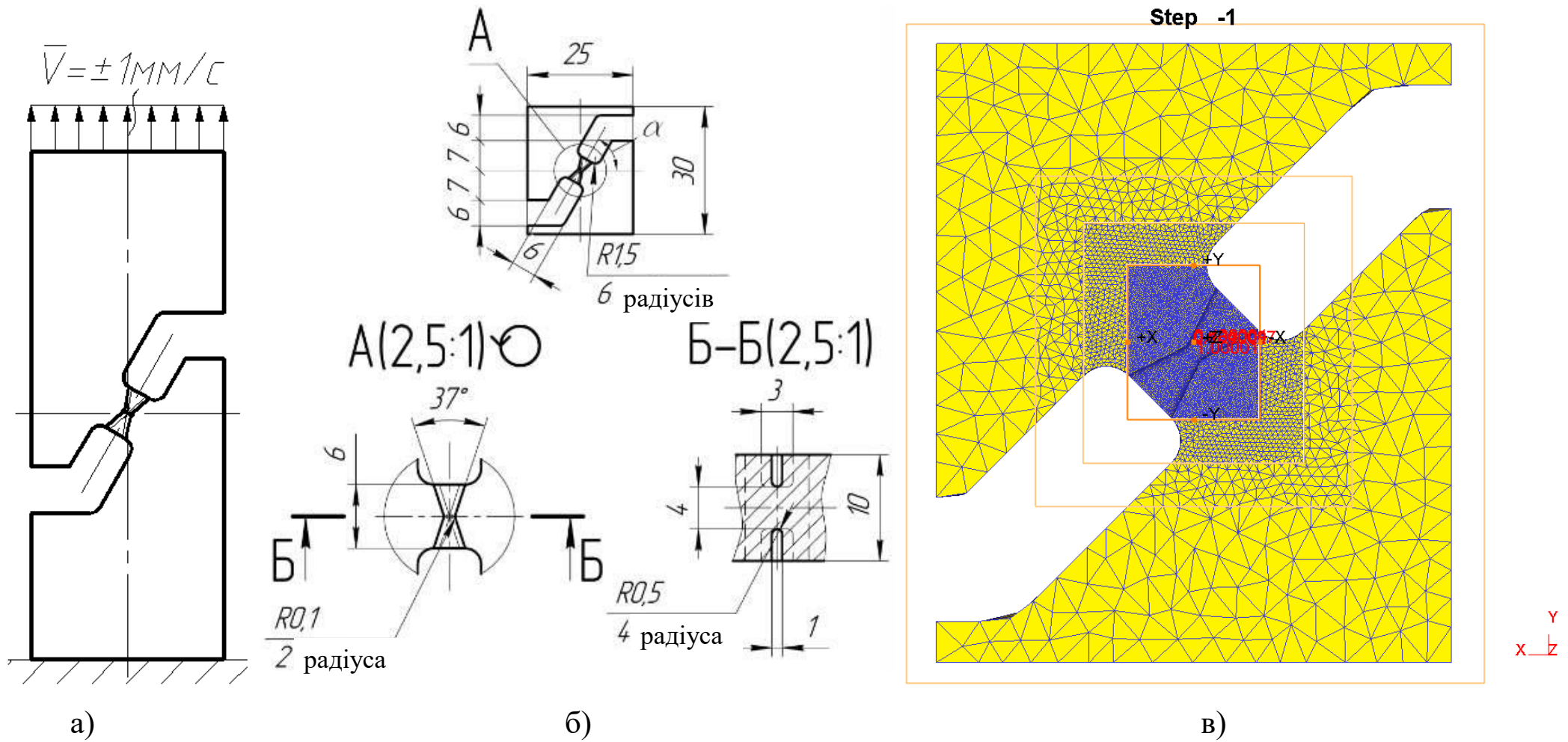
Ім'я, прізвище

Міс. знай. знай. міс.

Підп. і дата

Ім'я, прізвище

08-62.МКР.09.00.006ПЛ													
Зм.	Арк.	Міс. доп.	Підпис	Дата									
Розробив		Чернов А. Т.	<i>[Signature]</i>										
Перевірив		Сивак Р. І.	<i>[Signature]</i>										
Т. контр.													
Дослідження пластичності металу розтягом/стиском спеціальних смуг													
<table border="1"> <tr> <td>Літера</td> <td>Маса</td> <td>Масштаб</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Аркуш 6</td> <td>Аркуш 11</td> </tr> </table>					Літера	Маса	Масштаб				Аркуш 6		Аркуш 11
Літера	Маса	Масштаб											
Аркуш 6		Аркуш 11											
Н. контр.	Стеблов А. В.		<i>[Signature]</i>										
Зам.	Поліщук Р. К.		<i>[Signature]</i>										
ВНТУ, см. гр. 1ГМ-23м													



а – розрахункова схема; б - ескіз зразка; в – кінцево-елементна модель зразка

Рисунок 9 – Моделювання розтягу/стиску спеціальних смуг

[illegible]

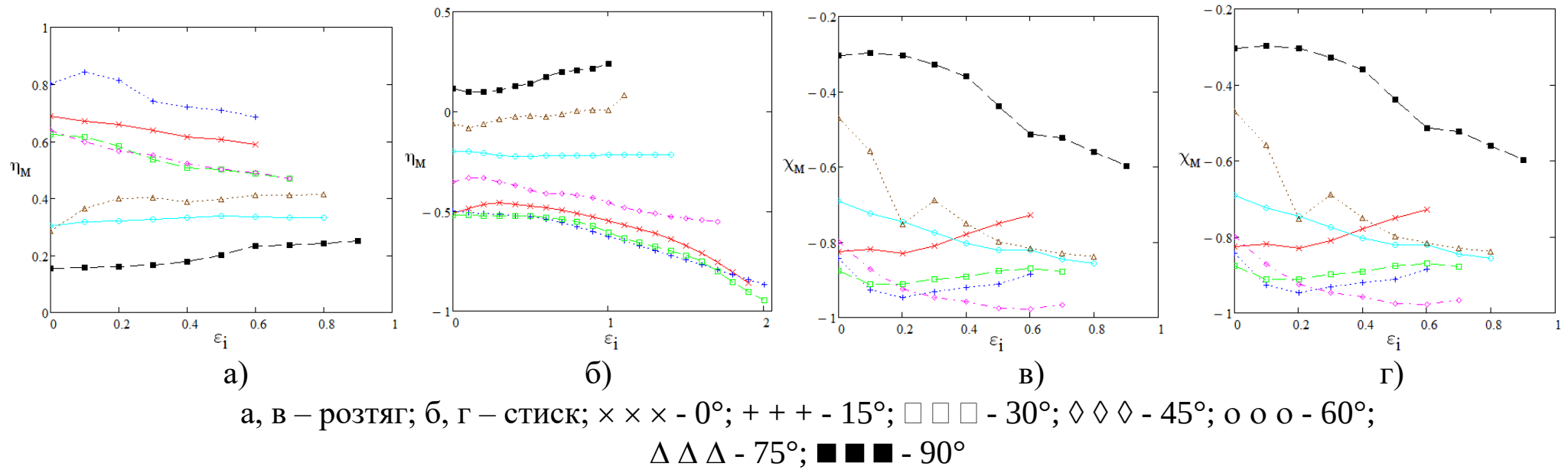
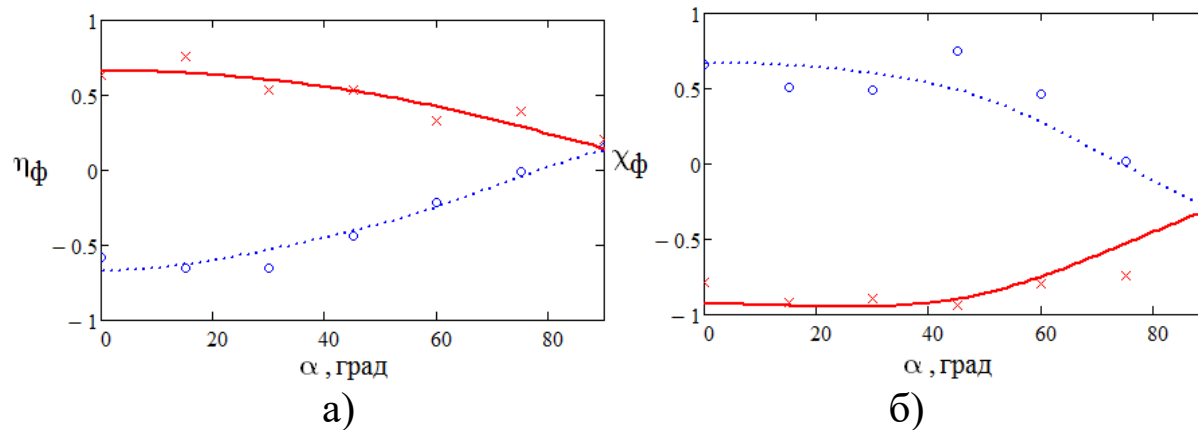


Рисунок 10 – Величини показника напруженого стану (а, б) та показника виду напруженого стану (в, г) на місці виникнення руйнування, отримані з чисельних експериментів



а – показник напруженого стану; б – показник виду напруженого стану:
 $\times \times \times$ і $---$ – результати моделювання та апроксимуюча функція випробувань на розтяг; ooo і $\cdots$ – результати моделювання та апроксимуюча функція випробувань на стиск

Рисунок 11 – Залежності величин показників у місці та в момент руйнування від кута нахилу пропилів

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Заготовка

Деталь

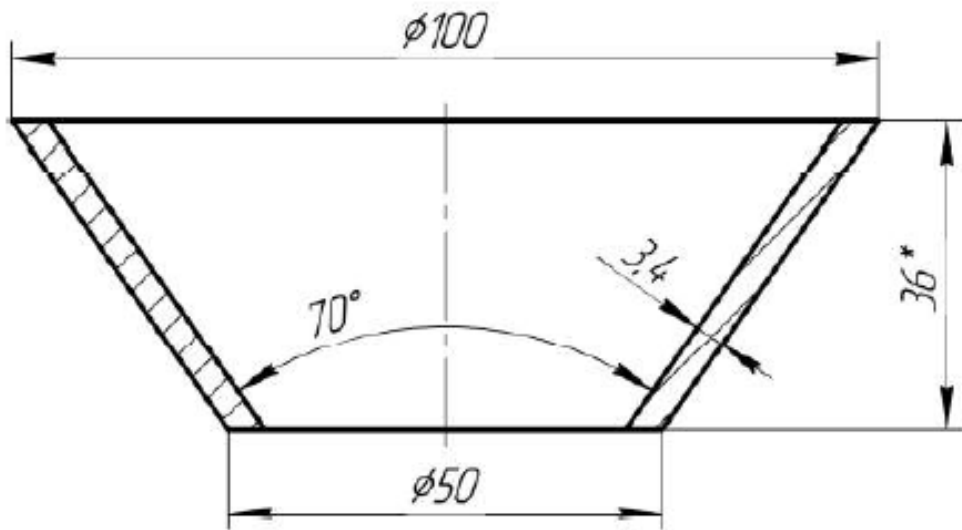


Рисунок 12 – Дослідна деталь

Оцінка граничного деформування за допомогою теоретичної моделі

$$\Psi = c_{31_7} \int_0^t \cos^2(c_{31_4}\chi + c_{31_5}) e^{c_{122_25}\eta} \frac{\tau_{13}}{\sigma_i} \varepsilon_i d\varepsilon_i, \quad (7)$$

де $c_{31_7} = c_{122_24} c_{31_4}$ – коефіцієнт

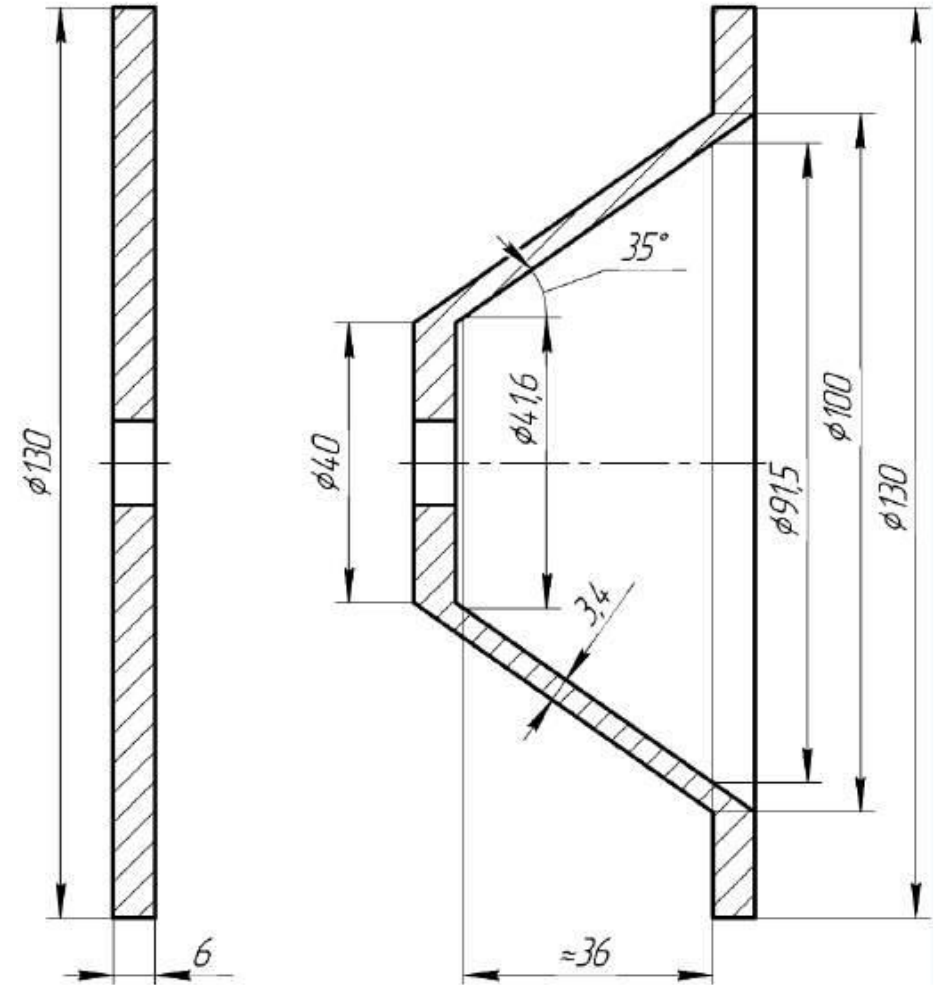


Рисунок 13 – Технологічна схема ротаційної
витяжки дослідної деталі

Листів №

Перш заст

Лист № 0001

Робот / Школа

Лист № 0001

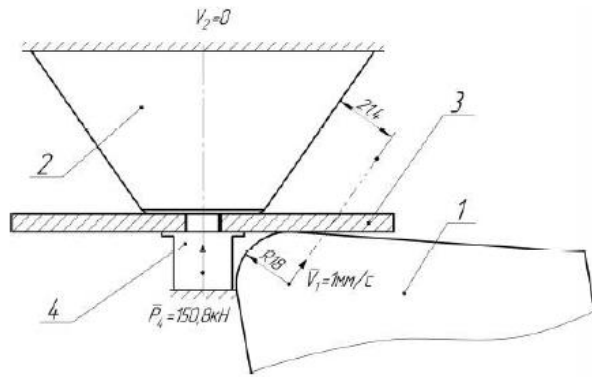
Лист № 0001

Лист № 0001

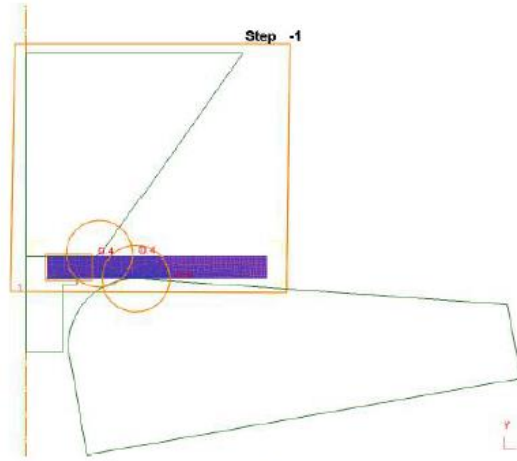
38-12

08-62.МКР.09.00.009ПЛ				
Удосконалення технології ротаційної витяжки деталей на основі оцінки граничного деформування				
Зм.	Арх.	На докум.	Підпис	Дата
Розробив	Чернов А. Т.			
Перевірив	Сивак Р. І.			
Т. контр.				
Н. контр.	Слабейко А. В.			
Зам.	Поліщук Л. К.			
Літера				
Маса				
Масштаб				
Аркуш 9				
Аркуш 11				
ВНТУ, ст. гр. 1ГМ-23м				

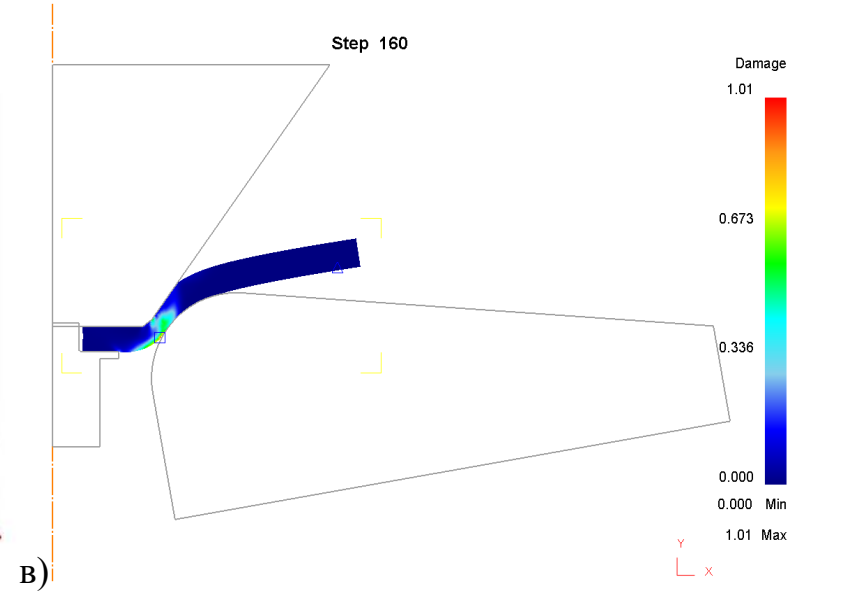
I



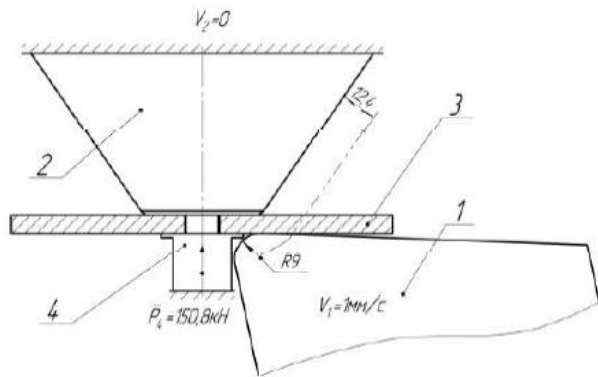
a



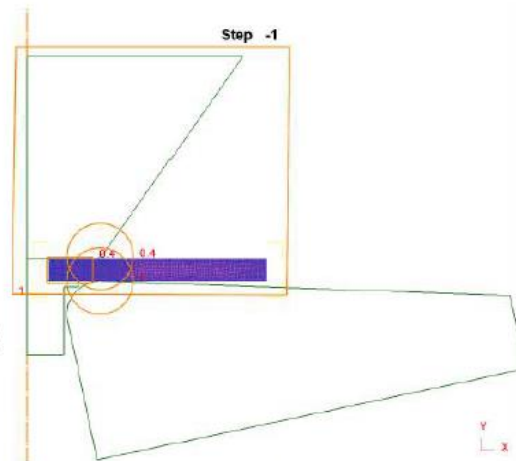
б



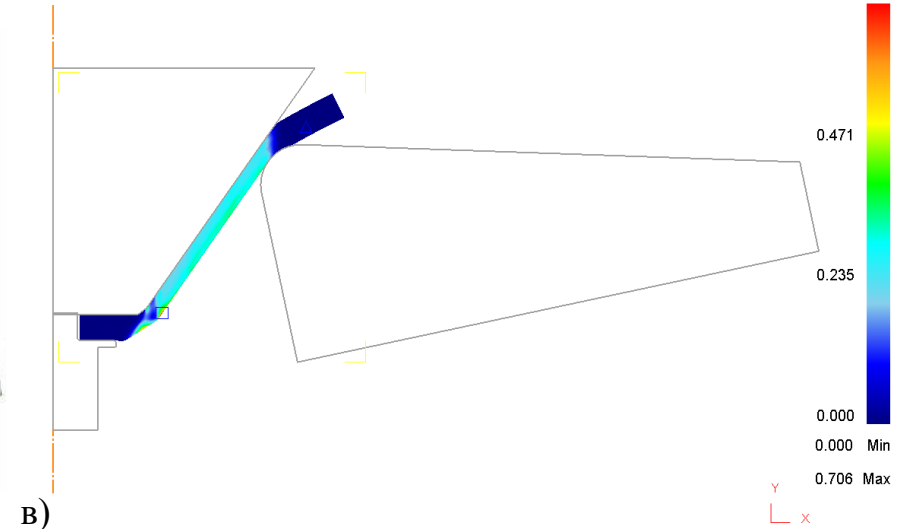
II



a



б



а – розрахункова схема; б – візуалізація розрахункової моделі в програмному комплексі з кінцево-елементною сіткою заготовки; в – розподіл по заготовці величини критерію (4.1); 1 – ролик; 2 – оправа; 3 – заготовка; 4 – притиск;

— - - — - траєкторія переміщення інструменту 1; □ і Δ – положення точки, відповідно, з максимальним та мінімальним значенням

Рисунок 14 – Моделювання ротаційної витяжки дослідної деталі по розробленій технологічній схемі (I) та по скоригованій (II)

ВНТУ, см. зр. 1ГМ-23м

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що для достовірної оцінки граничного деформування заготовки в процесах обробки металів тиском, необхідно виконати дослідження щодо визначення пластичності металу в широких діапазонах зміни показників напруженого стану та виду напруженого стану, які включають як позитивні, так і негативні величини.

2. Внаслідок пошуку показника напруженого стану, що дозволяє мінімізувати відносне відхилення діаграм пластичності для різних видів напруженого стану, встановлено, що максимальне відносне відхилення діаграм пластичності сталі 12Х1МФ, побудованих для показника напруженого стану, що має мінімальну середньою відносною похибкою може перевищувати 40%; для традиційно застосовуваного показника та показників, що відрізняються від нього величиною постійного множника - 80%, у зв'язку з чим при визначенні діаграм пластичності крім показника напруженого стану необхідно також розглядати показник виду напруженого стану

3. Розроблено спосіб дослідження пластичності листового металу на одному випробувальному устаткуванні, без застосування спеціалізованих пристроїв, що дозволяє варіювати в широких діапазонах величини показника напруженого стану та показника виду напруженого стану (Для алюмінієвого сплаву Д16, відповідно, рівних -0,6 ... 0,8 і -0,9 ... 0,7), заснований на розтягуванні/стисканні спеціальних смуг. Також встановлено, що розтягування/стиснення спеціальних смуг у деяких випадках дозволяє дослідити пластичність листового металу в умовах плоского напруженого стану.

4. Внаслідок модернізації програмного комплексу імітаційного моделювання процесів обробки матеріалів тиском, що полягає в його інтеграції з розробленою теоретичною моделлю використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу у процесах холодного листового штампування засобами розробленої підпрограми, створено розрахунковий апарат, що дозволяє прогнозувати граничне деформування заготовки.

5. Проведено апробацію розробленої теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки у процесах холодного листового штампування та створеного на її основі розрахункового апарату на процесі ротаційної витяжки конічної деталі стосовно використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки, в результаті чого підтверджена їх ефективність.

6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на рівень комерційного потенціалу вище середнього. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в дослідження деформування листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей в процесі ротаційної витяжки окупляться через 2,7 роки, загальні витрати на розробку складуть 160877,07 грн.

[illegible]

08-02

						08-62.МКР.09.00.011ПЛ		
Зм	Арх	№ докум.	Подпис	Дата	Висновки			
Розробка	Черкас А. Т.							
Перевірка	Савва Р. І.							
Г. контр.								
Н. контр.	Стебик А. В.							
Зам.	Поліщук П. К.							
					Літера	Маса	Масшт	
					Аркуш 11	Аркуше 11		
					ВНТУ, см. гр. 1ГМ-23м			

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження деформування листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей машин в процесі ротаційної витяжки»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

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

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність 100% Схожість 0%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

3. Виявлені у роботі запозичення с недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Шенфельд В. Й.

(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи _____

(підпис)

Чернов А. Т.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Сивак Р. І.

(прізвище, ініціали)