

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 деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного
листового штампування деталей спецтехніки»

08-62.МКР.06.000.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ІГМ-23м

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

РУСИН Ілля
(прізвище та ініціали)

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

СИВАК Роман
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2024 р.

Опонент: к. т. н., доцент кафедри АТМ

БОРИСЮК Дмитро
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2024 р.

Допущено до захисту

завідувач кафедри ГМ ПОЛІЩУК Леонід
(прізвище та ініціали)

« 13 » грудня 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

«18» вересня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ Іллі РУСИНУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного листового штампування деталей спецтехніки».

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 - АМг6, 2) розмір смуги - 25x245x10 з кутами пропилів 0° , 60° , 65° , 75° , 90° , 95° ; 3) розмір смуги 35x245x10 з кутами пропилів 110° , 115° ; 4) початкова висота каналу – $h_0=6$ мм; 5) діаметри заготовок – $d_0=10, 15, 20, 30$ мм.

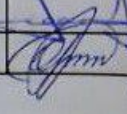
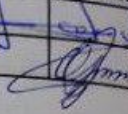
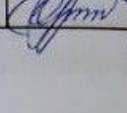
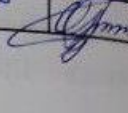
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) вступ; 2) стан питання граничного деформування металів при обробці тиском; 3) теоретичний спосіб визначення граничного деформування ізотропних матеріалів у процесах холодного листового штампування; 4) застосування теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесах холодного листового штампування при згинанні труб; 5) дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування; 6) економічна частина.

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

1) Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування (пл. ф.А1); 2) Теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування (пл. ф. А1); 3) Експериментальна верифікація теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування (2 пл. ф.А1); 4) Застосування теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесах холодного листового штампування при згинанні труб (2 пл. ф.А1); 5) Дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування (3 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	Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування	15.10.2024 р.	Виконано
3	Діаграма пластичності	4.11.2024 р.	Виконано
4	Теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	11.11.2024 р.	Виконано
5	Експериментальна верифікація теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	15.11.2024 р.	Виконано
6	Впровадження у програмний комплекс теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	18.11.2024 р.	Виконано
7	Застосування теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесах холодного листового штампування при згинанні труб	20.11.2024 р.	Виконано
8	Забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування	22.11.2024 р.	Виконано
9	Дослідження способу визначення пластичності металу, що забезпечує сталість показника напруженого стану в процесі деформування за допомогою комп'ютерного 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.	Виконано

Студент  Ілля РУСИН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

 Роман СИВАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.777.4:621.77.01

Русин І. Ю. Дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного листового штампування деталей спецтехніки. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2024. 125 с.

Укр. мовою. бібліогр.: 41 назв; рис.: 29; табл.: 3.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд стану питання граничного деформування металів при обробці тиском, розглянуто теоретичний спосіб визначення граничного деформування ізотропних матеріалів у процесах холодного листового штампування, виконана оцінка ступеня використання ресурсу пластичності трубної заготовки у процесах згинання прокаткованим на трубозгинальному верстаті, здійснено дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування. Запропонована теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування та експериментальна верифікація цієї теоретичної моделі. Аналітичне визначення форми каналу, що забезпечує сталість величини показника напруженого стану у процесі деформування. Виконано дослідження способу визначення пластичності металу радіальним видавлюванням у канал певної форми, що забезпечує сталість показника напруженого стану в процесі деформування за допомогою комп'ютерного моделювання.

Графічна частина складається з 10 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: ізотропний матеріал, граничне деформування, холодне листове штампування, ресурс пластичності, показник напруженого стану, накопичення пошкоджень.

ABSTRACT

Rusyn I. Yu. Research on the deformation of isotropic materials in the processes of cold sheet stamping of special equipment parts. Master's qualification work in the specialty 133 - industrial mechanical engineering, educational program - industrial mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2024. 125 p.

In Ukrainian. Bibliography: 41 titles; Fig.: 29; table: 3.

The master's qualification work reviewed the state of the issue of the ultimate deformation of metals during pressure processing, considered a theoretical method for determining the ultimate deformation of isotropic materials in cold sheet metal stamping processes, assessed the degree of use of the plasticity resource of a pipe blank in the processes of bending by pushing on a pipe bending machine, and studied the plasticity of the metal under the condition of ensuring the constancy of the value of the stress state indicator during the deformation process. A theoretical model of using the plasticity resource of an isotropic material in cold sheet metal stamping processes and experimental verification of this theoretical model were proposed. Analytical determination of the shape of the channel, which ensures the constancy of the value of the stress state indicator during the deformation process. A study of the method for determining the plasticity of a metal by radial extrusion into a channel of a certain shape, which ensures the constancy of the stress state indicator during the deformation process using computer modeling, was carried out.

The graphic part consists of 10 posters based on the research results.

Keywords: isotropic material, ultimate deformation, cold sheet metal stamping, plasticity life, stress state index, damage accumulation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 СТАН ПИТАННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТИСКОМ	12
1.1 Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування	12
1.1.1 Механічні теорії міцності (критерії миттєвої відмови).....	12
1.1.2 Енергетичні теорії руйнування.....	15
1.1.3 Деформаційні теорії руйнування.....	17
1.2 Діаграма пластичності	21
1.2.1 Показники напруженого стану та накопиченої деформації, застосовувані при побудові діаграм пластичності.....	22
1.2.2. Апроксимуючі діаграму пластичності функції.....	25
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ	29
2.1 Теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	29
2.2 Експериментальна верифікація теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	36
2.2.1 Матеріал дослідження.....	36
2.2.2 Визначення коефіцієнтів функції, що апроксимує поверхню пластичності для алюмінієвого сплаву АМг6.....	38
2.2.3 Математична обробка.....	44
2.2.4 Аналіз результатів.....	48
2.3 Впровадження у програмну систему теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування	49

3	ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ В ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ ПРИ ЗГИНАННІ ТРУБ.....	56
3.1	Матеріал дослідження	57
3.2	Комп'ютерне моделювання	58
3.3	Математична обробка результатів моделювання	61
3.4	Аналіз результатів.....	61
4	ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ПРИ УМОВІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ВЕЛИЧИНИ ПОКАЗНИКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ	62
4.1	Аналітичне визначення форми каналу, що забезпечує сталість величини показника напруженого стану у процесі деформування	62
4.2	Дослідження способу визначення пластичності металу радіальним видавлюванням у канал певної форми, що забезпечує сталість показника напруженого стану в процесі деформування за допомогою комп'ютерного моделювання.....	69
4.2.1	Матеріал дослідження.....	69
4.2.2	Комп'ютерне моделювання.....	70
4.2.3	Математична обробка результатів моделювання.....	76
4.2.4	Аналіз результатів.....	80
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	82
5.1	Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	82
5.2	Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	88
5.3	Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	95

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	97
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	108
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	113
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ.....	124

ВСТУП

Актуальність теми. Розв'язок проблеми створення високотехнологічної продукції, конкурентоспроможної на внутрішньому та на зовнішньому ринках є одним з найбільш важливих завдань машинобудівного комплексу, що сприяє реалізації стратегічного соціально-економічного плану розвитку галузі. Тому, внаслідок основних тенденцій розвитку сучасної спеціальної техніки, пов'язаних з розширенням сортаменту сплавів, що використовуються, часто малопластичних, та підвищенням вимог до якості металопродукції, проблема граничного деформування матеріалів під час обробки металів тиском набула великого значення. Неприпустимість порушення суцільності металу не тільки на макро-, але і на мікрорівні є ключовим фактором, що визначає надійність виробів при їх експлуатації. Так відзначено появу в процесі формозміни мікродефектів, що виявляються методом ультразвукового контролю та різко знижують експлуатаційні характеристики деталі. Водночас удосконалення технологій обробки металів тиском вимагає постійного пошуку резервів виробництва, ефективним інструментом якого є визначення ступеня використання ресурсу пластичності матеріалу, обґрунтоване збільшення якого дозволить скоротити кількість технологічних переходів та збільшити техніко-економічні показники.

Операції холодного листового штампування є широко поширеним різновидом технології обробки металів тиском. Для аналізу граничної формозміни в них широко використовуються результати технологічних випробувань, аналогічних тим, які метал зазнає під час обробки. Проте їх застосування вимагає наявності випробувального обладнання для проведення експериментів різних видів та великої кількості технологічного оснащення, а для багатьох процесів даний метод і зовсім непридатний. Так, наприклад, при витяжці деталей складної форми оцінка штампування неможлива, через локальний характеру виникнення граничних деформацій. Тому виник та отримав широке поширення підхід, заснований на визначенні діаграм

граничних деформацій процесів, але дослідження показують і його непридатність у ряді випадків. Іншим способом оцінки граничного деформування є застосування макроскопічних феноменологічних теорій руйнування, що класифікуються за трьома основними групами: механічні теорії міцності (миттєві критерії), енергетичні та деформаційні моделі. Як правило, точний результат дозволяють отримувати тільки кінематичні теорії розсіяного руйнування, що стосуються деформаційним теоріям. Ці теорії базуються на гіпотезі про феноменологічний взаємозв'язок явища руйнування та граничної деформації металу заготовки в залежності від величини показника напруженого стану, що визначається як відношення середнього нормального напруження до інтенсивності нормальних напружень. Їхні основи отримали розвиток, що полягає в уточненні математичного апарату для різних процесів. За допомогою досліджень у камері високого тиску встановлено, що залежність граничної деформації від показника напруженого стану, отримані з експериментів з різними параметрами Надаї-Лоде, не збігаються, що, можливо, пов'язано з невірним вибором показників накопиченої деформації та напруженого стану, а також з недостатньо повним обліком фізичної картини процесу накопичення дефектів деформаційного походження. В результаті чого практичне застосування теорій цього типу вимагає визначення залежності величини граничної деформації від показників напруженого стану та виду напруженого стану в широкому діапазоні зміни останніх, що стикається зі значними труднощами експериментального характеру.

Мета і завдання роботи. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесів холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки.

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

- вибір показників накопиченої деформації та напруженого стану, що дозволяють мінімізувати відносне відхилення діаграм пластичності, що відповідають різним видам напруженого стану;

- створення теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування, заснованого на уявленні про накопичення дефектів деформаційного походження; її експериментальна перевірка та оцінка ефективності;
- розробка розрахункового апарату оцінки граничного деформування заготовки за допомогою створеної теоретичної моделі на основі імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження. Процеси холодного листового штампування.

Предмет дослідження. Закономірності та теоретичні моделі формозміни заготовок при холодному листовому штампуванні.

Новизна одержаних результатів. Новизна одержаних результатів полягає у виявлених закономірностях граничних можливостей деформування ізотропних металів від механічних параметрів режиму обробки, що ґрунтуються на застосуванні уявлень про процес досягнення граничного деформування у вигляді стадій накопичення дефектів деформаційного походження, що накладаються, різного масштабного рівня.

1 СТАН ПИТАННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ОБРОБЦІ ТИСКОМ

1.1 Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування

В даний час наукове співтовариство сходиться на думці [1, 2], що основою математичного апарату для прогнозування граничного деформування у процесах обробки матеріалів тиском повинні бути феноменологічні теорії руйнування металу. Принцип їх побудови зводиться до висування гіпотези про переважний вплив певного показника механіки суцільного середовища (або їх комбінації) на досягнення граничного деформування, побудову розрахункового теоретичного апарату та експериментальної верифікації. Фізичні уявлення [3-7] використовуються лише для уточнення феноменологічних моделей.

Перші відомості про дослідження граничного деформування в рамках феноменологічного підходу відносяться ще до епохи відродження: відомо, що Галілей дійшов висновку, про переважний вплив найбільшого нормального напруження на досягнення граничного деформування в процесах згинання. Надалі цей висновок було доповнено та узагальнено на всі види напруженого стану [8]. Так з'явився перший напрямок феноменологічних теорій руйнування – механічні теорії міцності (миттєві критерії руйнування). У 1904 році Губер став засновником другого напрямку - енергетичних теорій руйнування [8], і вже в подальшому виник третій напрямок – деформаційні теорії руйнування [9].

1.1.1 Механічні теорії міцності (критерії миттєвої відмови)

Відповідно до механічних теорій міцності руйнування настає при досягненні певної характеристикою напруженого стану, чи його комбінацією критичної величини.

За першою класичною механічною теорією міцності, відомою як критерій Coulomb або Rankine [8, 10], руйнування настає при досягненні гранично

допустимого значення одним з головних напружень. Відповідно до чого, критерій граничного деформування визначається як:

$$\begin{cases} \sigma_1 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \\ \sigma_2 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \\ \sigma_3 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \end{cases} \quad (1.1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головне нормальне напруження ($\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$), МПа
 c_{111_1}, c_{111_2} – коефіцієнт.

За другою класичною механічною теорією міцності, заснованою Маріоттом та остаточно оформленою Сен-Венаном критерій граничного деформування можна записати як [8]:

$$\begin{cases} \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \\ \sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \\ \sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \end{cases} \quad (1.2)$$

де μ – коефіцієнт Пуасона,
 c_{111_3}, c_{111_4} – коефіцієнт.

У третій класичній механічній теорії міцності, запропонованій Tresca, за критерій граничного деформування приймається величина максимальних дотичних напружень [8, 10]:

$$\begin{cases} \tau_{12} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \\ \tau_{23} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \\ \tau_{13} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \end{cases} \quad (1.3)$$

де $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$ – максимальне дотичне напруження, що діє на площадці, нахилений під кутом 45° до головних осей, номери яких вказані в індексі, МПа;
 c_{111_5}, c_{111_6} – коефіцієнт.

В теорії Мора [8] запропоновано геометричний метод оцінки граничного деформування, що є удосконаленим варіантом теорії Tresca. Мор припустив, що руйнування виникає на площадках, що проходять через вісь середнього

головного напруження, з найбільшим головним дотичним напруженням, і що величина граничних дотичних напружень залежить від величини нормальних напружень у даній площадці. Таким чином, існує гранична крива $\alpha\beta$ (рис. 1.1), при перетині якої колом Мора максимального діаметра досягається граничне деформування.

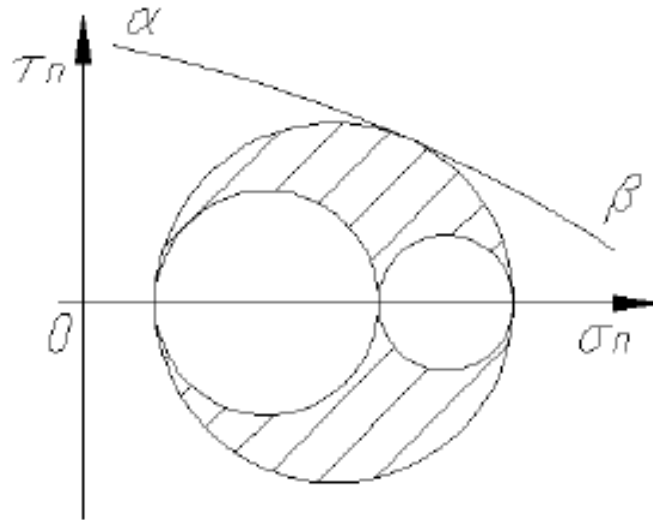


Рисунок 1.1 – Візуалізація геометричного методу оцінки граничного деформування, що пропонується в теорії Мора: σ_n , τ_n – відповідно, нормальне та дотичне напруження на площадці, МПа

Подальший розвиток механічних теорій міцності пішов шляхом включення до критеріїв інваріантних величин напруженого стану. Так, наприклад, виник критерій граничного деформування Mises [10]:

$$\sigma_i \geq c_{111_7}, \quad (1.4)$$

де σ_i – інтенсивність нормальних напружень, МПа;

c_{111_7} - коефіцієнт.

Механічні теорії міцності, зважаючи на те, що область їх застосування відповідає процесам з пружною деформацією, в теорії обробки матеріалів тиском застосовуються вкрай рідко і в більшості випадків результати, отримані з їх допомогою, не мають достатньої точності.

1.1.2 Енергетичні теорії руйнування

Наступним етапом розвитку теорій руйнування стала поява інтегральних феноменологічних критеріїв, що ґрунтуються на обчисленні величин, пов'язаних із питомою роботою пластичної формозміни.

Freudenthal одним з перших припустив, що граничне деформування необхідно оцінювати за величиною питомої роботи формоутворення [11]:

$$\int_0^{t_p} \sigma_i d\varepsilon_i = c_{112_1}, \quad (1.5)$$

де t_p – час деформування в момент руйнування, с;

c_{112_1} – коефіцієнт;

ε_i – ступінь деформації.

$$\varepsilon_i = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i dt, \quad (1.6)$$

де $\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації;

t – час деформування, с.

Cockcroft та Latham запропонували альтернативний варіант, що відображає важливість впливу найбільшого головного напруження на досягнення граничного деформування [12]:

$$\int_0^{t_p} \sigma_1 d\varepsilon_i = c_{112_2}, \quad (1.7)$$

де c_{112_2} – коефіцієнт.

Нормалізований варіант критерію Cockcroft-Latham [13]:

$$\int_0^{t_p} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i = c_{112_3}, \quad (1.8)$$

де c_{112_3} – коефіцієнт.

Критерій Brozzo [14] було отримано шляхом емпіричного ускладнення критерію (1.7):

$$\int_0^{t_p} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_{cp})} d\varepsilon_i = c_{112_4}, \quad (1.9)$$

де σ_{cp} – середнє нормальне напруження, МПа;

c_{112_4} – коефіцієнт;

В роботі [15] запропоновано варіант, заснований на середньому нормальному напруженні:

$$\int_0^{t_p} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) d\varepsilon_i = c_{112_5}, \quad (1.10)$$

де c_{112_5} – коефіцієнт.

Критерій Ayada [13] (нормалізований варіант критерію (1.10)):

$$\int_0^{t_p} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} d\varepsilon_i = c_{112_6}, \quad (1.11)$$

де c_{112_6} – коефіцієнт.

На відміну від механічних теорій міцності, енергетичні теорії враховують історію навантаження та дозволяють оцінювати граничне деформування твердих тіл у процесах монотонної пластичної деформації, що протікає у відносно постійних термомеханічних умовах. Вони дуже прості і не вимагають для свого застосування проведення великої експериментальної роботи, водночас, наслідком цього є не врахування ними ряду важливих особливостей поведінки металів під час деформування. Так, наприклад, критерії (1.7) – (1.11) нездатні передбачати граничне деформування при від'ємному середньому нормальному напруженні, а критерій (1.6) не враховує експериментально підтвердженого факту впливу на досягнення граничного деформування величини середнього нормального напруження.

1.1.3 Деформаційні теорії руйнування

Для прогнозування граничного деформування в умовах розвинутої пластичної деформації, набули поширення деформаційні критерії руйнування.

Фундаментальні дослідження деформованості металів без руйнування під час обробки тиском було виконано в роботі [8]. В цій роботі було запропоновано оцінювати вплив термомеханічних параметрів процесу на пластичність за допомогою величини, що розраховується як відношення суми величин показника накопиченої деформації на момент досягнення граничного деформування, що визначається виразом (1.22), у парних випробуваннях з показниками напруженого стану у вигляді рівняння (1.26), симетричними щодо нуля, до числа випробувань.

Ґрунтуючись на відомому факті впливу схеми напруженого стану, як на силу деформування, так і на пластичність, та розвиваючи погляди роботи [8], у теорії сформованій у роботі [9] запропоновано визначати граничну деформацію, в якості показника (1.22), як функцію відношення середнього питомого тиску на контактній поверхні до опору деформації.

В роботі [10] вважають, що критерій пластичності можна подати як відношення показника накопиченої деформації, що визначається виразом (1.23), до показника напруженого стану, у вигляді рівняння (1.28), яке буде однаковим за різних способів обробки металів тиском.

У роботі [9] було запропоновано на основі експериментального визначення інваріантних локальних характеристик напружено-деформованого стану будувати діаграму пластичності. Відповідно до їх теорії досягнення граничного деформування визначається виразом:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_p(\eta) \quad (1.12)$$

де η – показник напруженого стану, який визначається виразом

$$\eta = 3 \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i};$$

$\varepsilon_p(\eta)$ – діаграма пластичності матеріалу, показник накопиченої

деформації на момент руйнування який визначається виразом $\varepsilon_p = \varepsilon_i|_{t=t_p}$.

Згадані вище деформаційні теорії не враховують історію навантаження та мають ряд інших істотних недоліків [8]. Нині вони практично не застосовуються і мають швидше історичне значення як теорії, в яких вперше гранична накопичена деформація була поставлена в залежність від напруженого стану.

Якісний стрибок у розвитку деформаційної теорії руйнування зазнали кінематичні теорії розсіяного руйнування, що з'явилися в результаті "парадигмального щеплення" із суміжних галузей науки (теорії втомного руйнування та теорії повзучості), пов'язаних з розвитком уявлень про розсіяне руйнування та пошкодження, як певної скалярної величини.

Уявлення про пошкодження у деформаційних теоріях руйнування процесів обробки матеріалів тиском вперше використав Johnson-Cook [10], ввівши поняття – тріщинуватість ψ ($0 \leq \psi \leq 1$):

$$\Psi = \int_0^{t_p} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p(\eta)} = 1, \quad (1.13)$$

де $\Lambda_p(\eta)$ – діаграма пластичності матеріалу, показник накопиченої

деформації на момент руйнування якої визначається виразом $\varepsilon_p = \Lambda|_{t=t_p}$;

Λ – ступінь деформації зсуву:

$$\Lambda = \sqrt{3}\varepsilon_i \quad (1.14)$$

Пізніше в чисельник подінтегрального дробу критерію (1.13) було введено добуток функцій спадковості для врахування ефектів заліковування дефектів при холодному деформуванні та за рахунок явищ рекристалізації та дифузійних процесів, але оскільки вони не були визначені, у розрахунках їх приймають рівними одиниці [9].

Перевірка критерію (1.13) за допомогою двоетапного деформування з постійним показником напруженого стану на кожному етапі показала розбіжність його результатів з експериментальними [16], що свідчить про не виконання прийнятої в роботі [9] теорії лінійної залежності збільшення пошкодженості від відношення накопиченої деформації до граничної деформації.

Нелінійний характер накопичення пошкодженості було враховано в наступних критеріях:

- теорія В. А. Огороднікова [17] (або модель Hue-Wierzbicki):

$$\Psi = \int_0^{t_p} c_{113_1} \frac{\varepsilon_i^{c_{113_1}-1}}{\varepsilon_p^{c_{113_1}}(\eta)} d\varepsilon_i = 1, \quad (1.15)$$

де c_{113_1} - певна функція, яка залежить від "напрямку деформування";

- теорія запропонована в роботі [9]:

$$\Psi = \int_0^{t_p} c_{113_2} \frac{\Lambda^{c_{113_2}-1}}{\Lambda_p^{c_{113_2}}(\eta)} d\Lambda = 1, \quad (1.16)$$

де c_{113_2} - певна функція, значення якої залежить від фізико-хімічної природи деформованого металу, а також термомеханічних параметрів та характеру деформації;

- Теорія запропонована в роботі [16], отримана математичним перетворенням виразу (1.15) (модель GISSMO [18]):

$$\Psi = \int_0^{t_p} c_{113_1} \frac{\Psi^{(c_{113_1}-1)/c_{113_1}}}{\varepsilon_p(\eta)} d\varepsilon_i = 1, \quad (1.17)$$

- Теорія запропонована в роботах [19, 20]:

$$\Psi = \int_0^{t_p} \frac{c_{113_3}}{(1-\Psi)^{c_{113_4}} \Lambda_p(\eta)} d\Lambda = 1, \quad (1.18)$$

де c_{113_3}, c_{113_4} - коефіцієнт.

Критерії (1.15), (1.16) і (1.17) засновані на ступеневій залежності збільшення пошкодженості і не мають принципової різниці, тоді як критерій (1.18) – на гіперболічній.

У роботі [21] експериментально встановлено непридатність розглянутих вище критеріїв для випадків немонотонного деформування. Пошук рішення цієї проблеми призвів до чергового якісного стрибка у розвитку деформаційних теорій руйнування, пов'язаного з поданням пластичності як тензорної величини.

Припущення про тензорний характер пластичності вперше було використано в роботі [22]. Надалі дещо інший вид моделі руйнування, що отримала в літературі тензорно-лінійну назву, була запропоновано в роботі [21]. Варіант тензорно-нелінійної моделі накопичення пошкоджень розроблено в роботах [23-28]. Зважаючи на те, що процеси листового штампування наближено відносяться до випадків монотонного деформування [29], розгляд тензорних моделей руйнування у межах цієї роботи недоцільний.

Деформаційні теорії руйнування мають загальну ваду: вони засновані суто на феноменологічному взаємозв'язку руйнування та величини граничної накопиченої деформації та не враховують фізичну картину процесу, що найчастіше призводить до неправильних результатів. Так, наприклад, для випадків формозміни з показником напруженого стану відповідному області необмеженої пластичності по всіх деформаційним теоріям руйнування пошкодженість дорівнює нулю, як і для недеформованої заготовки, тим не менш, у структурі матеріалу щільність дефектів збільшено, що за наступної деформації з показником напруженого стану в області обмеженої пластичності призведе до більш швидкого досягнення граничного деформування, ніж, якби матеріал перебував у вихідному стані. При вирішенні згаданої проблеми було створено комбіновану теорію руйнування в роботі [16], основне рівняння якої виглядає наступним чином:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2, \quad (1.19)$$

де ψ_1 – складова пошкодженості, яка залежить від накопиченої деформації;

ψ_2 – складова пошкодженості, яка залежить від відношення $\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_p(\eta)}$.

Недолік критерію (1.19) у тому, що він не враховує необмежене зростання пластичності при показниках напруженого стану менших від певного значення. Так з виразу (1.19) випливає, що руйнування можливе в будь-якому процесі формозміни, необхідно лише досягти такої накопиченої деформації, при якому величина ψ_1 дорівнюватиме одиниці.

Також наслідком згаданого вище загального недоліку деформаційних теорій руйнування є необхідність проведення великої експериментальної роботи з визначення пластичності матеріалу в широких діапазонах зміни показника напруженого стану та виду напруженого стану, що стикається зі значними труднощами експериментального характеру, які, ймовірно, дозволяють усунути правильний вибір показників накопиченої деформації та напруженого стану і апроксимуючі діаграму пластичності функції.

1.2 Діаграма пластичності

Під пластичністю розуміється здатність металу при певних умовах пластично деформуватися без руйнування у вигляді макроскопічних порушень суцільності [5]. Пластичність залежить від низки термомеханічних параметрів процесу. Одним із основних факторів є напружений стан матеріалу. Його вплив характеризується діаграмою пластичності, що відображає залежність накопиченої до моменту руйнування деформації від показника напруженого стану, незмінного у процесі деформування.

Велика різноманітність у теорії пластичності величин, що характеризують напружено-деформований стан, зумовило застосування множини різних показників напруженого стану та накопиченої деформації при побудові діаграм пластичності.

1.2.1 Показники напруженого стану та накопиченої деформації, застосовувані при побудові діаграм пластичності

В якості міри накопиченої на момент руйнування деформації ε_p більшість дослідників застосовують ступінь деформації у момент руйнування, або величину, що відрізняється від неї постійним множником. Так:

- за J. R. Trice та ін. [30]:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i \Big|_{t=t_p} ; \quad (1.20)$$

- за роботою [8]:

$$\varepsilon_p = \Lambda \Big|_{t=t_p} . \quad (1.21)$$

Показники, відмінні від наведених вище, були запропоновані наступними дослідниками:

– в роботі [8]:

$$\varepsilon_p = c_{121_1} \varepsilon_1 \Big|_{t=t_p} ; \quad (1.22)$$

де c_{121_1} - коефіцієнт;

- в роботі [9]:

$$\varepsilon_p = g_{окт} \Big|_{t=t_p} ; \quad (1.23)$$

де $g_{окт}$ – октаедричний зсув;

$$g_{окт} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} . \quad (1.24)$$

Для визначення величини показника напруженого стану η відомі такі вирази:

- за Я. Б. Фрідманом [17]:

$$\eta = \frac{\tau_{13}}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)} ; \quad (1.25)$$

- за роботами [8]:

варіант №1 [2]

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{|\sigma_{max}|} \quad (1.26)$$

де σ_{max} – максимальне за абсолютною величиною головне напруження, МПа;
варіант №2 [2]

$$\eta = 1 - \frac{\tau_{13}}{|\sigma_{max}|} \quad (1.27)$$

- по роботам [7]:
варіант №1 [8]

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (1.28)$$

де σ_{max} – максимальне за абсолютною величиною головне напруження, МПа;
варіант №2 [17]

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\mu_\sigma \sigma_i} \quad (1.29)$$

де μ_σ – параметр Надаї-Лоде;
- по О. В. Грушко [31]:

$$\eta = \frac{c_{121_2}\sigma_1 + c_{121_3}\sigma_2 + c_{121_4}\sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1.30)$$

де c_{121_2} , c_{121_3} , c_{121_4} - коефіцієнт.

Різними дослідниками були запропоновані вирази для визначення показника напруженого стану як функції середнього нормального напруження та інтенсивності нормальних напружень. Так:

- за Н. Dell та ін. [32, 33]:

варіант №1

$$\eta = \frac{1 - c_{121_5} \sigma_{cp} / \sigma_i}{\tau_{13} / \sigma_i}, \quad (1.31)$$

де c_{121_5} - коефіцієнт.
варіант №2

$$\eta = \frac{1 - c_{121_6} \sigma_{cp} / \sigma_i}{\sigma_1 / \sigma_i}, \quad (1.32)$$

де c_{121_6} - коефіцієнт.

- за F. A. McClintock [17]:

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (1.33)$$

- по роботі [18]:

$$\eta = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (1.34)$$

- по роботі [19]:

$$\eta = 3 \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (1.35)$$

- по роботі [20]:

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} \quad (1.36)$$

Останнім часом частіше віддають перевагу показникам напруженого стану у вигляді функцій відношення середнього нормального напруження та інтенсивності нормальних напружень, оскільки вони є інваріантними величинами тензора та девіатора напружень, відповідно. Зазначимо, що як наголошено у роботі [2], немає підстав вважати такий вибір обґрунтованим. Більш обґрунтованим є вибір виразу, що дозволяє отримати єдину діаграму пластичності для різних видів напруженого стану, чого, у разі застосування виразів (1.33) – (1.36), досягти не вдається. Рішення даної проблеми окремі дослідники бачать у застосуванні поверхні пластичності, додатковим уведенням на розгляд різних виразів для визначення показника виду напруженого стану χ [9, 10, 17, 18, 34-39], які в основному є функціями відношення третього і другого інваріантів девіатора напружень і які мають принципову різницю. Проте, як зазначалося, побудова повної поверхні пластичності зустрічає низку труднощів експериментального характеру [17].

1.2.2 Апроксимуючі діаграму пластичності функції

З другої половини XX століття багатьма вченими, як вітчизняними, так і зарубіжними, проводилися роботи з експериментального визначення пластичності різних металів, внаслідок чого були розроблені різні варіанти апроксимуючих діаграму пластичності функцій $\varepsilon_{p\phi}$, зручних для використання в аналітичних розрахунках. З літературних джерел відомі апроксимуючі функції діаграми пластичності у наступних дослідженнях:

– в роботі [2]:

$$\varepsilon_{p\phi} = 2c_{122_1} e^{-0,72\eta} \quad (1.37)$$

де c_{122_1} - коефіцієнт;

η – показник напруженого стану, який визначається виразом (1.33) – (1.36);

- в роботі [3]:

варіант №1 -

$$\varepsilon_{p\phi} = \begin{cases} c_{122_2} + c_{122_3}\eta + c_{122_4}\eta^2, & 0 \leq \eta, \\ c_{122_5} e^{c_{122_6}\eta}, & \eta \leq 0; \end{cases} \quad (1.38)$$

де c_{122_2} , c_{122_3} , c_{122_4} , c_{122_5} , c_{122_6} - коефіцієнт;

варіант №2 -

$$\varepsilon_{p\phi} = c_{122_7} + c_{122_8}\eta + c_{122_9}\eta^2 + c_{122_10}\eta^3, \quad (1.39)$$

де c_{122_7} , c_{122_8} , c_{122_9} , c_{122_10} - коефіцієнт;

- в роботі [4]:

$$\varepsilon_{p\phi} = \frac{c_{122_11}c_{122_12}}{c_{122_11} + \eta(c_{122_11} - ec_{122_12})} e^{-\eta}, \quad (1.40)$$

де c_{122_11} , c_{122_12} – коефіцієнт;

$$c_{122_11} > ec_{122_12} \quad (1.41)$$

- В. А. Огороднікова [17]:

$$\varepsilon_{p\Phi} = \begin{cases} c_{122_13} e^{-\ln(c_{122_13}/c_{122_14})\eta}, & 0 \leq \eta, \\ c_{122_13} e^{\ln(c_{122_15}/c_{122_13})\eta}, & e \leq c_{122_15}/c_{122_13} \cap \eta < 0, \\ c_{122_13} \left[2 - (2 - c_{122_15}/c_{122_13})\eta \right], & c_{122_15}/c_{122_13} < e \cap \eta < 0; \end{cases} \quad (1.42)$$

де c_{122_13} , c_{122_14} , c_{122_15} - коефіцієнт;

– В. М. Михалевича та ін. [40]:

варіант №1 -

$$\varepsilon_{p\Phi} = \begin{cases} c_{122_16} (c_{122_16}/c_{122_17})^\eta, & \eta \leq 0, \\ c_{122_16} e^{-0,72\eta}, & 0 < \eta; \end{cases} \quad (1.43)$$

де c_{122_16} , c_{122_17} - коефіцієнт;

варіант №2 -

$$\varepsilon_{p\Phi} = \begin{cases} c_{122_16} (c_{122_16}/c_{122_17})^\eta, & \eta \leq 0, \\ c_{122_16} e^{-0,72\eta^2} (c_{122_16}/c_{122_17})^{\eta(1-\eta)}, & 0 < \eta; \end{cases} \quad (1.44)$$

варіант №3 -

$$\varepsilon_{p\Phi} = \begin{cases} c_{122_16} (c_{122_16}/c_{122_17})^\eta, & \eta \leq 0, \\ c_{122_16} (c_{122_18}/c_{122_16})^{\eta^2} (c_{122_16}/c_{122_17})^{\eta(1-\eta)}, & 0 < \eta; \end{cases} \quad (1.45)$$

де c_{122_18} - коефіцієнт;

варіант №4 -

$$\varepsilon_{p\Phi} = c_{122_16} \left(\frac{c_{122_18}}{c_{122_17}} \right)^{\eta/2} \left(\frac{c_{122_18} c_{122_17}}{c_{122_16}^2} \right)^{\eta^2/2}, \quad (1.46)$$

варіант №5 -

$$\varepsilon_{p\Phi} = c_{122_16} \left[\frac{(1-\eta)c_{122_17}}{2c_{122_16}} + \frac{(1+\eta)c_{122_16}}{2c_{122_18}} \right]^{-\eta}, \quad (1.47)$$

- в роботі [16]:

$$\varepsilon_{pf} = c_{122_19} \left[\frac{1}{\eta - c_{122_20}} - \frac{1}{c_{122_21} - c_{122_20}} \right], \quad (1.48)$$

де c_{122_19} , c_{122_20} , c_{122_21} - коефіцієнт;
- в роботі [31]:

$$\varepsilon_{pf} = c_{122_22} \cdot c_{122_3}^{3\eta-1} \quad (1.49)$$

де c_{122_22} , c_{122_23} - коефіцієнт.
- J.R. Rice та ін. [32]:

$$\varepsilon_{pf} = c_{122_24} \cdot e^{c_{122_25}\eta} \quad (1.50)$$

де c_{122_24} , c_{122_25} - коефіцієнт;
- T. Wierzbicki та ін. [30]:

$$\varepsilon_{pf} = c_{122_26} \cdot \eta^{c_{122_27}} \quad (1.51)$$

де c_{122_26} , c_{122_27} - коефіцієнт.

В даний час перевагу якогось із розглянутих рівнянь не визначено, проте необхідно зазначити таке:

1. Відповідно до роботи [2], рівняння (1.37) погано узгоджується з експериментальними даними.

2. Відповідно до В. А. Огородникова [33] та інших лише у рівнянні (1.42) коефіцієнти мають фізичне значення.

3. В роботі [3] при визначенні рівняння (1.48) вводиться величина показника напруженого стану, при якій відбувається крихке руйнування без пластичної деформації, чого не враховують інші рівняння. Але з рівняння (1.48) випливає, що при η більшому величини показника напруженого стану відповідному крихкому руйнуванню пластичність негативна та, при застосуванні критеріїв руйнування, заснованих на накопиченій деформаційній пошкодженості, відбувається відновлення ресурсу пластичності, що є необґрунтованим з фізичної точки зору.

4. Очевидно, що рівняння з великою кількістю коефіцієнтів краще описують експериментальні дані, але їх застосування ускладнене необхідністю випробувань матеріалу при складному напруженому стані [2].

5. Подані вище функції мають властивості або монотонного спадання, або безперервного диференціювання, або й тим, і іншим, що не узгоджується з експериментальними даними для процесів з плоским напруженим станом [30]. Так для цих процесів було запропоновано наступні рівняння:

- за Y. Вao та ін. [30]:

$$\varepsilon_{p\phi} = \begin{cases} \infty, & \eta \leq -1/3, \\ c_{122_28}(\eta + 1/3)^{c_{122_29}}, & -1/3 < \eta \leq 0, \\ c_{122_30}\eta^2 - c_{122_31}\eta + c_{122_32}, & 0 < \eta \leq c_{122_33}, \\ c_{122_34}\eta^{-1}, & c_{122_33} < \eta; \end{cases} \quad (1.52)$$

де c_{122_28} , c_{122_29} , c_{122_30} , c_{122_31} , c_{122_32} , c_{122_33} , c_{122_34} – коефіцієнт;

- за H. Yu та ін. [34]:

$$\varepsilon_{p\phi} = \begin{cases} \infty, & \eta \leq -1/3, \\ c_{122_35}/(\eta + 1/3), & -1/3 < \eta \leq 0, \\ c_{122_35} + (c_{122_36} - c_{122_35})(\eta/c_{122_37})^2, & 0 < \eta \leq c_{122_37}, \\ c_{122_36} c_{122_37}/\eta, & c_{122_37} < \eta; \end{cases} \quad (1.53)$$

де c_{122_35} , c_{122_36} , c_{122_37} – коефіцієнт.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОЇ ЛИСТОВОЇ ШТАМПОВКИ

Як зазначалося математичний апарат оцінки граничного деформування в процесах обробки тиском, повинен базуватися на феноменологічній теорії руйнування. Але проведений у підрозділі аналіз показав, що, незважаючи на існування великої кількості різноманітних макроскопічних феноменологічних теоретичних моделей руйнування, всі вони мають суттєві недоліки, що роблять їх застосування при аналізі технологій листового штампування не доцільним. Так точний результат у процесах із розвиненою пластичною деформацією дозволяють отримувати тільки кінематичні теорії розсіяного руйнування, але їх застосування пов'язані з труднощами експериментального характеру.

Таким чином, метою даного розділу було створення теоретичного способу визначення граничного деформування ізотропного матеріалу у процесах холодного листового штампування, позбавленого згаданого недоліку.

Для цього було зроблено наступне:

- сформульовано теоретичну модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування;
- виконано її експериментальну верифікацію та оцінку ефективності;
- сформульована модель впроваджена у програмний комплекс моделювання процесів обробки металів тиском.

2.1 Теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування

Як уже зазначалося, основним недоліком кінематичних феноменологічних моделей розсіяного руйнування є те, що вони засновані на феноменологічному зв'язку явища руйнування з величиною граничної пластичної деформації залежно від напруженого стану. Внаслідок чого для

свого застосування вони вимагають проведення великої дослідницької роботи з виявлення даного взаємозв'язку у всьому діапазоні зміни напруженого стану, характерного для аналізованого процесу, що стикається з труднощами експериментального характеру.

Для усунення згаданого недоліку побудова нової моделі оцінки граничного деформування проводилася, виходячи з більш точного врахування уявлень про накопичення дефектів деформаційного походження. Так у процесі деформування, що передує поділу тіла на частини, або появі тріщини або пори, що виявляється неозброєним поглядом, можна виділити стадії, поступово накладаються одна на іншу, різні по масштабу структурних неоднорідностей матеріалу [7, 35]:

- деформація, що супроводжується збільшенням щільності точкових та лінійних дефектів, їх концентрацією з утворенням розривів та появою дефектів мікрорівня;
- збільшення щільності мікроефектів, їх зростання та злиття з утворенням дефектів макрорівня;
- збільшення щільності макроефектів, їх зростання та злиття з утворенням магістральна тріщина.

Створена модель розглядає перші дві стадії, оскільки врахування третьої проводиться зміною моделі напівфабрикату шляхом видалення частини металу, що досягла критичного стану.

В основу моделі покладено наведені нижче експериментально підтверджені факти та гіпотези.

1 Зважаючи на побудову теоретичної моделі в рамках механіки суцільної середовища з неї були перейняті наступні гіпотези [36]:

- 1.1 Об'єм, який займає тіло, безперервно заповнений матерією.
- 1.2 У вихідному стані, до прикладання навантаження, компоненти тензорів напруженого та деформованого стану дорівнюють нулю.
- 1.3 Властивості матеріалу у будь-якому напрямку однакові.
- 1.4 Механічні характеристики матеріалу незмінні в аналізованій області.

2 Теоретична модель, що розробляється, відноситься до групи кінематичних теорій розсіяного руйнування, та можливість досягнення граничного деформування в ній оцінюється за допомогою певної величини ψ , що має такі властивості:

2.1 Величина ψ характеризує використаний ресурс пластичності, причому [37]:

$$\psi|_{t=0} = 0; \psi|_{t=t_p} = 1. \quad (2.1)$$

2.2 Дотримуючись робіт [8, 16] величина ψ прийнята в наступному вигляді:

$$\psi = \psi_1 - \psi_2, \quad (2.2)$$

де ψ_1 – величина, що характеризує збільшення дефектів деформаційного походження;

ψ_2 – величина, що характеризує відновлений ресурс пластичності за рахунок заліковування мікроефектів при холодній деформації.

2.2.1 Відповідно до розглянутого вище подання процесу руйнування величину ψ_1 у процесі деформування представили як:

$$\frac{d\psi_1}{d\varepsilon} = \psi_1 \psi_2 \psi_3, \quad (2.3)$$

де ψ_1 – величина, що характеризує кількість зародків мікроефектів;

ψ_2 – величина, що характеризує швидкість зростання мікроефектів;

ψ_3 – величина, що характеризує злиття мікроефектів;

ε – величина, що характеризує накопичену деформацію.

Розв'язавши представлене диференціальне рівняння першого роду з змінними, що розділяються, для величини ψ_1 отримали наступний вираз:

$$\psi_1 = \int_0^t \psi_1 \psi_2 \psi_3 d\varepsilon + c_{31_1}, \quad (2.4)$$

де c_{31_1} - коефіцієнт.

З виразу (2.4) з урахуванням гіпотез 1.1, 1.2 та 2.1 отримали:

$$0 = 0 + c_{31_1} - 0 \Rightarrow c_{31_1} = 0 \Rightarrow \Psi_1 = \int_0^t \psi_1 \psi_2 \psi_3 d\varepsilon. \quad (2.5)$$

2.2.1.1 Відповідно до робіт [5, 38], утворення зародків мікродефектів ініціюється з появою перших актів пластичної деформації, відповідно до цього, були розроблені різні механізми зародження. Загальним для яких є те, що утворенню зародків мікродефектів передуює пластична деформація. Таким чином, очевидно, що величину ψ_1 доцільно визначати як:

$$\psi_1 = f_{31_1}(\varepsilon), \quad (2.6)$$

де $f_{31_1}(\varepsilon)$ – функція, що виражає залежність між кількістю зародків мікродефектів та величиною, що характеризує накопичену деформацію.

2.2.1.2 Ряд досліджень, у тому числі випробування з розтягування та кручення в камері високого тиску, виконані в роботі [9], вказують на суттєвий вплив на зростання зародків мікродефектів показників напруженого стану та виду напруженого стану. У відповідно до висновків підрозділу їх вплив врахували за допомогою безрозмірних показників η та χ . Таким чином, величину ψ_2 визначили як:

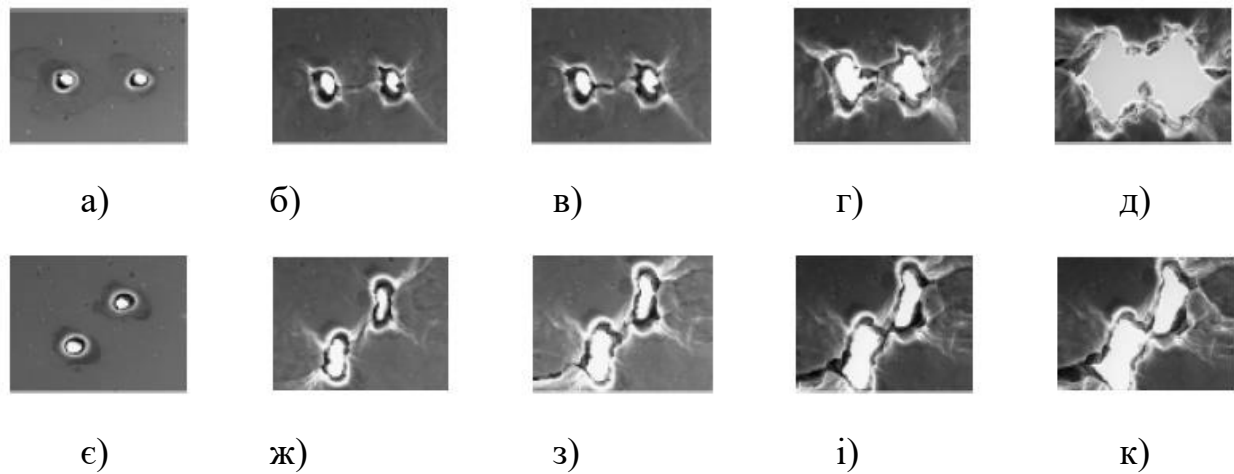
$$\psi_2 = f_{31_2}(\eta) f_{31_3}(\chi), \quad (2.7)$$

де $f_{31_2}(\eta)$, $f_{31_3}(\chi)$ – функція, що характеризує вплив на швидкість зростання мікродефектів величини, відповідно, показника напруженого стану та виду напруженого стану.

2.2.1.3 Злиття мікродефектів завершує процес вичерпання ресурсу пластичності. Результати експериментальних спостережень, наведені на рис. 2.1 [39], вказують на існування двох можливих механізмів злиття мікродефектів: утяжка перемичок між мікродефектами, спричинена дією максимального головного напруження, і зсувне злиття порожнин під дією максимального дотичного напруження.

Також ці два механізми спостерігали автори робіт [30, 31] у випробуваннях на стиск, зсув і розтягування циліндричних гладких зразків та

зразків з виточкою. Фактором, що керує типом механізму, за яким відбувається злиття мікродефектів, є величина показника напруженого стану [30, 31].



два отвори орієнтовані під 90° до напрямку розтягування (вертикалі): а - 0; б - 0,204; в - 0,213; г - 0,220; д - 0,223;

два отвори орієнтовані під 45° до напрямку розтягування (вертикалі): е - 0; ж - 0,233; з - 0,234; і - 0,235; до - 0,237

Рисунок 2.1 – Зображення отримані методом растрової електронної мікроскопії фрагмента деформованої заготовки з алюмінієвого сплаву 5052, що містить поля отворів різної орієнтації, при різних ступенях деформації

З урахуванням вище викладеного для визначення величини ψ_2 , що характеризує злиття мікродефектів, прийнято такий вираз:

$$\psi_3 = f_{31_4}(\eta) \frac{\sigma_1}{2\sigma} + (1 - f_{31_4}(\eta)) \frac{\tau_{13}}{\sigma} = f_{31_4}(\eta) \frac{\sigma_3}{2\sigma} + \frac{\tau_{13}}{\sigma}, \quad (2.8)$$

де $f_{31_4}(\eta)$ – функція, що регулює тип механізму, яким протікає процес злиття мікродефектів;

σ – нормуюча величина, що характеризує напружений стан матеріалу, МПа.

Підставивши вирази (2.6), (2.7) і (2.8) (2.5) в отримане рівняння в (2.2) для остаточного визначення величини використання ресурсу пластичності було отримано такий вираз:

$$\Psi = \int_0^t f_{31_1}(\varepsilon) f_{31_2}(\eta) f_{31_3}(\chi) \left(f_{31_4}(\eta) \frac{\sigma_3}{2\sigma} + \frac{\tau_{13}}{\sigma} \right) d\varepsilon - \Psi_2 \quad (2.9)$$

Вираз (2.9) це загальний вигляд розробленої моделі використання ресурсу пластичності ізотропних металів у процесах обробки металів тиском. Для її конкретизації при холодному листовому штампуванні були задані функції і характеристики напруженого стану та накопиченої деформації, що неї входять.

Так відповідно до роботи [17], експериментально встановлено, що в випадках монотонного деформування, до яких приблизно відносяться процеси листового штампування [29], залікуванням мікродефектів можна знехтувати:

$$\psi_2 = 0. \quad (2.10)$$

Як показали експериментальні спостереження [36], для монотонних процесів деформування з досить високою точністю справедлива гіпотеза єдиної кривої, відповідно до якої, в якості нормуючих величин напруженого стану та накопиченої деформації, були прийняті інтенсивність нормальних напружень та ступінь деформації:

$$\sigma = \sigma_i; \varepsilon = \varepsilon_i. \quad (2.11)$$

З експериментальних спостережень за допомогою електронної мікроскопії, що просвічує, наведених у роботі [38], випливає, що функція $f_{31_1}(\varepsilon)$ залежності кількості зародків мікродефектів від накопиченої деформації має вигляд:

$$f_{31_1}(\varepsilon) = c_{31_2} \varepsilon + c_{31_3}, \quad (2.12)$$

де c_{31_2} , c_{31_3} - коефіцієнт.

З урахуванням гіпотези з виразу (137) маємо:

$$f_{31_1}(0) = c_{31_2} 0 + c_{31_3} = 0 \Rightarrow c_{31_3} = 0 \Rightarrow f_{31_1}(\varepsilon) = c_{31_2} \varepsilon. \quad (2.13)$$

В якості функції $f_{31_2}(\eta)$, що характеризує вплив показника напруженого стану на швидкість зростання мікродефектів, прийнята функція апроксимації діаграми пластичності, запропонована J. R. Rice та ін [32]:

$$f_{31_2}(\eta) = c_{122_24} e^{c_{122_25}\eta} \quad (2.14)$$

Вибір виду функції $f_{31_3}(\chi)$ проводився виходячи із забезпечення найменшого відхилення від експериментальних результатів, представлених у підрозділі, у результаті було отримано таке рівняння:

$$f_{31_3}(\chi) = \cos^2(c_{31_4}\chi + c_{31_5}) \quad (2.15)$$

де c_{31_4}, c_{31_5} - коефіцієнт.

Відповідно до робіт [33, 34], функція $f_{31_4}(\eta)$ прийнята у вигляді:

$$f_{31_4}(\eta) = \begin{cases} 0, & \eta \leq c_{31_6} \\ 1, & c_{31_6} \leq \eta \end{cases} \quad (2.16)$$

де c_{31_6} – коефіцієнт (відповідно до [30]) $c_{31_6} \geq \frac{1}{3}$.

Підставивши вирази (2.10), (2.11), (2.13), (2.14), (2.15) і (2.16) в (2.9), враховуючи те, що в процесах з плоским напруженим станом, при показнику напруженого стану більшому $\frac{1}{3}$ мінімальне головне напруження дорівнює нулю, а при показнику напруженого стану меншому або рівному $\frac{1}{3}$ функція $f_{31_4}(\eta)$ дорівнює нулю, для визначення ступеня використання ресурсу пластичності ψ при холодному листовому штампуванні отримано наступний вираз:

$$\Psi = c_{31_7} \int_0^t \cos^2(c_{31_4}\chi + c_{31_5}) e^{c_{122_25}\eta} \frac{\tau_{13}}{\sigma_i} \varepsilon_i d\varepsilon_i. \quad (2.17)$$

де $c_{31_7} = c_{122_24} c_{31_4}$ – коефіцієнт (2.18)

Таким чином, застосування основних гіпотез та передумов, що враховують сучасні уявлення про фізичну природу накопичення дефектів

деформаційного походження при деформуванні у термінах механіки суцільного середовища, дозволило розробити теоретичну модель використання ресурсу пластичності ізотропних металів у процесах обробки тиском у загальному вигляді – вираз (2.9), а з наступною конкретизацією для процесів холодного листового штампування – вираз (2.17).

2.2 Експериментальна верифікація теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування

2.2.1 Матеріал дослідження

Перевірку та оцінку ефективності розробленої моделі здійснювали зіставленням витікаючої з неї залежності величини граничної деформації від показника η з експериментально отриманою діаграмою пластичності для процесів із плоским напруженим станом. Так само, для проведення порівняльного аналізу, аналогічним чином було виконано оцінка ефективності існуючих макроскопічних феноменологічних моделей руйнування. З розгляду було виключено механічні теорії міцності, зважаючи на їх непридатність для завдань обробки тиском, і, відповідно до висновків підрозділу, оцінка ефективності деформаційних критеріїв руйнування проводилася на основі існуючих апроксимуючих діаграму пластичності функцій.

З виразу

$$\eta = \begin{cases} (\chi - 3) / \left(6\sqrt{(\chi + 1)^2 / 4 + (\chi + 1)/2} \right), \\ (2 - 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 3} \right), \\ (1 + 2/(1 + \chi)) / \left(3\sqrt{4/(1 + \chi)^2 - 2/(1 + \chi) + 1} \right). \end{cases} \quad (2.19)$$

впливає, що при плоскому напруженому стані максимально можлива величина показника η дорівнює $\eta = \frac{2}{3}$, а відповідно до роботи [31], у процесах з показником $\eta < -\frac{1}{3}$ руйнування не відбувається. Таким чином, у дослідженні був прийнятий наступний діапазон зміни показника напруженого стану:

$$\eta \in \left(-\frac{1}{3}; \frac{2}{3}\right). \quad (2.20)$$

В якості досліджуваного матеріалу у роботі прийнятий широко поширений алюмінієвий деформований сплав АМг6, що відноситься до сплавів системи легування Al-Mg, що володіє невисокою міцністю та хорошою пластичністю, зварюваністю та корозійною стійкістю, що зміцнюється холодною пластичною деформацією [55]. АМг6 є найміцнішим сплавом системи. У відпаленому стані матеріал характеризується високою технологічною пластичністю, деформація ж, різко підвищує властивості міцності та значно знижує пластичність. У зв'язку з цим, вихідний матеріал зразків піддавався високому відпалу в однокамерній електричній печі за наступним режимом: режим нагрівання – одноступінчастий двоперіодний з постійною швидкістю нагріву на першому періоді та постійною температурою печі на другому; тривалість першого періоду – 1,5 год; тривалість другого періоду – 1,5 год; температура печі на другому періоді - 330 ° С; охолодження - з піччю [36].

Також у дослідженні розглядалися алюмінієвий сплав Д16 та сталь А710, необхідні властивості яких були запозичені з літературних джерел.

Апроксимуюча поверхня пластичності досліджуваних металів, відповідно до роботи [36], прийнята у вигляді функції:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = & \left[1/2 \left(c_{321_1} e^{-c_{321_2} \eta} + c_{321_5} e^{-c_{321_6} \eta} \right) - c_{321_3} e^{-c_{321_4} \eta} \right] \bar{\theta}^2 + \\ & + 1/2 \left(c_{321_1} e^{-c_{321_2} \eta} - c_{321_5} e^{-c_{321_6} \eta} \right) \bar{\theta} + c_{321_3} e^{-c_{321_4} \eta}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де $\bar{\theta}$ – параметр виду напруженого стану, який визначається як:

$$\bar{\theta} = 1 - 2/\pi \cdot \arccos \left[\chi(\chi - 3)(\chi + 3) / (\chi^2 + 3)^{3/2} \right]; \quad (2.22)$$

$c_{321_1}, c_{321_2}, c_{321_3}, c_{321_4}, c_{321_5}, c_{321_6}$ – коефіцієнт: для алюмінієвого сплаву Д16, відповідно до роботи [36]:

$$\begin{aligned} c_{321_1} &= 0,5862, c_{321_2} = 1,3576, c_{321_3} = 0,217, c_{321_4} = 0,04, \\ c_{321_5} &= 0,4859, c_{321_6} = 0,7; \end{aligned} \quad (2.23)$$

для сталі А710, відповідно до роботи [36]:

$$\begin{aligned} c_{321_1} &= 3,6421, c_{321_2} = 0,6892, c_{321_3} = 2,5492, c_{321_4} = 0,5627, \\ c_{321_5} &= 2,4659, c_{321_6} = 0,6986. \end{aligned} \quad (2.24)$$

для алюмінієвого сплаву АМг6 коефіцієнти визначені експериментально та представлені нижче.

2.2.2 Визначення коефіцієнтів функції, що апроксимує поверхню пластичності для алюмінієвого сплаву АМг6

Визначення коефіцієнтів функції (2.21) для сплаву АМг6 здійснювалося методом розтягування спеціальних смуг, розглянутому в підрозділі. Для проведення експериментальних робіт було виготовлено зразки, представлені на рис. 2.2, двох типорозмірів: 25x245x10 – 6 штук з кутами нахилу пропилів відповідно – 0, 60, 65, 75, 90 і 95; 35x245x10 – 2 штуки з кутами нахилу пропилів – 110° і 115°.

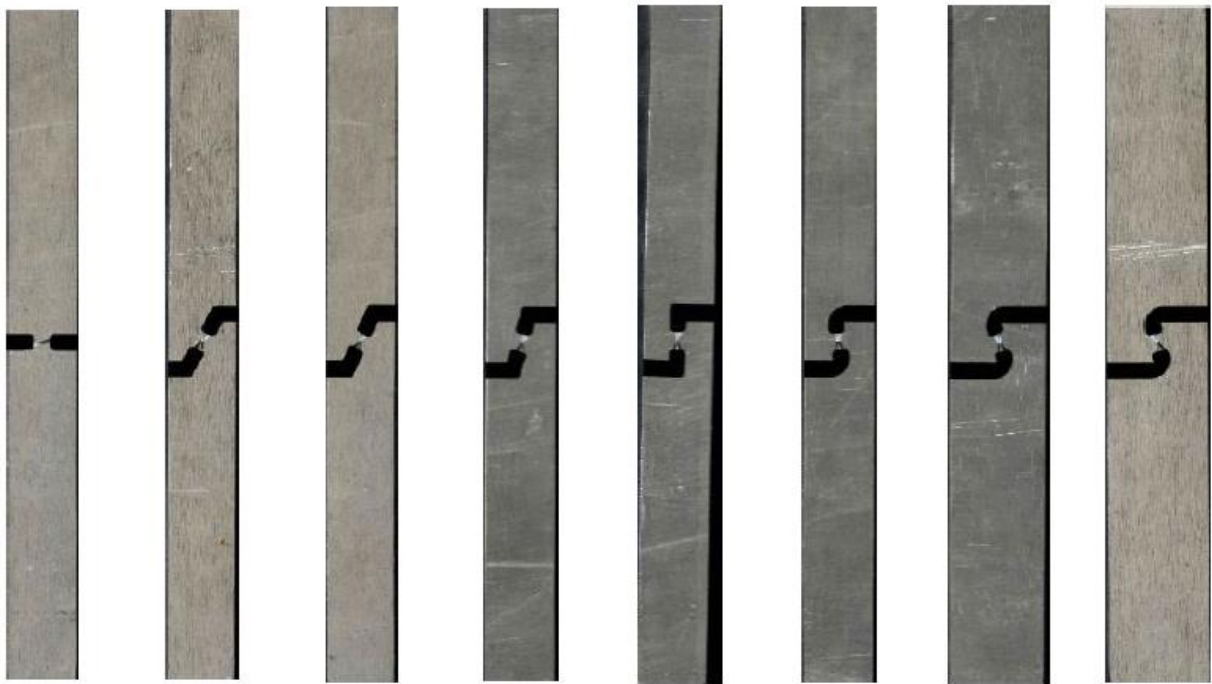
Вибір кутів нахилу пропилів та ширини зразків проводився на основі обробки результатів чисельних експериментів у спеціалізованій програмній системі, аналогічно підрозділу. При цьому діаграма пластичності використовувалася у вигляді нижче представленої функції, коефіцієнти якої визначалися подібно коефіцієнтам функції

$$\varepsilon_p(\eta) = 1,146e^{-0,871\eta} + 0,031. \quad (2.25)$$

на основі експериментальних результатів для алюмінієвого сплаву АМг5В, представлених у роботі [8]:

$$\varepsilon_p = 0,855e^{-0,908\eta} + 0,060. \quad (2.26)$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона дослідних даних та апроксимуючої функції (2.26) становив 98,609%.



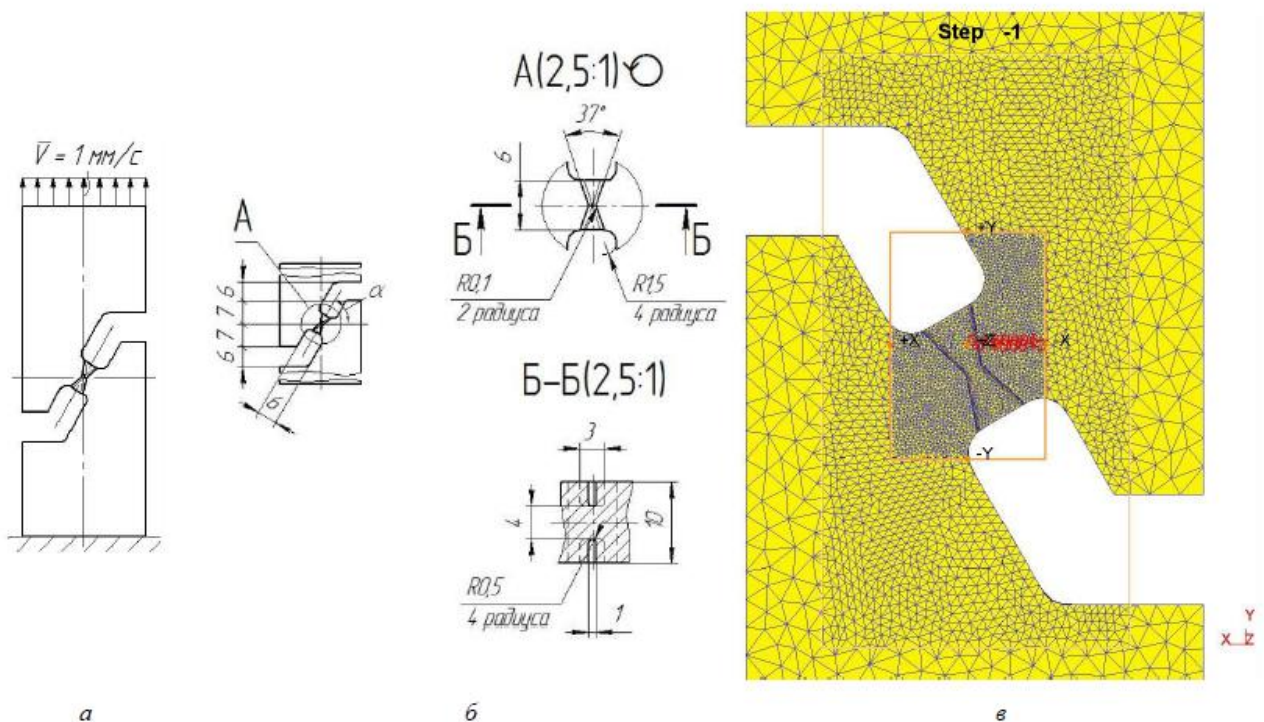
а - 0 °; б - 60 °; в - 65 °; г - 75 °; д - 90 °; е - 95 °; ж - 110 °; з - 115 °

Рисунок 2.2 – Експериментальні зразки

Експериментальні роботи виконувалися на випробувальній машині, фіксація зразків у захват якої здійснювалася самозаклинними затискачами, у зв'язку з чим, для більш точного визначення машинної діаграми, застосовувався екстензометр.

Визначення параметрів напружено-деформованого стану матеріалу зразків у процесі формозміни проводилося чисельним відтворенням

експериментів за допомогою комп'ютерного моделювання в спеціалізованій програмній системі. Прийнята у дослідженні розрахункова схема та розміри перемички представлені відповідно на рис. 2.3, а та 2.3, б. Якісна побудова кінцево-елементної сітки (рис. 2.3, в) зі згущенням в певній області визначалася вікнами густини з відносним розміром елементів – 0,16 та 0,4. Для попередження виродження елементів сітки кінцевих елементів та якісного виконання розрахунку було прийнято умову: максимальне збільшення часу без перерозподілу сітки – 0,15 с. Визначення опору деформації металу проводилося за допомогою випробувань на стиск циліндричних зразків третього типу $\varnothing 10 \times 15$. Отримані машинні діаграми представлені на рис. 2.4, перебудовою яких, після виключення пружної деформації зразка та випробувальної машини, було отримано опір деформації алюмінієвого сплаву АМг6 представлене на рис. 2.5.



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

Рисунок 2.3 – Моделювання розтягування спеціальних смуг

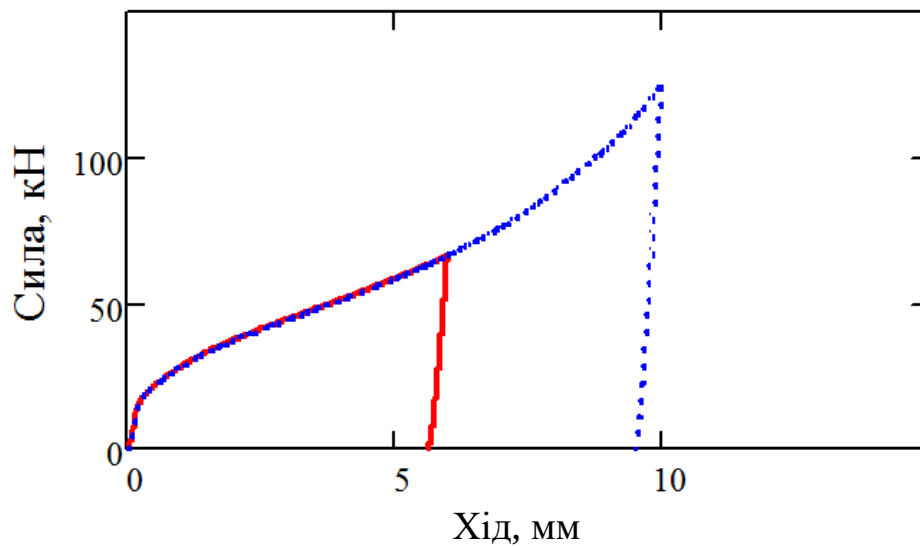


Рисунок 2.4 – Машинні діаграми випробувань на стиск

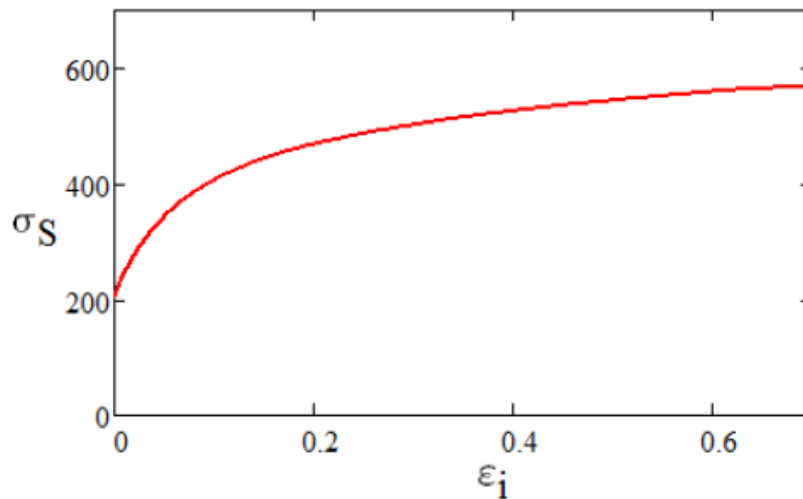
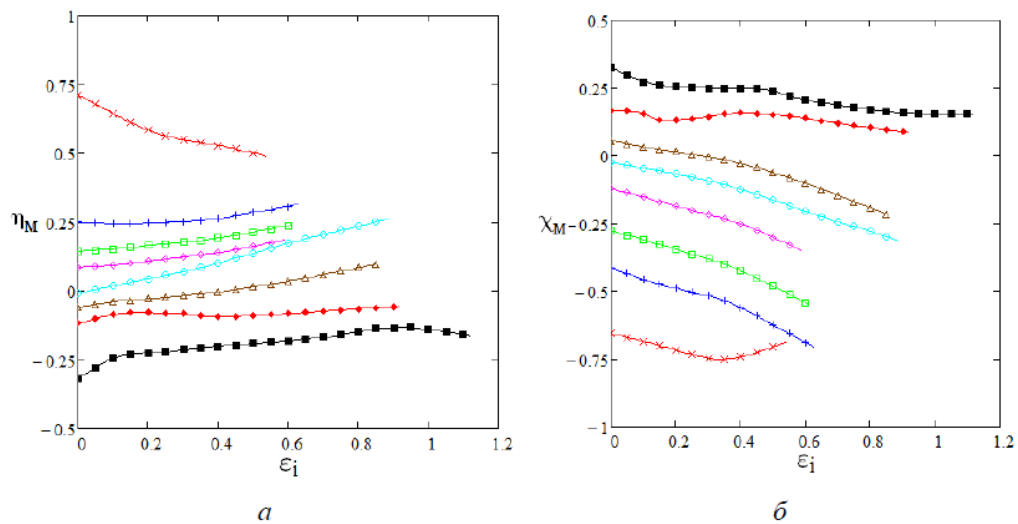


Рисунок 2.5 – Опір деформації алюмінієвого сплаву АМг6

Вихідними даними моделювання були параметри напружено-деформованого стану у місцях виникнення руйнувань, які призначалися в якості трасованих точок, і проводилося визначення вихідних параметрів, із записом в окремий файл для наступної математичної обробки у програмі математичної обробки даних. Таким чином, були визначено функції величин показників напруженого стану та виду напруженого стану у місці виникнення руйнування у процесі формозміни, відображені у вигляді графіків на рис. 2.6.

З рис. 2.6 видно, що в ході деформування показники напруженого стану та виду напруженого стану змінюються. Подальшу обробку здійснювали для середніх величин показників напруженого стану та виду напруженого стану, що визначаються виразами

$$\eta_{\Phi} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \eta_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}, \quad \chi_{\Phi} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \chi_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}. \quad (2.27).$$



а – показники напруженого стану у місці виникнення руйнування;

б – показники виду напруженого стану у місці виникнення руйнування:

× - 0°; | - 60°; □ - 65°; ◇ - 75°; ○ - 90°; Δ - 95°; ◆ - 110°; ■ - 115°

Рисунок 2.6 – Результати чисельного експерименту

У табл. 6 представлений план повнофакторного чисельного експерименту з результатами. На основі отриманих результатів було визначено коефіцієнти апроксимуючої функції поверхні пластичності алюмінієвого сплаву АМгб мінімізацією суми квадратів відхилення функції (2.21) від представлених у табл. 2.1 даних, за допомогою вбудованої функції оптимізації в математичному програмному пакеті, заснованої на нелінійному методі сполучених градієнтів. Таким чином, отримали, що:

$$c_{321_1} = 0,678, c_{321_2} = 0,278, c_{321_3} = 0,868, c_{321_4} = 0,45, \\ c_{321_5} = 1,725, c_{321_6} = 0,394. \quad (2.28)$$

Таблиця 2.1 - План повнофакторного чисельного експерименту

№ дослід	Рівень фактору	Результати моделювання		
	$\alpha, ^\circ$	η_Φ	χ_Φ	ε_p
1	0	0,575	-0,714	0,543
2	60	0,265	-0,543	0,637
3	65	0,183	-0,395	0,615
4	75	0,126	-0,223	0,594
5	90	0,123	-0,153	0,894
6	95	0,01	-0,055	0,855
7	110	-0,081	0,136	0,927
8	115	-0,188	0,215	1,126

На рис. 2.7 представлена отримана поверхня пластичності алюмінієвого сплаву АМг6 у вигляді рівняння (2.21) з коефіцієнтами (2.28) та зазначеним становищем експериментально отриманих точок. Коефіцієнт кореляції Пірсона апроксимуючої функції та дослідних даних 90,823%.

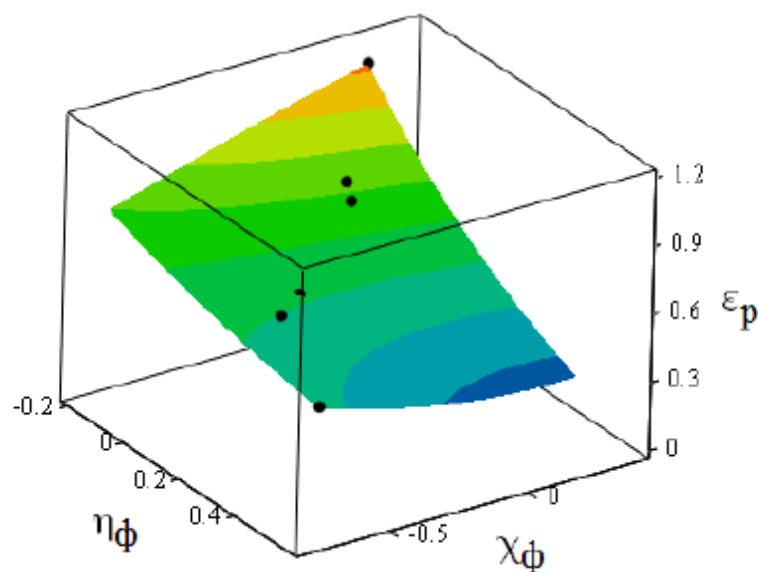


Рисунок 2.7 – Поверхня пластичності алюмінієвого сплаву АМг6

2.2.3 Математична обробка

Перевірку та оцінку ефективності розробленої моделі при оцінці граничного деформування та її порівняння з результатами вже існуючих моделей та апроксимуючих діаграму пластичності функцій здійснювали визначенням середньої δ_{cp} та максимальної δ_{max} відносних похибок, представлених у табл. 2.2 та обчислюваних як:

$$\delta_{cp} = 1/[\max(\eta) - \min(\eta)] \int_{\min(\eta)}^{\max(\eta)} |(\varepsilon_p - \varepsilon_{cr})/\varepsilon_p|, \\ \delta_{max} = \max\left\{ |(\varepsilon_p - \varepsilon_{cr})/\varepsilon_p| \right\} \quad (2.29)$$

де ε_{cr} – діаграма пластичності, яка визначається розробленою, або вже існуючими моделями та апроксимуючими діаграму пластичності функціями.

Діаграми пластичності досліджуваних матеріалів для холодних процесів листового штампування ε_p отримані підстановкою в рівняння (2.21) для досліджуваних матеріалів показника виду напруженого стану у вигляді функції показника напруженого стану, чисельно отриманої з виразу (2.19) засобами математичного програмного пакету. Отримані таким чином графіки представлені на рис. 2.8.

Для визначення діаграм пластичності, що впливають із розробленої, або вже існуючих моделей, застосовувалися такі рівняння [36]:

$$\sigma_{1,3} = \left[\eta \pm (3 \mp \chi) / (3\sqrt{\chi^2 + 3}) \right] \sigma_i, \quad \sigma_2 = \left[\eta + 2\chi / (3\sqrt{\chi^2 + 3}) \right] \sigma_i. \quad (2.30)$$

Відповідно до умови пластичності, висунутої М. Губером і Р. Мізесом [29], маємо:

$$\sigma_i = \sigma_s. \quad (2.31)$$

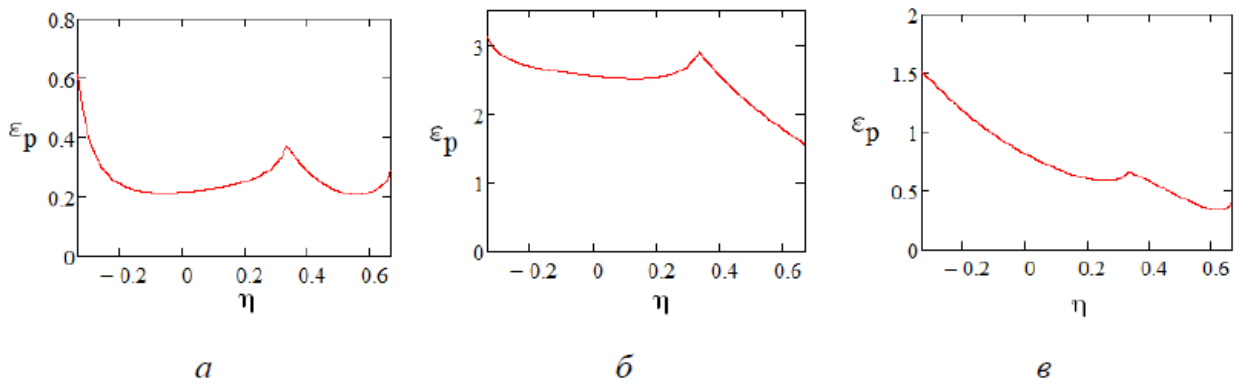
Таблиця 2.2 - Результати визначення похибок

Рівняння, що визначає модель або апроксимуючу функцію	Величина похибки, %					
	алюмінієвий сплав АМг6		алюмінієвий сплав Д16		сталь А710	
	$\delta_{\text{ср}}$	δ_{max}	$\delta_{\text{ср}}$	δ_{max}	$\delta_{\text{ср}}$	δ_{max}
(1.5)	28,429	55,732	15,172	55,653	10,868	57,252
(1.7)	59,719	323,237	65,366	285,537	67,176	513,893
(1.8)	77,921	331,126	78,537	284,267	83,314	487,154
(1.9)	62,461	354,96	64,408	311,159	71,366	561,509
(1.10)	100,048	∞	99,998	∞	99,998	∞
(1.11)	100,036	∞	99,984	∞	99,982	∞
(2.17)	3,271	10,392	5,487	12,097	1,168	5,747
(1.37)	17,316	45,17	21,835	41,579	11,01	27,352
(1.38)	4,718	25,766	10,215	31,464	2,86	11,027
(1.39)	4,779	24,546	8,989	43,283	2,68	11,008
(1.40)	14,24	53,766	26,84	46,999	17,641	33,996
(1.42)	11,118	48,679	14,158	45,109	6,846	28,975
(1.43)	7,726	52,528	21,117	44,495	7,914	21,523
(1.44)	9,564	55,167	15,961	52,458	5,654	21,174
(1.45)	4,982	23,74	17,015	42,709	5,427	15,903
(1.46)	4,96	29,097	15,783	42,202	6,066	18,357
(1.47)	5,796	38,112	16,426	42,044	6,284	21,061
(1.48)	11,827	64,774	30,181	53,611	6,854	34,123
(1.49)	13	59,576	15,286	51,015	6,833	32,434
(1.50)	13	59,576	15,286	51,014	6,833	32,434
(1.51)	28,429	55,732	15,172	55,653	10,869	57,247
(1.52)	4,969	34,398	10,898	34,956	2,217	9,979
(1.53)	55,016	232,101	45,549	190,168	50,091	293,817

Опір деформації досліджуваних матеріалів прийнято у вигляді апроксимуючої функції [36]:

$$\sigma_S = c_{321_7} (c_{321_8} + \varepsilon_i)^{c_{321_9}}, \quad (2.32)$$

де c_{321_7} , c_{321_8} , c_{321_9} - коефіцієнт:



а - алюмінієвого сплаву Д16; б - сталі А710; в - алюмінієвого сплаву АМг6

Рисунок 2.8 – Діаграми пластичності для процесів холодного листового штампування досліджуваних матеріалів

- для алюмінієвого сплаву АМг6 визначено з наведених вище експериментальних результатів аналогічно коефіцієнтам функції (2.25):

$$c_{321_7} = 627,303 \text{ МПа}, c_{321_8} = 5,408 \cdot 10^{-15}, c_{321_9} = 0,208; \quad (2.33)$$

- для алюмінієвого сплаву Д16 прийняті з роботи [36]:

$$c_{321_7} = 908 \text{ МПа}, c_{321_8} = 0,0058, c_{321_9} = 0,174; \quad (2.34)$$

- для сталі А710 визначено з експериментальних даних представлених у роботі [37] аналогічно коефіцієнтам функції (2.25):

$$c_{321_7} = 1145,796 \text{ МПа}, c_{321_8} = 0,0639, c_{321_9} = 0,256. \quad (2.35)$$

За допомогою рівнянь (2.30), (2.31) та (2.32) сформульована модель та енергетичні критерії були приведені до вигляду:

$$\varepsilon_{cr} = f(\eta, \chi, c_{321_7}, c_{321_8}, c_{321_9}). \quad (2.36)$$

Таким чином, для визначення ε_{cr} були отримані такі рівняння:

- модель Freudenthal:

$$\varepsilon_{cr} = \left\{ \left[c_{112_1} (c_{321_9} + 1) / \left(c_{321_7} c_{321_8}^{c_{321_9} + 1} \right) + 1 \right]^{1/(c_{321_9} + 1)} - 1 \right\} c_{321_8}, \quad (2.37)$$

- модель Cockcroft-Latham:

$$\varepsilon_{cr} = \left\langle \left\{ \frac{c_{112_2} (c_{321_9} + 1)}{c_{321_7} c_{321_8}^{c_{321_9} + 1} \left[\eta + (3 - \chi) / \left(3\sqrt{\chi^2 + 3} \right) \right]} + 1 \right\}^{1/(c_{321_9} + 1)} - 1 \right\rangle c_{321_8}, \quad (2.38)$$

- нормалізований варіант моделі Cockcroft-Latham:

$$\varepsilon_{cr} = c_{112_3} / \left[\eta + (3 - \chi) / \left(3\sqrt{\chi^2 + 3} \right) \right], \quad (2.39)$$

- модель Brozzo:

$$\varepsilon_{cr} = c_{112_4} \left[(3 - \chi) / \sqrt{\chi^2 + 3} \right] / \left\{ 2 \left[\eta + (3 - \chi) / \left(3\sqrt{\chi^2 + 3} \right) \right] \right\}, \quad (2.40)$$

- модель [57]:

$$\varepsilon_{cr} = \left\{ \left[c_{112_5} (c_{321_9} + 1) / \left(c_{321_7} c_{321_8}^{c_{321_9} + 1} \eta \right) + 1 \right]^{1/(c_{321_9} + 1)} - 1 \right\} c_{321_8}, \quad (2.41)$$

- модель Ayada:

$$\varepsilon_{cr} = c_{112_6} / \eta, \quad (2.42)$$

- розроблена модель:

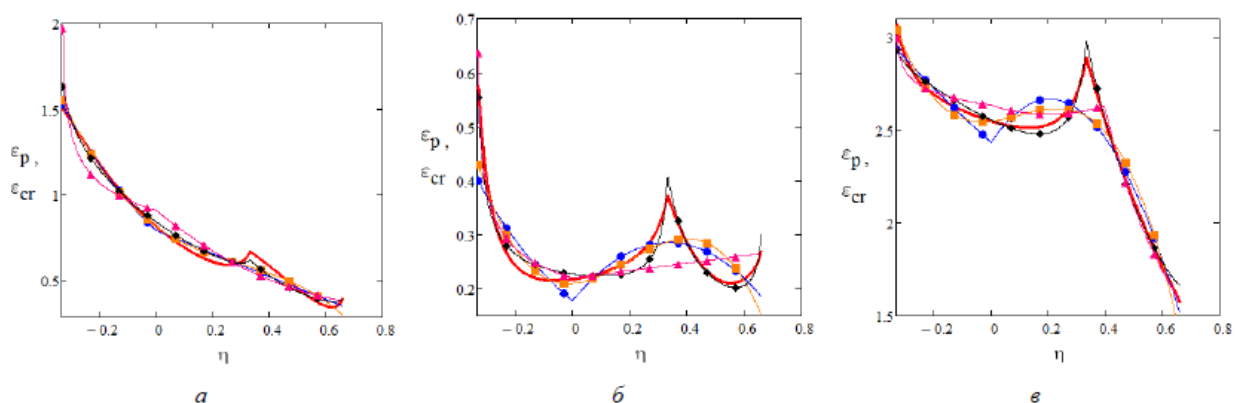
$$\varepsilon_{cr} = \left[\sqrt{\chi^2 + 3} / \left(c_{31_7} \cos^2(c_{31_4} \chi + c_{31_5}) e^{c_{122_25} \eta} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.43)$$

Для визначення ε_{cr} у процесах з плоским напруженим станом у виразах (2.38) – (2.40) та (2.43) в якості показника виду напруженого стану була підставлена згадана вище чисельно отримана з виразу (2.19) – функція показника напруженого стану.

Відомі апроксимуючі діаграму пластичності функції застосовувалися у вихідному варіанті.

Визначення коефіцієнтів, що входять до моделі та апроксимуючих функцій, здійснювалось мінімізацією суми квадратів відхилення ε_{cr} від діаграм пластичності для процесів з плоским напруженим станом в тисячі рівновіддалених точок, на які розбивався діапазон варіювання показника напруженого стану, за допомогою вбудованої функції оптимізації математичного програмного пакету, заснованої на нелінійному методі пов'язаних градієнтів.

Для якісного порівняння графіків чотирьох діаграм пластичності наступних з моделей та апроксимуючих функцій і які мають найменшими похибками (у таблиці виділені сірим кольором) з реальною діаграмою пластичності процесів із плоским напруженим станом були побудовано відповідні графіки, представлені рис. 2.9.



а - алюмінієвого сплаву АМг6; б - алюмінієвого сплаву Д16; в – сталі А710;

— - ε_p ; • - (1.38); ■ - (1.39); ▲ - (1.52); ♦ – (2.17)

Рисунок 2.9 – Діаграми пластичності ε_p та ε_{cr} у процесах холодного листового штампування

2.2.4 Аналіз результатів

Підбиваючи підсумки, слід зазначити, наступне:

1) Перевірка ефективності результатів розробленої моделі та порівняння з результатами існуючих моделей та апроксимуючих діаграму пластичності функцій, показали перевагу розробленої моделі при оцінці граничного деформування в процесах холодного листового штампування.

2) Діаграма пластичності лише розробленої моделі по виду збігається з реальною діаграмою пластичності для процесів холодного листового штампування.

2.3 Впровадження у програмну систему теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування

Як згадувалося вище критерії, реалізовані в існуючих комерційних програмах інженерного аналізу процесів обробки металів тиском, у загальному випадку не дозволяють точно оцінювати граничне деформування при листовому штампуванні. Тим не менш, у більшості випадків доступне додавання нових моделей за допомогою програмування користувачем. З цією метою розроблена у підрозділі модель використання ресурсу пластичності була інтегрована в існуючий комерційний програмний продукт. Обрана програмна система, згідно з дослідженнями [38] є однією з найбільш поширених програмних комплексів моделювання процесів обробки металів тиском.

Створення підпрограм для цієї програмної системи на персональних комп'ютерах з певною операційною системою потребує встановлення ABSOFT Fortran. Застосовувана мова програмування – FORTRAN. Написання підпрограм проводиться у певних, наявних у програмній системі файлах, відповідно до заданої структури. Після цього за допомогою ABSOFT Fortran виробляється компіляція та генерація файлу, що містить розроблену підпрограму, та звернення до якого дозволяє її використовувати.

У цій програмній системі застосовуються два типи підпрограм користувача: постпроцесорні та підпрограми розрахункового ядра кінцево-

елементного моделювання. Підпрограми першого типу використовуються для обчислення визначених користувачем змінних після проведення моделювання. Вхідними для них є результати, збережені у базі даних. Очевидно, що ці підпрограми не можуть впливати на результати моделювання. Їх написання провадиться у фалі `pstusr3.f`. Застосування згенерованого в результаті компіляції підпрограми файлу активує покрокове, відповідно до бази даних моделювання, трасування та визначення в кожному вузлі/елементі змінних, які використовуються у підпрограмі. Структура підпрограми включає три розділи: у першому проводиться присвоєння імен змінним, що визначаються, для їх подальшої ідентифікації при виведенні на екран у постпроцесорі програмної системи; на другому змінним користувача надається початкове значення; у третьому проводиться визначення користувацьких змінних. Відповідно до зазначеної структури були розроблено підпрограми, використані у підрозділах.

Користувальницькі підпрограми розрахункового ядра кінцево-елементного моделювання – підпрограми, за допомогою яких користувач може змінювати внутрішні програми розрахункового ядра кінцево-елементного моделювання. Ці підпрограми можуть бути застосовані для різних цілей, так в даний час існують підпрограми, що визначають напруження текучості, що керують рухом інструменту, що визначають вузлові та елементні змінні, що задають критерії граничного деформування тощо. Залежно від реалізованих цілей підпрограми цього типу створюються в різних вихідних файлах. Так програмування моделей використання ресурсу пластичності, як правило, здійснюється у фалі `usr_dmg.f`. Для них визначення у файлі доступні: компоненти тензора напружень, інтенсивність нормальних напружень і швидкість деформації, а також перелік вхідних змінних можна розширити зверненням до загального для всіх підпрограм COMMON блоку. Підпрограма, що визначає ступінь використання ресурсу пластичності, що викликається в кінці кожного кроку для кожного елемента, і, у разі перевищення критерієм граничної величини, елемент або видаляється з сітки, або напруження текучості в ньому знижується на задану кількість відсотків. Після створення необхідних

підпрограм у процесі їх компіляції за допомогою ABSOFT Fortran вони збираються та зв'язуються, внаслідок чого генерується нове розрахункове ядро кінцево-елементного моделювання.

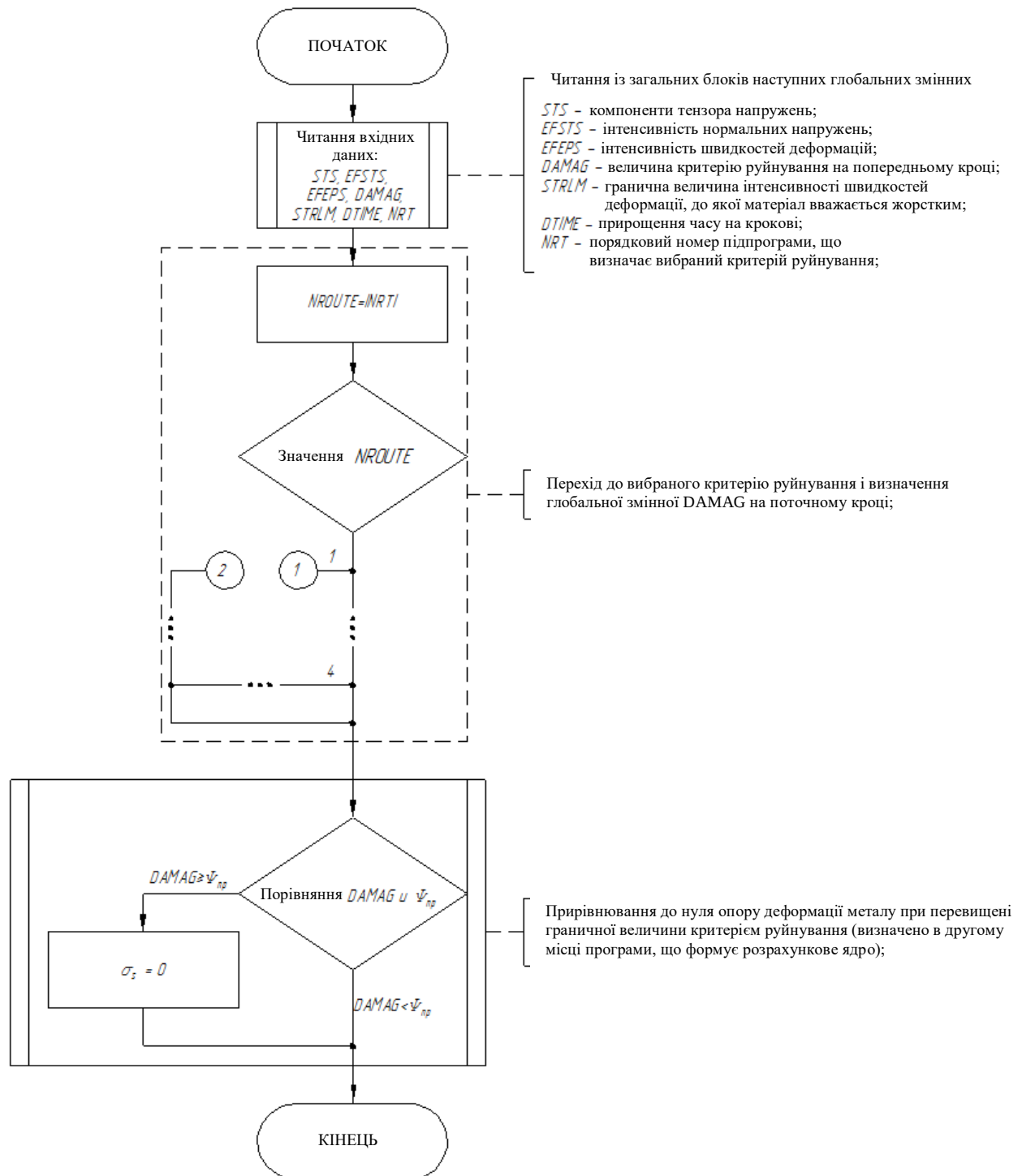


Рисунок 2.10 – Алгоритм роботи підпрограми з новим критерієм використання ресурсу пластичності

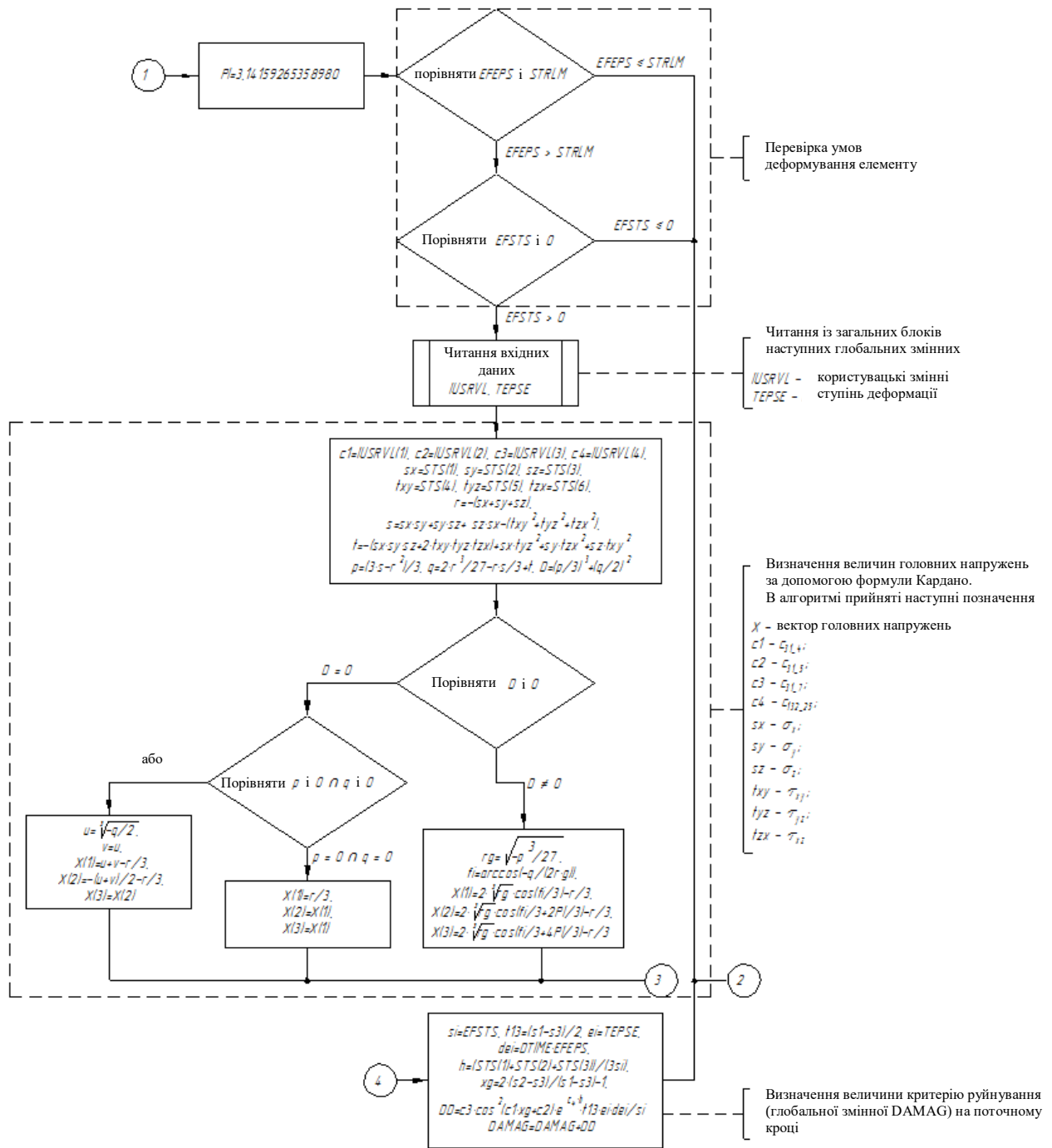


Рисунок 2.11 – Алгоритм роботи підпрограми з теоретичною моделлю використання ресурсу пластичності ізотропних металів при холодній листового штампування для випадку 3D завдання

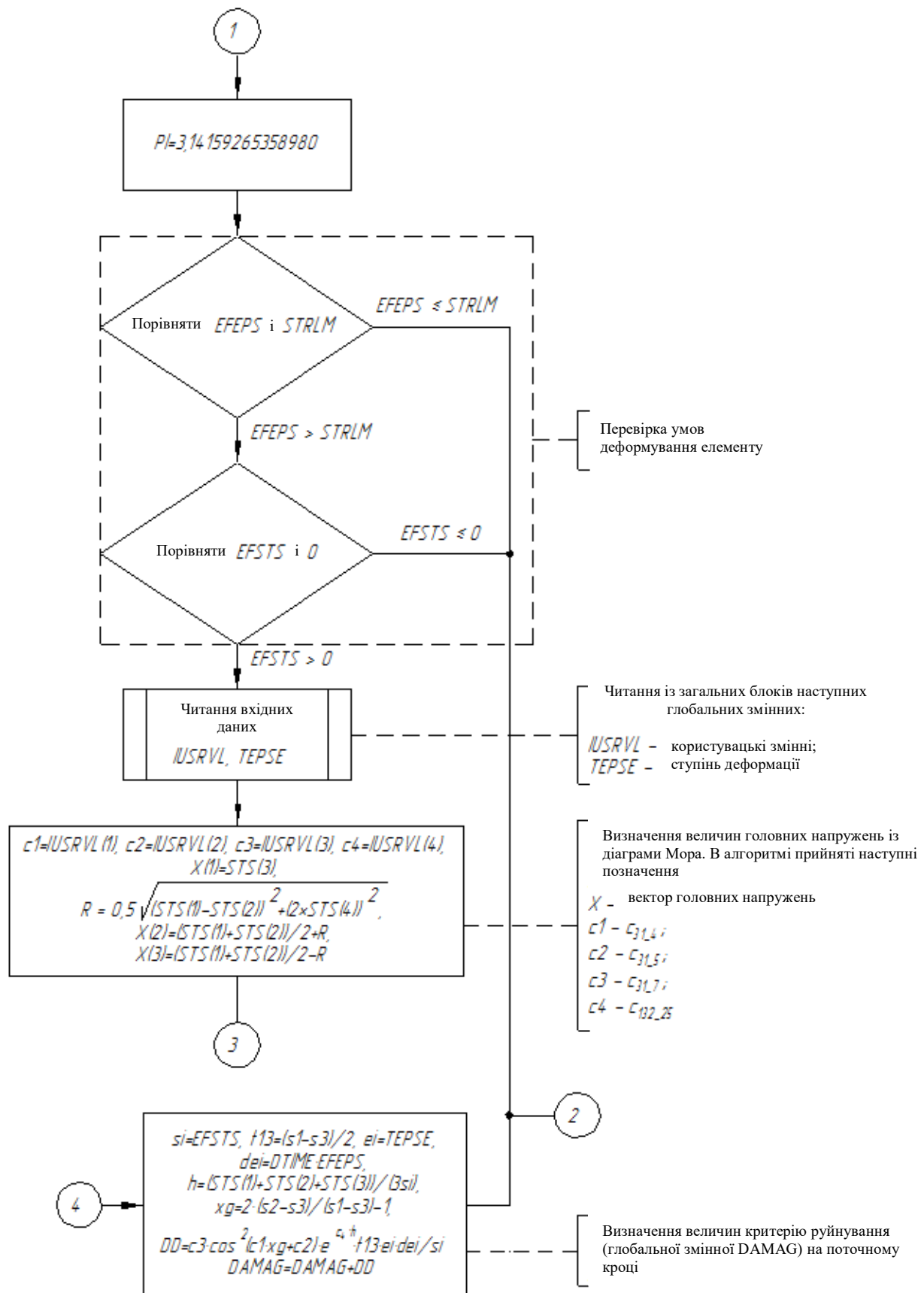


Рисунок 2.12 – Алгоритм роботи підпрограми з теоретичною моделлю використання ресурсу пластичності ізотропних металів при холодній листового штампування для випадку 2D завдання

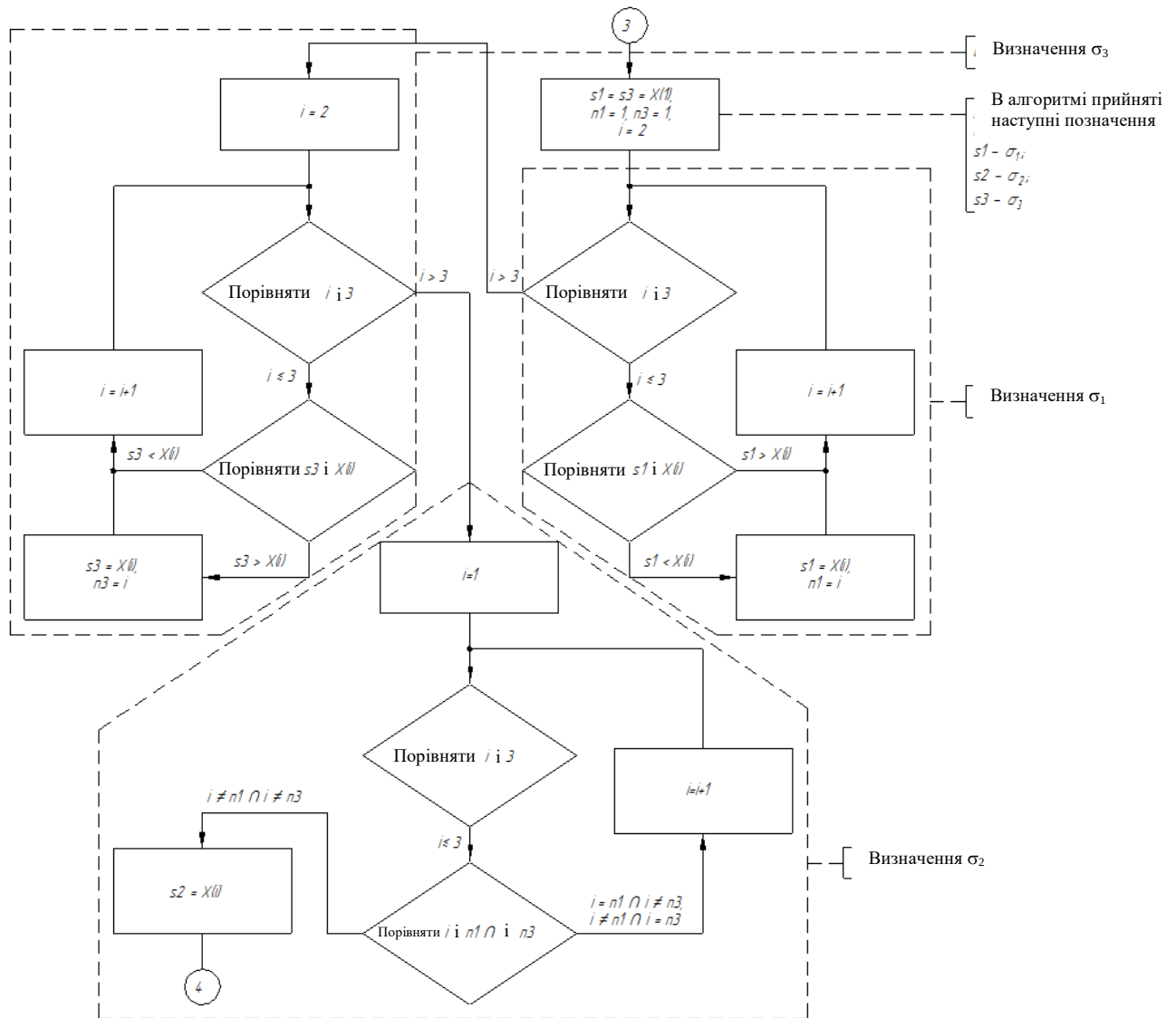


Рисунок 2.13 – Частина алгоритму, що відповідає за сортування головного напруження

Оскільки порушення суцільності металу заготовки впливає на процес подальшого деформування, нова теоретична модель програмувалася, як підпрограма розрахункового ядра кінцево-елементного моделювання. Алгоритм роботи підпрограми з новим критерієм представлений на рис. 2.10. Частина алгоритму присвячена розробленій теоретичній моделі використання ресурсу пластичності ізотропних металів при холодному листовому штампуванні для 3D і 2D задач, винесені відповідно на рис. 2.11 і 2.12. Також частина алгоритму, відповідальна за сортування головних напружень,

представлена на рис. 2.13. Текст підпрограм для 3D та 2D задач представлені в додатках.

Завдання коефіцієнтів c_1 , c_2 , c_3 та c_4 для конкретного матеріалу при застосування створеної підпрограми здійснюється на полях введення даних користувача, відповідно 1, 2, 3 і 4, всередині програмної системи у вікні Simulation Controls підкаталог Advanced вкладка User Defined, і не вимагає зміни підпрограми.

З ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ В ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ ПРИ ЗГИНАННІ ТРУБ

Для перевірки теоретичної моделі визначення величини використаного ресурсу пластичності схема напруженого стану притаманна для процесів листового штампування була відтворена на трубозгинальному верстаті. Метою підрозділу було вдосконалення процесів згинання труб за схемою проштовхування на трубозгинальному верстаті визначенням раціональної траєкторії переміщення згинального ролика на етапі підгину, на основі оцінки ступеня використання ресурсу пластичності за допомогою теоретичної моделі (2.17) на прикладі дослідної деталі.

При створенні сучасної спеціальної техніки до фізико-механічних властивостей матеріалу деталей трубопроводів найчастіше пред'являються підвищені вимоги (жаростійкість, корозійно-стійкість, висока питома міцність тощо), викликані особливостями умов експлуатації (взаємодії з високошвидкісними потоками плазми та газу, з агресивними середовищами тощо), у зв'язку з чим, при їх виготовленні, все більше застосування знаходять високолеговані метали, що важко деформуються. Тому, через знижену пластичність згаданих матеріалів, при проектуванні процесів згинання труб необхідно ґрунтуватися не тільки на прогнозуванні втрати стійкості, а й на можливості вичерпання ресурсу пластичності матеріалу.

Рішення поставленої мети є актуальним завданням у зв'язку з існуванням не менше чотирьох різних варіантів переміщення згинального ролика на етапі підгинання [29, 30] та відсутністю інформації про його вплив на пластичність заготовки.

3.1 Матеріал дослідження

Дослідний зразок був прийнятий у вигляді деталі, зображеної на рис. 3.1. Початкова заготовка – труба (36×6, 12X18Н10Т).

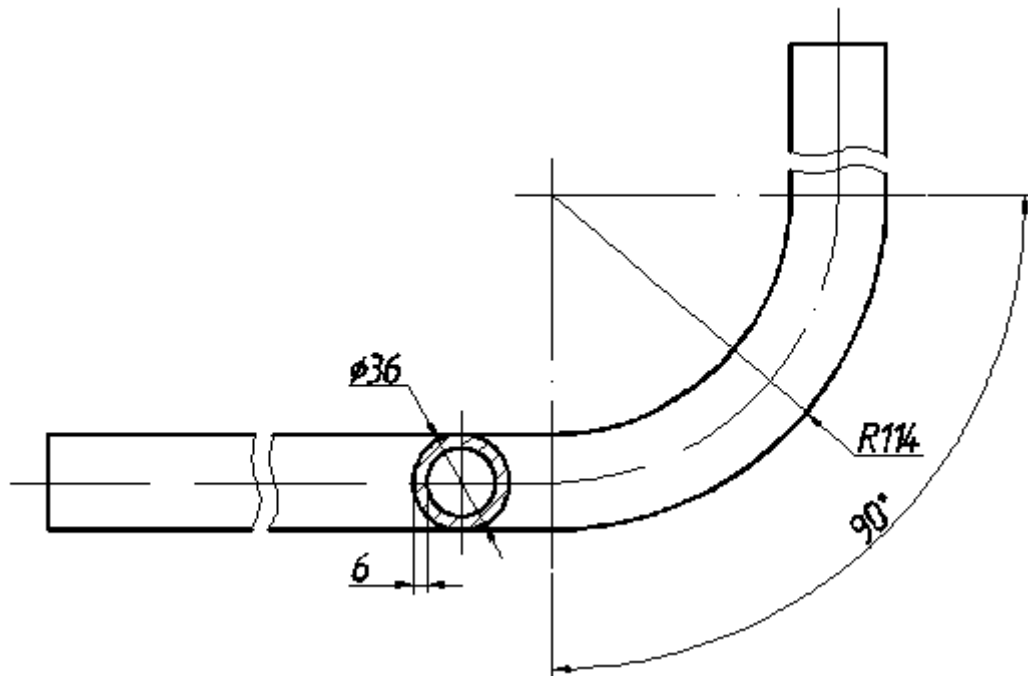


Рисунок 3.1 – Ескіз дослідної деталі

В якості критерію використання ресурсу пластичності застосовувалися моделі (1.13) та (2.17).

Діаграма пластичності використовувалася у вигляді нижче представленої функції, коефіцієнти якої визначалися подібно до коефіцієнтів функції (2.25) на основі експериментальних результатів для сталі X18H10T, представлених у роботі [8]:

$$\varepsilon_p = -5,026e^{0,142\eta} + 6,122. \quad (3.1)$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона дослідних даних та апроксимуючої функції (3.1) становив 92,442%.

Коефіцієнти моделі (2.17) для досліджуваного матеріалу були прийняті рівними:

$$c_{31_7} = 1,516, c_{31_4} = c_{31_5} = 0, c_{132_25} = 1,438. \quad (3.2)$$

Коефіцієнти c_{31_4} і c_{31_5} прийняті рівними нулю через відсутність інформації щодо впливу показника χ на пластичність матеріалу. Величини коефіцієнтів c_{31_7} і c_{132_25} визначалися підбором, заснованому на мінімізації відхилення функції (2.43) від експериментальних результатів для сталі X18H10T, методом Левенберга-Марквардта, за допомогою вбудованої функції програми математичного пакету, показник виду напруженого стану застосовувався як функція показника напруженого стану, чисельно отримана з виразу (2.19). Коефіцієнт кореляції Пірсона експериментальних даних та функції (2.43) з коефіцієнтами (3.2) склав 90,402%.

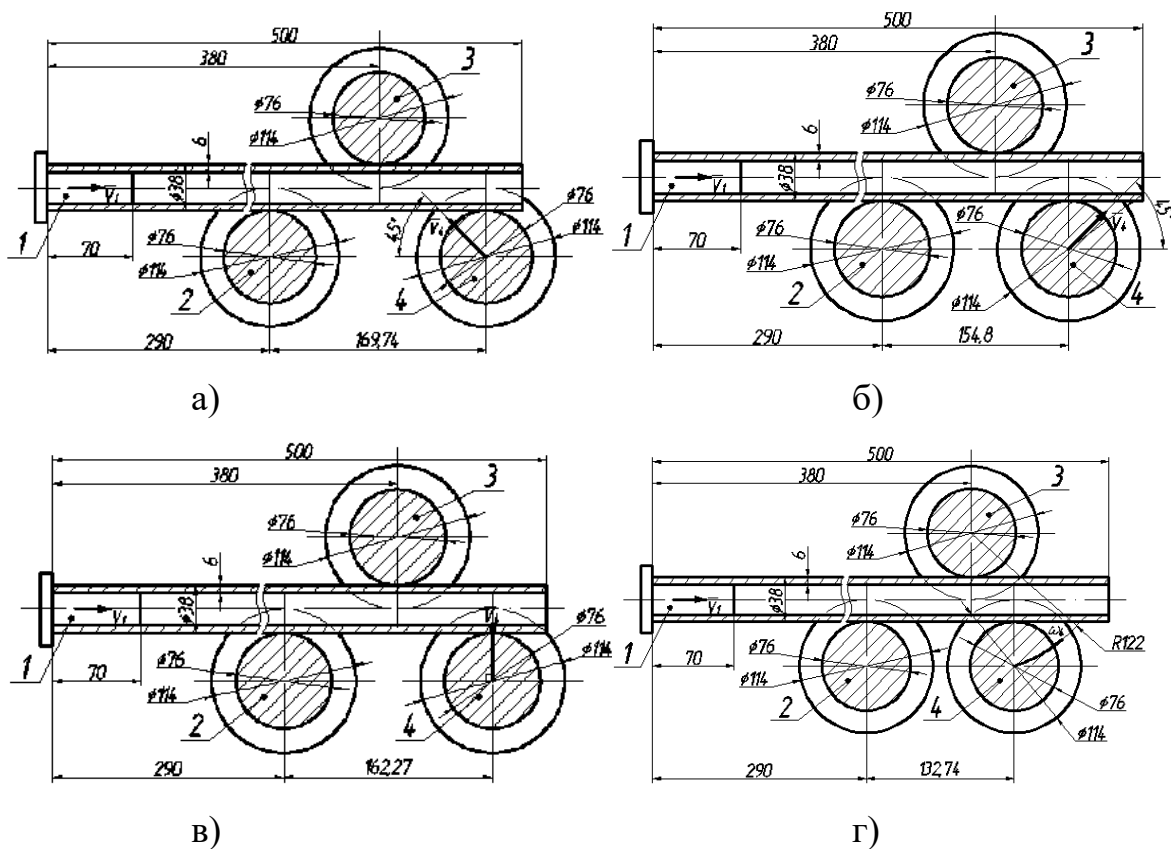
Для теоретичної оцінки граничного деформування трубної заготовки при згинанні застосовувалося комп'ютерне моделювання процесу у програмі спеціального пакету. В результаті аналізу можливостей програмного продукту було запропоновано відповідну методику, що зводиться до наступного алгоритму:

- 1) Заміна реальної задачі розрахунковою схемою та постановка її в середовищі QForm.
- 2) Моделювання процесу.
- 3) Визначення небезпечних точок заготовки та завдання їх як трасованих.
- 4) Трасування (визначення необхідних розрахункових змінних у трасованих точках у процесі формозміни постпроцесорним перерахунком результатів, отриманих при моделюванні).
- 5) Запис отриманих значень розрахункових змінних у трасованих точках у текстовий файл.
- 6) Математична обробка даних текстових файлів.
- 7) Аналіз результатів.

3.2 Комп'ютерне моделювання

Моделювання проводилося для чотирьох схем згинання проштовхуванням: радіально-дугова, прямокутна, діагональна зустрічна та

діагональна попутна. Процес згинання складається з двох етапів: етап підгину, протягом якого крім проштовхування здійснюється підгинання труби за рахунок виходу згинального ролика в задану точку, та етап догину, на якому проводиться тільки проштовхування труби. Прийняті у дослідженні кінематичні розрахункові схеми етапів підгину представлені рис. 3.2. В різних схемах відрізнялися лише траєкторія виходу ролика в задану точку, відповідно до чого регулювалася швидкість згинального ролика так, щоб тривалість першого етапу була однаковою для всіх схем.

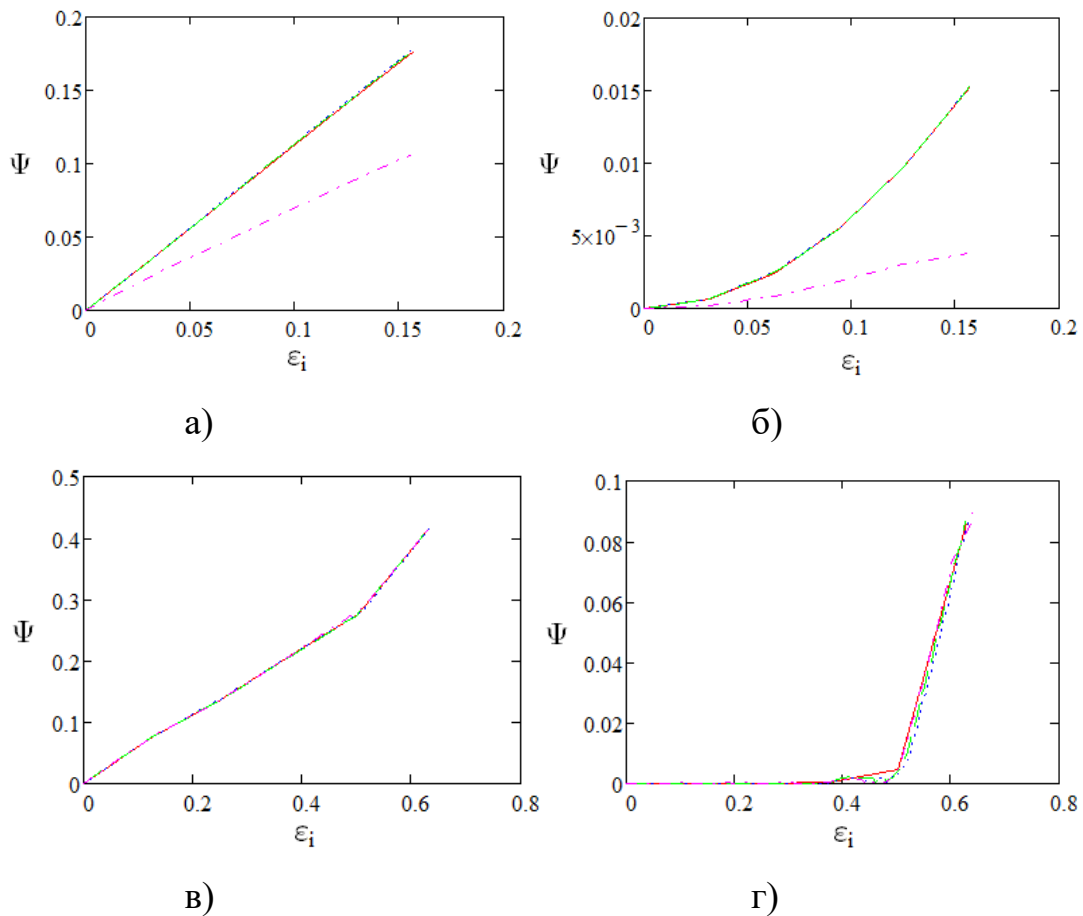


а - діагональна зустрічна схема, б - діагональна попутна схема, в – прямокутна схема, г – радіально-дужева схема: 1 – штовхач, 2, 3, 4 – згинальні ролики, v_i – лінійна швидкість i -ої ланки, ω_i – кутова швидкість i -ої ланки

Рисунок 3.2 – Кінематичні розрахункові схеми етапів підгинання

Реологічні властивості матеріалу приймалися із стандартної бібліотеки матеріалів спеціалізованої програмної системи.

Для зменшення часу розрахунку у всіх випадках моделювання проводилося для половини задачі із завданням відповідних властивостей геометричної симетрії.



а – за критерієм на етапі підгину; б – за критерієм (2.17) на етапі підгину; в – за критерієм (1.13) протягом усього згинання; г – за критерієм (2.17) протягом усього згинання; ——— - діагональна зустрічна схема; — — — - діагональна попутна схема; - - - - прямокутна схема; — - — - — - радіально-дугова схема

Рисунок 3.3 – Зміна ступеня використання ресурсу пластичності

Для якісної побудови кінцево-елементної сітки застосовувалося обмеження – максимальний розмір елемента 1,2 мм.

3.3 Математична обробка результатів моделювання

З математичного моделювання процесів згинання у спеціальному програмному комплексі були отримані необхідні для розрахунку ступеня використання ресурсу пластичності характеристики напружено-деформованого стану у небезпечних точках.

Результати моделювання показали, що для всіх чотирьох схем згинання небезпечна точка етапу підгину та небезпечна точка всього процесу згинання не збігаються. Подальша обробка результатів проводилася у програмі математичної обробки даних. На рис. 3.3 представлені отримані зміни величин обраних критеріїв використання ресурсу пластичності в небезпечних точках при згинанні за прийнятими схемами.

3.4 Аналіз результатів

На основі отриманих результатів слід зазначити наступне:

1) Найбільш сприятливою на етапі підгину є радіально-дугова траєкторія переміщення згинального ролика, а діагональна зустрічна, діагональна попутна та прямокутна схеми згинання прогнотуванням тотожні.

2) У випадках згинання з переважаючим за часом етапом догинання траєкторія переміщення згинального ролика на етапі підгину впливу на загальний ступінь використання запасу пластичності у небезпечній точці не надає.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ПРИ УМОВІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ВЕЛИЧИНИ ПОКАЗНИКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ

Проведений аналіз показав, що перевірка результатів аналітичного рішення, відповідно до якого запропонований у роботі [31] спосіб дослідження пластичності об'ємних заготовок радіальним видавлюванням в канал певної форми має широкий діапазон варіювання показника напруженого стану, що включає позитивні та негативні величини, є актуальним завданням.

Таким чином, метою підрозділу був аналіз можливостей методу радіального видавлювання в канал певної форми при побудові поверхонь пластичності металів.

Для досягнення поставленої мети було виконано:

- аналітичне визначення рівняння форми каналу, що забезпечує сталість показника напруженого стану в процесі деформування, слідуючи роботі [16];
- визначення меж діапазону зміни показника напруженого стану при радіальному видавлюванні в канал певної форми, на основі аналітично отриманого рівняння форми каналу;
- перевірка результатів аналітичного рішення засобами комп'ютерного моделювання.

4.1 Аналітичне визначення форми каналу, що забезпечує сталість величини показника напруженого стану у процесі деформування

Наведене нижче аналітичне рішення відноситься до бічної поверхні видавлюваного фланця, оскільки саме на ній, згідно з роботою [16], утворюється тріщина.

Оскільки бічна поверхня є вільною, є така гранична умова:

$$\sigma_p=0, \quad (4.1)$$

де σ_p – нормальне напруження у радіальному напрямку, МПа.

Розмір показника напруженого стану, визначений з фізичного рівняння теорії течії для випадку ідеально жорстко-пластичного тіла циліндричної системи координат для координати ρ :

$$\dot{\varepsilon}_\rho = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\sigma_i} (\sigma_\rho - \sigma_{\text{ср}}), \quad (4.2)$$

де $\dot{\varepsilon}_\rho$ – радіальна компонента тензора швидкостей деформації.

Підставивши (4.1) до (4.2) та провівши математичні перетворення, отримано рівняння:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_i} = -\frac{2}{3} \frac{\dot{\varepsilon}_\rho}{\dot{\varepsilon}_i}. \quad (4.3)$$

Дотримуючись робіт [16, 31], як припущення прийнято, що радіальна компонента вектора швидкості матеріальних частинок не залежить від осової координати, а осова – від радіальної:

$$v_\rho = f_{221_1}(\rho), \quad v_z = f_{221_2}(z), \quad (4.4)$$

де v_ρ, v_z – компонент вектора швидкості матеріальної частки, відповідно, радіальна та осова, мм/с.

При осесиметричній схемі деформованого стану визначення компонент тензора швидкостей деформації з урахуванням припущень (4.4) маємо:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_\rho &= \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho}, \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \frac{\partial v_\theta}{\partial \tilde{l}_\theta} = \frac{\partial}{\partial \tilde{l}_\theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u_\theta}{\partial \tilde{l}_\theta} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{(\rho + u_\rho) d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{u_\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\rho}{\partial t} = \frac{v_\rho}{\rho}, \\ \dot{\varepsilon}_{\rho z} &= \dot{\varepsilon}_{z\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f_{221_1}(\rho)}{\partial z} + \frac{\partial f_{221_2}(z)}{\partial \rho} \right) = 0, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $\dot{\varepsilon}_\theta$ – окружна компонента тензора швидкостей деформації;

$\dot{\varepsilon}_{\rho z}, \dot{\varepsilon}_{z\rho}$ – зсувна компонента тензора швидкостей деформації, відповідно, за напрямком z в площадці з нормаллю колінеарної осі ρ та за напрямком ρ у майданчику з нормаллю колінеарної осі z ;

v_θ – окружна компонента вектора швидкості матеріальної частки, мм/с;

l_θ – довжина дуги кола радіусом ρ з центральним кутом θ ;

u_ρ , u_θ – компонента вектора зміщення матеріальної частки, відповідно, радіальна та окружна, мм.

Осьова компонента тензора швидкостей деформації $\dot{\varepsilon}_z$ визначена з гіпотези стискання матеріалу [29]:

$$\dot{\varepsilon}_\rho + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z = 0 \Rightarrow \dot{\varepsilon}_z = -\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta. \quad (4.6)$$

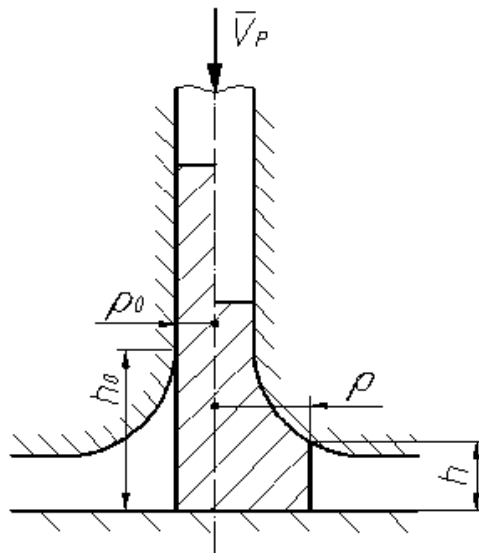
З умови рівності потоків розрахункова схема представлена на рис. 4.1, отримано вираз визначення радіальної компоненти вектора швидкості матеріальних частинок бічної поверхні фланця, що видавлюється:

$$V_P \pi \rho_0^2 = v_\rho 2\pi \rho h \Rightarrow v_\rho = \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h}, \quad (4.7)$$

де V_P – швидкість пуансону, мм/с;

ρ_0 – радіус поперечного перерізу заготовки, мм;

ρ , h – відповідно, радіус та висота бічної поверхні фланця, мм.



h_0 – початкова висота каналу, мм

Рисунок 4.1 – Розрахункова схема процесу радіального видавлювання

Підставивши (4.7) в (4.5), для визначення радіальної та окружної компонент тензора швидкостей деформації отримані такі рівняння:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_\rho &= \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h} \right) = \frac{V_P \rho_0^2}{2} \left(-\frac{1}{\rho^2 h} + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{h^2} \right) \frac{dh}{d\rho} \right) = -\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{h + \rho \frac{dh}{d\rho}}{\rho^2 h^2}, \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \left(\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h} \right) / \rho = \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho^2 h}.\end{aligned}\quad (4.8)$$

З (4.6) з урахуванням (4.8) для визначення осьової компоненти тензора швидкостей деформації маємо:

$$\dot{\varepsilon}_z = - \left(-\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{h + \rho \frac{dh}{d\rho}}{\rho^2 h^2} \right) - \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho^2 h} = \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h^2} \frac{dh}{d\rho}.\quad (4.9)$$

Інтенсивність швидкостей деформації визначили як:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + 6\dot{\varepsilon}_{\rho z}^2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(-\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{h + \rho \frac{dh}{d\rho}}{\rho^2 h^2} - \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho^2 h} \right)^2 + \left(\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho^2 h} - \frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h^2} \frac{dh}{d\rho} \right)^2 +} \\ &\quad + \left(\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{1}{\rho h^2} \frac{dh}{d\rho} - \left(-\frac{V_P \rho_0^2}{2} \frac{h + \rho \frac{dh}{d\rho}}{\rho^2 h^2} \right) \right)^2 + 6 \cdot 0^2} = \\ &= \frac{V_P \rho_0^2}{\sqrt{3} \rho^2 h^2} \sqrt{h^2 + h \rho \frac{dh}{d\rho} + \rho^2 \left(\frac{dh}{d\rho} \right)^2}.\end{aligned}\quad (4.10)$$

В результаті підстановки (4.3) отриманих виразів для визначення $\dot{\varepsilon}_\rho$, та $\dot{\varepsilon}_i$ маємо:

$$\eta = \left(h + \rho \frac{dh}{d\rho} \right) / \sqrt{3 \left(h^2 + h \rho \frac{dh}{d\rho} + \rho^2 \left(\frac{dh}{d\rho} \right)^2 \right)}.\quad (4.11)$$

Звівши праву та ліву частини рівняння (4.11) у квадрат і помноживши на знаменник правої частини, отримали наступне рівняння:

$$3 \left(h^2 + h\rho \frac{dh}{d\rho} + \rho^2 \left(\frac{dh}{d\rho} \right)^2 \right) \eta^2 = \left(h + \rho \frac{dh}{d\rho} \right)^2. \quad (4.12)$$

Рівняння (101) привели до вигляду:

$$\left(3\eta^2 - 1 \right) \rho^2 \left(\frac{dh}{d\rho} \right)^2 + \left(3\eta^2 - 2 \right) h\rho \frac{dh}{d\rho} + \left(3\eta^2 - 1 \right) h^2 = 0. \quad (4.13)$$

Визначили дискримінант квадратного рівняння, що вийшло:

$$D = \left(\left(3\eta^2 - 2 \right) h\rho \right)^2 - 4 \left(3\eta^2 - 1 \right) \rho^2 \left(3\eta^2 - 1 \right) h^2 = 3\rho^2 h^2 \eta^2 (4 - 9\eta^2) \quad (4.14)$$

В результаті визначення коренів квадратного рівняння маємо такий вираз:

$$\frac{dh}{d\rho} = \frac{-\left(3\eta^2 - 2 \right) h\rho \pm \sqrt{3\rho^2 h^2 \eta^2 (4 - 9\eta^2)}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right) \rho^2} = \frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta \sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right)} \cdot \frac{h}{\rho}. \quad (4.15)$$

Вирішили отримане диференціальне рівняння першого роду з роздільними змінними:

$$\frac{dh}{h} = \frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta \sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right)} \cdot \frac{d\rho}{\rho} \Rightarrow h = c_{221_1} \rho^{\frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta \sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right)}}. \quad (4.16)$$

де c_{221_1} – коефіцієнт.

Величину c_{221_1} визначили з граничної умови:

$$h|_{\rho=\rho_0} = h_0 \Rightarrow c_{221_1} = h_0 / \rho_0^{\frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta \sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right)}}. \quad (4.17)$$

Підставивши вираз (4.17) в (4.16), отримали рівняння для визначення форми каналу, що забезпечує сталість показника напруженого стану у процесі деформування:

$$h = h_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta \sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2 \left(3\eta^2 - 1 \right)}}. \quad (4.18)$$

Область визначення показника напруженого стану характерна для даного способу дослідження пластичності металу визначили з умов:

- знаменник дробу в ступені рівняння (4.18) не може дорівнювати нулю:

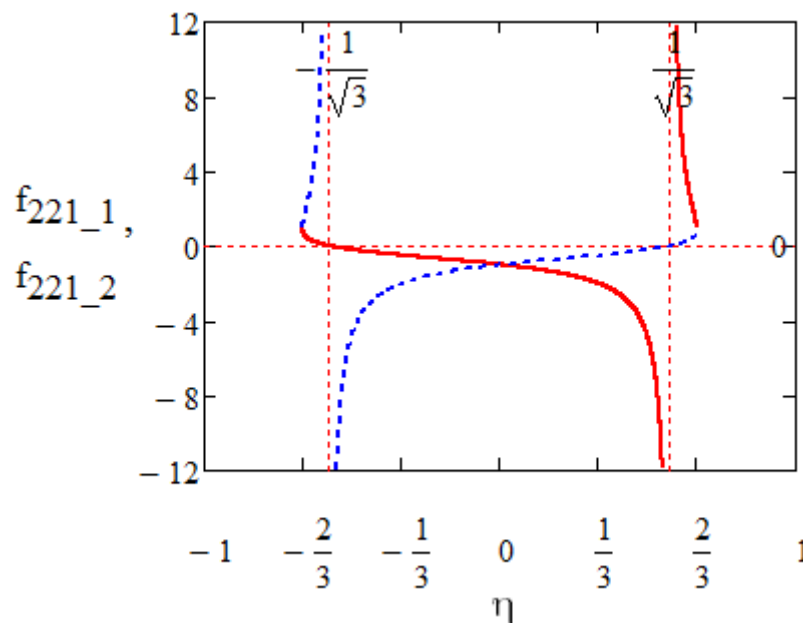
$$\eta \neq \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.19)$$

- для всіх точок каналу виконуються умови:

$$0 < \frac{h}{h_0} \leq 1 \cap 1 \leq \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4.20)$$

з якого випливає, що ступінь дробу рівняння (4.18) має бути не позитивною величиною. Для визначення показників напруженого стану, що відповідають цій умові, розглянемо графіки функцій (рис. 4.2):

$$f_{221_1, 221_2}(\eta) = \frac{2 - 3\eta^2 \pm 3\eta\sqrt{4/3 - 3\eta^2}}{2(3\eta^2 - 1)}. \quad (4.21)$$



— - графік функції $f_{221_1}(\eta)$; - - - - графік функції $f_{221_2}(\eta)$

Рисунок 4.2 – Графіки функцій (4.21)

З представлених графіків випливає, що діапазон показника напруженого стану, що задовольняє умові (4.20), визначається нерівністю:

$$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq \eta \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.22)$$

Об'єднавши умови (4.19) та (4.22) остаточно отримуємо, що за допомогою радіального видавлювання в канал, форма якого визначається рівнянням (4.18), можна досліджувати пластичність у наступному діапазоні зміни показника напруженого стану:

$$\eta \in \left(-\frac{1}{\sqrt{3}}; \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \quad (4.23)$$

Так само з (4.20) та рис. 4.2, з урахуванням того, що для забезпечення менших значень величини показника напруженого стану, висота каналу повинна зменшуватися інтенсивніше, для створення більшого опору течії та більшого гідростатичного тиску, випливає, що функція ступеня в рівнянні (4.18) має бути зростаючою по всій області визначення. Таким чином, отримали наступне рівняння визначення висоти каналу h , що забезпечує сталість величини показника напруженого стану при радіальному видавлюванні:

$$h = h_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{2-3\eta^2-3\eta\sqrt{4/3-3\eta^2}}{2(3\eta^2-1)}}. \quad (4.24)$$

Для перевірки адекватності отриманих аналітичних результатів, а так більш точного дослідження способу, був виконаний аналіз напружено-деформованого стану заготовки у процесі формозміни засобами комп'ютерного моделювання у спеціальній програмі.

4.2 Дослідження способу визначення пластичності металу радіальним видавлюванням у канал певної форми, що забезпечує сталість показника напруженого стану в процесі деформування за допомогою комп'ютерного моделювання

4.2.1 Матеріал дослідження

З виразу (4.24) випливає, що основними факторами, що впливають на фактичну величину показника напруженого стану: початкова висота каналу, радіус заготовки та очікувана величина показника напруженого стану.

При виборі діапазону варіювання очікуваного показника напруженого стану враховувалося, що:

- при практичній реалізації відсутня можливість досягнення показників близьких до $-\frac{1}{\sqrt{3}}$ через набуття каналом форми тонкої щілини;

- у роботі [16] вказується на неможливість досягнення радіальним видавлюванням у канал певної форми величин показника напруженого стану більших за $\frac{1}{3}$.

Таким чином, незважаючи на те, що відповідно до аналітичного рішення область визначення очікуваного показника напруженого стану визначається виразом (4.23), у дослідженні приймалися:

$$\eta = \left\{ -\frac{1}{3}; 0; \frac{1}{3} \right\} \quad (4.25)$$

Початкова висота каналу визначалася з умов:

- відповідно до [16], вираз (4.24) точно виконується при достатньо великому відношенні $\frac{\rho_0}{h_0}$, з чого випливає, що початкова висота каналу повинна бути найменшою допустимою величиною:

$$h_0 \rightarrow 0; \quad (4.26)$$

- мінімальна допустима висота каналу обмежується можливостями складання експериментального оснащення, і для задач моделювання визначалася з умови, що за очікуваного показника напруженого стану, що дорівнює $-\frac{1}{3}$ на радіусі рівному $2,4\rho_0$ висота каналу не менше одного міліметра:

$$h_0 \left(\frac{2,4\rho_0}{\rho_0} \right) \frac{2-3(-1/3)^2-3(-1/3)\sqrt{4/3-3(-1/3)^2}}{2(3(-1/3)^2-1)} \geq 1 \Rightarrow h_0 \geq 5,75\text{мм.} \quad (4.27)$$

В результаті об'єднання умов (4.26) та (4.27) у дослідженні приймалася наступна початкова висота каналу:

$$h_0=6\text{мм.} \quad (4.28)$$

Діаметри заготовок вибиралися за аналогією з розмірним рядом зразків, застосовуваних для побудови кривих зміцнення з випробувань на стиск з урахуванням вищезазначеної рекомендації щодо відношення радіусу заготовки до початкової висоти каналу:

$$d_0 = \{10,15,20,30\}_{\text{мм}} \quad (4.29)$$

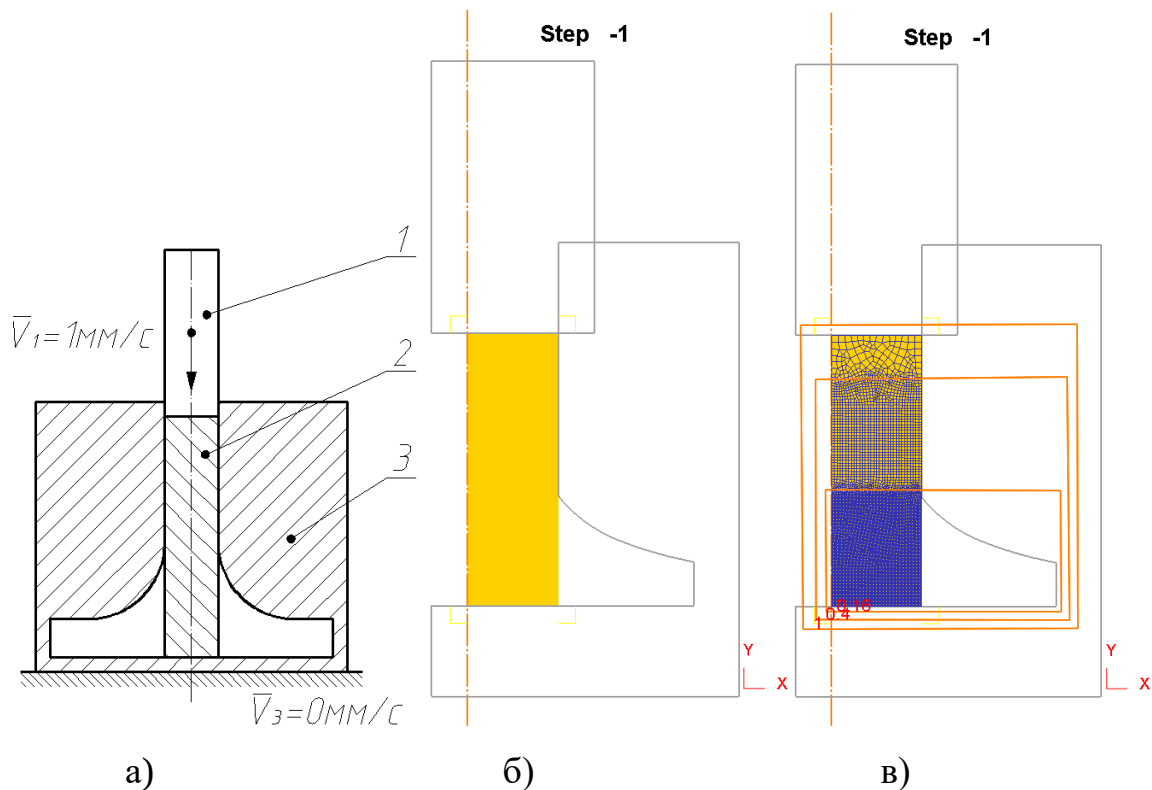
Моделювання проводили для всіх можливих комбінацій розглянутих вище властивостей. В якості досліджуваного матеріалу був прийнятий алюмінієвий сплав Д16.

4.2.2 Комп'ютерне моделювання

Для визначення параметрів напружено-деформованого стану матеріалу зразків при формозміні було виконано комп'ютерне моделювання процесів у спеціальній програмі, розрахункове ядро якої засноване на чисельному методі кінцевих елементів.

При моделюванні прийнята осесиметрична розрахункова схема, представлена на рис. 4.3, а та 4.3, б. Геометричні розміри зразків та каналів визначалися виразами (4.24), (4.25), (4.28) та (4.29).

Вибір типів кінцевих елементів, складання та вирішення системи рівнянь здійснюються автоматично програмою. Для якісної побудови кінцево-елементної сітки (рис. 4.3, в) зі згущенням області, що цікавить, застосовувалися вікна щільності з відносним розміром елементів – 0,4 та 0,16. Попередження виродження елементів сітки [32], та якісне виконання розрахунку визначалися умовами: допустима глибина проникнення заготовки до інструменту – 0,01 мм; максимальне збільшення часу без перерозподілу сітки – 1 с.



а – розрахункова схема; б - розрахункова схема, візуалізована в програмній системі; в – звичайно-елементна модель зразка; 1 – пуансон; 2 – зразок; 3 – матриця

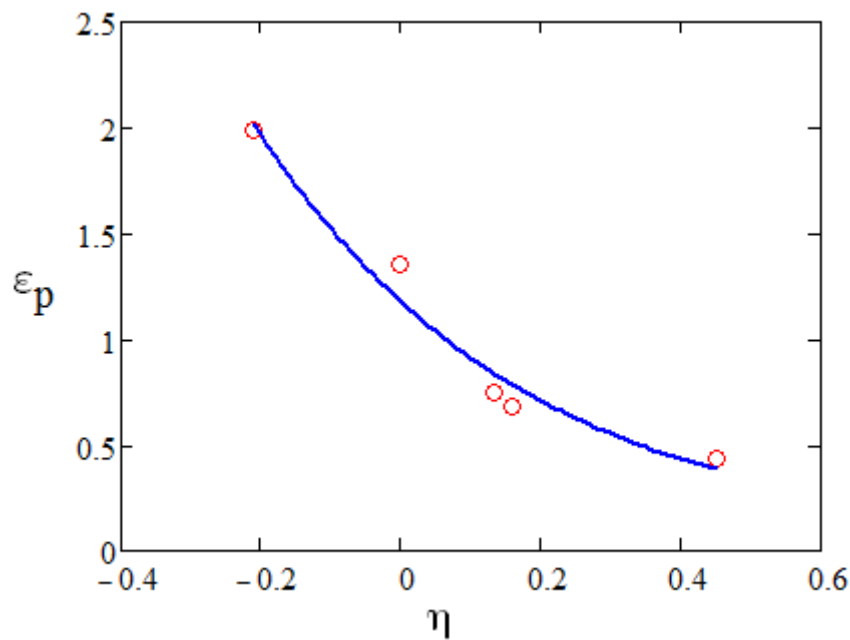
Рисунок 4.3 – Моделювання радіального видавлювання зразка в канал певної форми

Модель матеріалу заготовки – жорстков'язкопластична. Опір деформації та інші необхідні фізичні властивості, аналізованої суцільного середовища, були прийняті зі стандартної бібліотеки матеріалів програми для алюмінієвого сплаву Д16.

Діаграма пластичності матеріалу приймалася в якості функції:

$$\varepsilon_p(\eta) = 1,146e^{-0,871\eta} + 0,031. \quad (4.30)$$

Коефіцієнти експоненційної функції (4.30) отримані підбором, заснованому на мінімізації відхилення апроксимуючої функції від експериментальних результатів, представлених у роботі [8], методом Левенберга-Марквардта [33], за допомогою спеціальної програми (рис. 4.4). Коефіцієнт кореляції Пірсона [34] експериментальних даних та апроксимуючої функції (4.30) становив 98,324%.



— - графік функції (4.30); о - експериментальні результати [8]

Рисунок 4.4 – Діаграма пластичності алюмінієвого сплаву Д16

Модель тертя приймалася в якості комбінованого закону [35, 36]:

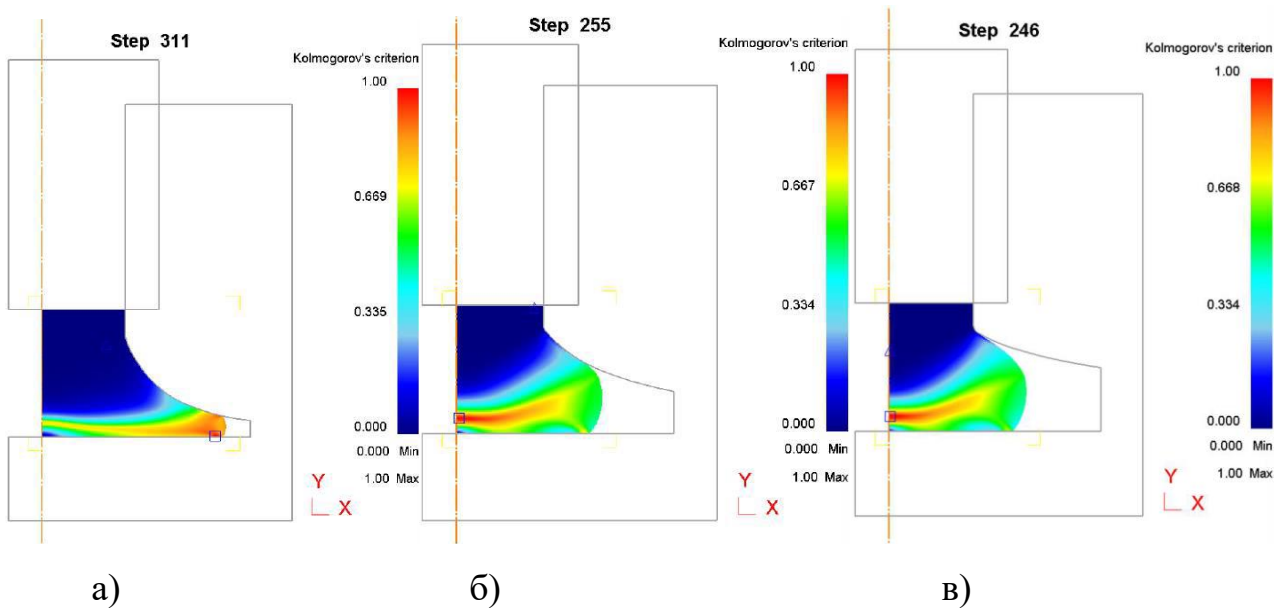
$$\tau_k = \begin{cases} c_{2222_1} p_k, & 0 \leq p_k < c_{2222_2} \sigma_S / (\sqrt{3} c_{2222_1}), \\ c_{2222_2} \sigma_S / \sqrt{3}, & c_{2222_2} \sigma_S / (\sqrt{3} c_{2222_1}) \leq p_k < \infty; \end{cases} \quad (4.31)$$

де τ_k – питома сила контактного тертя, МПа;

p_k – тиск на контактній поверхні, МПа;

c_{2222_1} , c_{2222_2} – відповідно, коефіцієнт та фактор тертя [66]:

$$c_{2222_1}=0,2, c_{2222_2}=0,5. \quad (4.32)$$



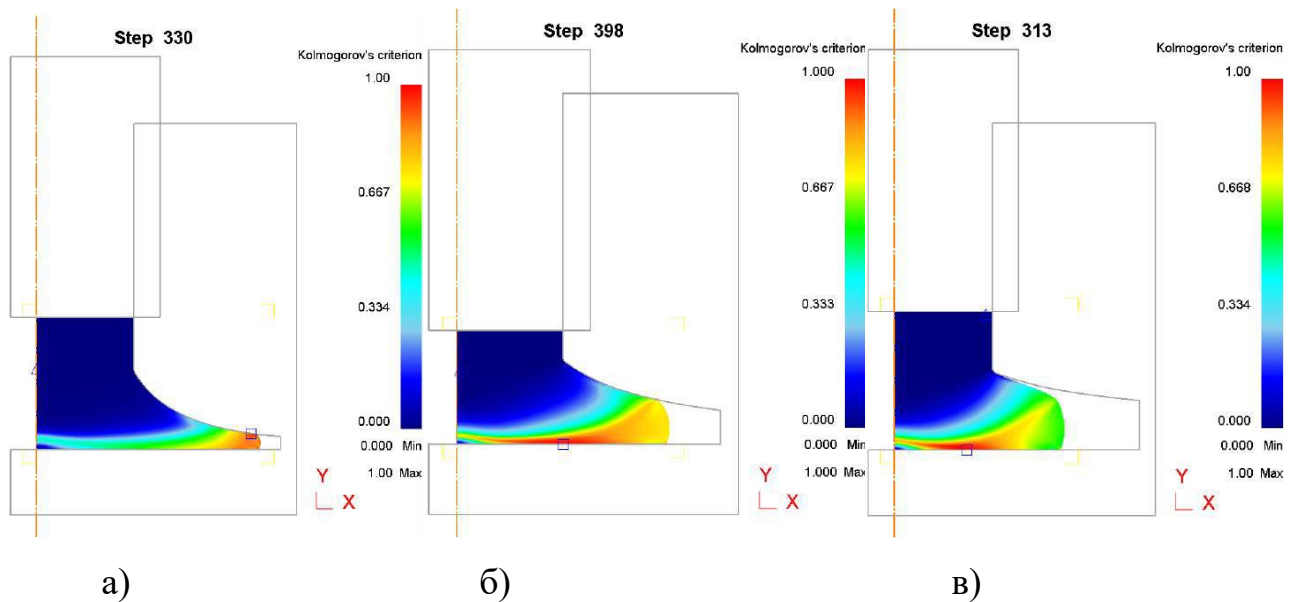
а - $\eta = -1/3$; б - $\eta = 0$; в - $\eta = 1/3$;

□ - положення точки з максимальним значенням; △ - положення точки з мінімальним значенням

Рисунок 4.5 – Розподіл величини критерію (1.13) при радіальному видавлюванні заготовок діаметром десять міліметрів у канал певної форми

Вихідними даними моделювання були параметри напружено-деформованого стану у місці виникнення руйнування, необхідні для визначення величин показників напруженого стану та виду напруженого стану при формозміні. Місце та момент утворення руйнування визначалися за допомогою розробленої користувацької підпрограми, подібної до описаної в роботі [37].

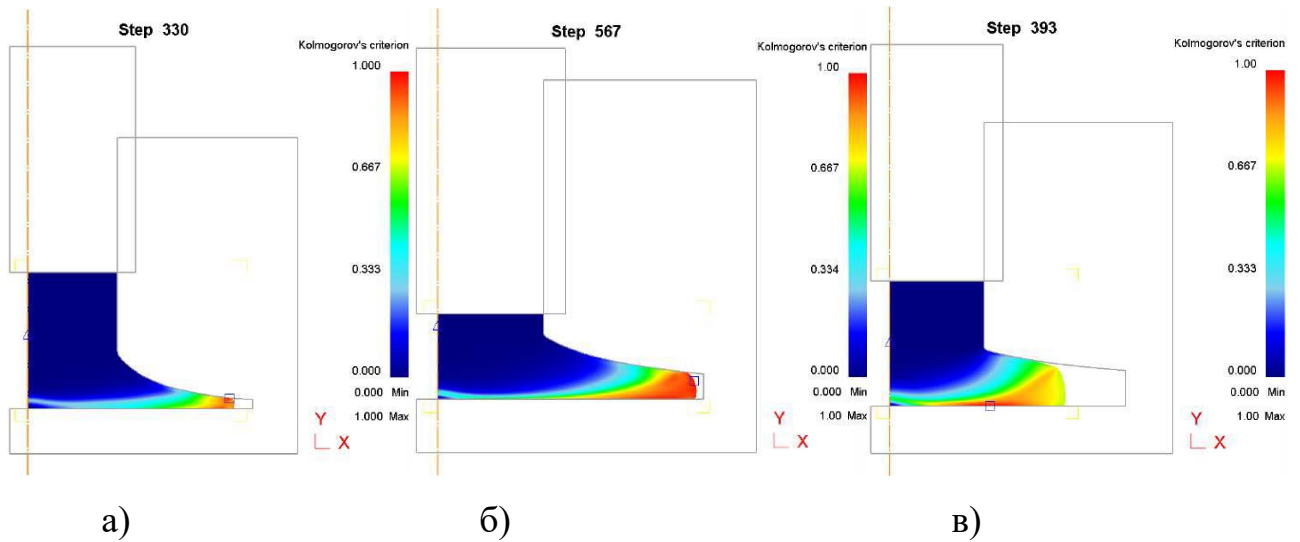
Підпрограма написана мовою програмування Fortran та скомпільована для програмної системи засобами Absoft Pro Fortran 9.0. Підпрограма, підключаючись до постпроцесора програмної системи, здійснює математичну обробку полів змінних, збережених у базі даних моделювання, та визначає розподіл величини критерію (1.13), за об'ємом заготовки у процесі формоутворення. Визначені таким чином місця призначалися як трасовані точки, в яких здійснювалося визначення вихідних параметрів, із записом в окремий файл для подальшої математичної обробки. Положення місць виникнення руйнування зразків представлено на рис. 4.5-4.8.



а - $\eta = -1/3$; б - $\eta = 0$; в - $\eta = 1/3$;

□ - положення точки з максимальним значенням; △ - положення точки з мінімальним значенням

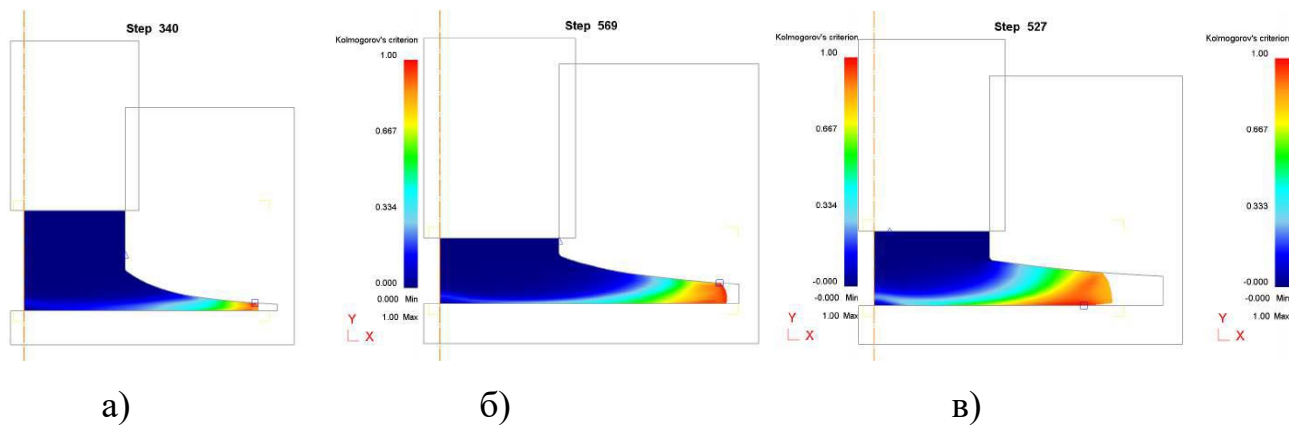
Рисунок 4.6 – Розподіл величини критерію (1.13) при радіальному видавлюванні заготовок діаметром п'ятнадцять міліметрів у канал певної форми



а - $\eta = -1/3$; б - $\eta = 0$; в - $\eta = 1/3$;

□ - положення точки з максимальним значенням; △ - положення точки з мінімальним значенням

Рисунок 4.7 – Розподіл величини критерію (1.13) при радіальному видавлюванні заготовок діаметром двадцять міліметрів у канал певної форми



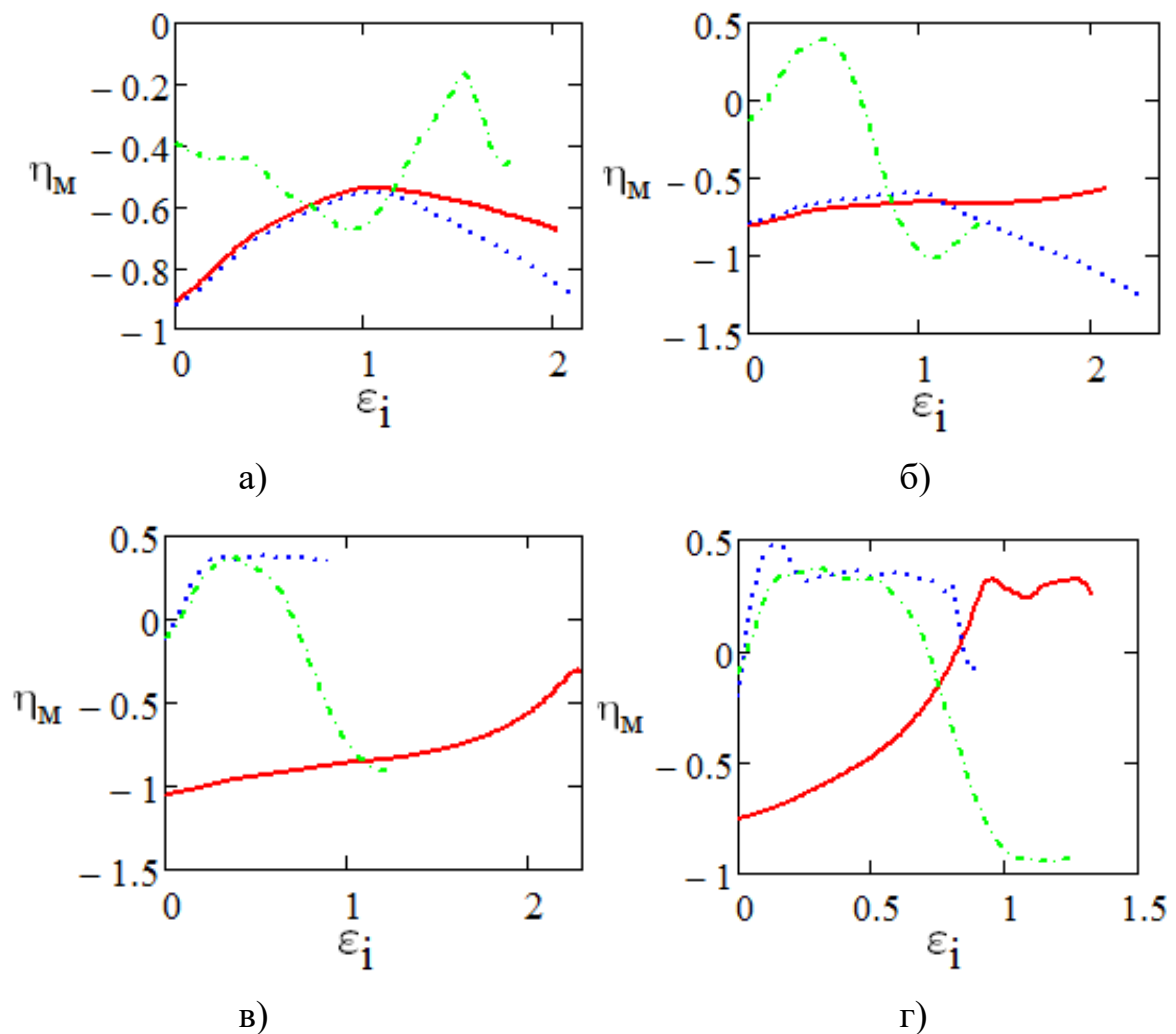
а - $\eta = -1/3$; б - $\eta = 0$; в - $\eta = 1/3$;

□ - положення точки з максимальним значенням; △ - положення точки з мінімальним значенням

Рисунок 4.8 – Розподіл величини критерію (1.13) при радіальному видавлюванні заготовок діаметром тридцять міліметрів у канал певної форми

4.2.3 Математична обробка результатів моделювання

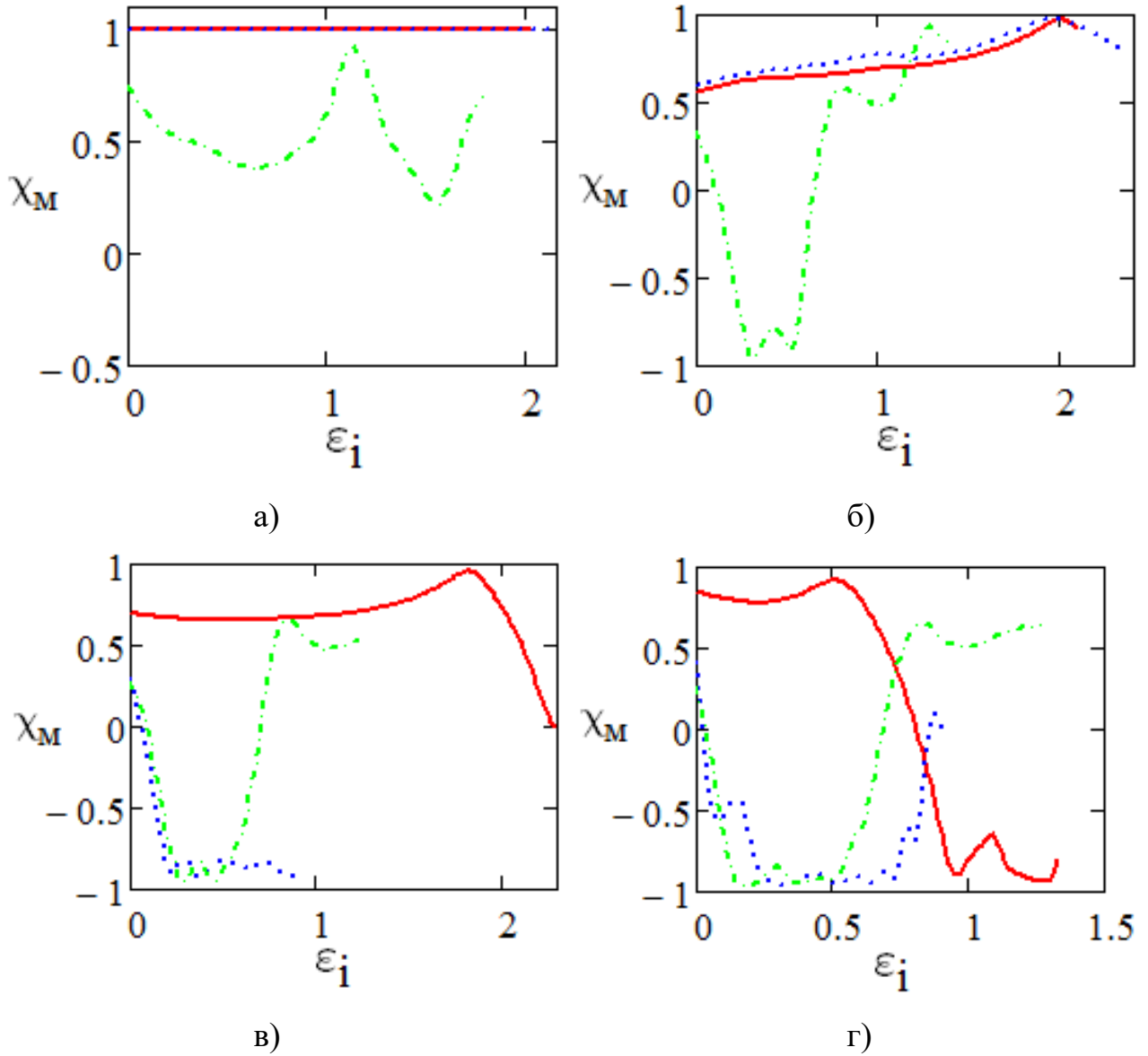
Математична обробка результатів моделювання проводилася в програмі математичної обробки даних, у процесі якої було визначено величини показників напруженого стану η_M та виду напруженого стану χ_M у місці виникнення руйнування під час деформування. Отримані дані в вигляді графіків представлені на рис. 4.9 та 4.10.



а - $d_0 = 10$ мм; б - $d_0 = 15$ мм; в - $d_0 = 20$ мм; г - $d_0 = 30$ мм;

— - $\eta = -1/3$; - - - $\eta = 0$; — - — - $\eta = 1/3$

Рисунок 4.9 – Величина показника напруженого стану на місці виникнення руйнування у процесі радіального видавлювання в канал певної форми



а - $d_0 = 10$ мм; б - $d_0 = 15$ мм; в - $d_0 = 20$ мм; г - $d_0 = 30$ мм;

— - $\eta = -1/3$; - - - $\eta = 0$; ···· $\eta = 1/3$

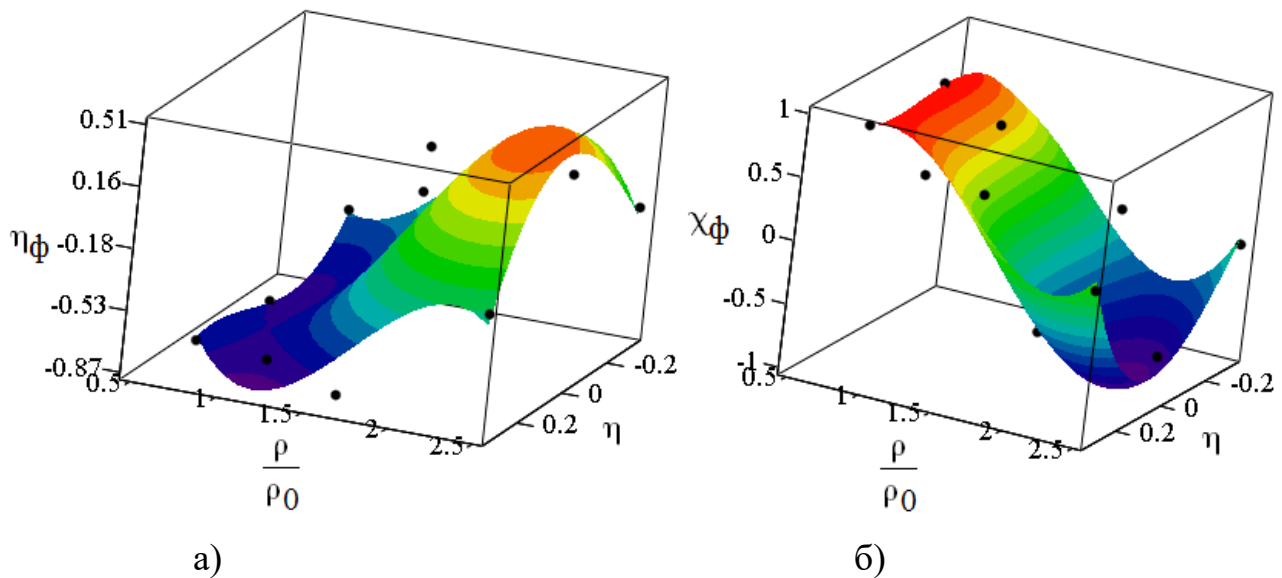
Рисунок 4.10 – Величина показника виду напруженого стану на місці виникнення руйнування у процесі радіального видавлювання в канал певної форми

Як видно з рис. 4.9 і 4.10, при формозміні показники напруженого стану та виду напруженого стану не є постійними величинами. Для подальшої

обробки було визначено середні величини показника напруженого стану η_{Φ} та виду напруженого стану χ_{Φ} , що визначаються як:

$$\eta_{\Phi} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \eta_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}, \quad \chi_{\Phi} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \chi_M d\varepsilon_i \bigg|_{t=t_p}. \quad (4.33)$$

Для виявлення багатфакторної залежності показників напруженого стану та виду напруженого стану в місці та в момент руйнування від величин (4.25), (4.28) та (4.29), застосовувалася вбудована функція програми математичної обробки даних, яка визначила коефіцієнти поліноміальних регресійних функцій поверхонь третього порядку, що якнайкраще апроксимують експериментальні результати з позицій методу найменших квадратів [34, 40, 41]. В якості факторів, що варіюються, приймалися: очікувана величина показника напруженого стану, та відношення радіуса заготовки до початкової висоти каналу. Отримані поверхні відгуку представлені на рис. 4.11, коефіцієнти кореляції яких, відповідно, дорівнюють 90,321% та 93,982%.



а – показника напруженого стану; б – показника виду напруженого стану

Рисунок 4.11 – Поверхні відгуку із зазначеним положенням результатів моделювання

У табл. 4.1 представлений план повнофакторного чисельного експерименту з результатами: середні показники напруженого стану та виду напруженого стану, абсолютна та наведена похибки очікуваного та отриманого в моделювання показників напруженого стану.

Таблиця 4.1 - План повнофакторного чисельного експерименту

№ досліджу	Рівень фактору		Результати моделювання			
	η	ρ_0/η_0	η_Φ	χ_Φ	Δ	$\delta, \%$
1	-1/3	5/6	-0,471	0,518	0,137	11,885
2	0	5/6	-0,7	0,999	0,7	60,58
3	1/3	5/6	-0,639	1	0,973	84,228
4	-1/3	5/4	-0,297	0,088	0,036	3,142
5	0	5/4	-0,815	0,785	0,815	70,599
6	1/3	5/4	-0,675	0,724	1,008	87,315
7	-1/3	5/3	-0,15	-0,091	0,184	15,914
8	0	5/3	0,305	-0,728	0,305	26,444
9	1/3	5/3	-0,799	0,685	1,132	98,073
10	-1/3	5/2	-0,168	-0,134	0,166	14,335
11	0	5/2	0,294	-0,688	0,294	25,463
12	1/3	5/2	-0,205	0,161	0,538	46,602

Абсолютна похибка Δ визначалася як:

$$\Delta = |\eta - \eta_\Phi|. \quad (4.34)$$

Наведена похибка δ характеризує порядок помилки очікуваного показника напруженого стану та визначалася як:

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{\Delta_\eta} \right|, \quad (4.35)$$

де Δ_η – теоретична величина діапазону варіювання показника напруженого стану при радіальному видавлюванні в певному каналі форми, з виразу (4.23) відповідно дорівнює:

$$\Delta_{\eta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (4.36)$$

4.2.4 Аналіз результатів

Підсумовуючи дослідження слід зазначити наступне:

1) Знайдені поверхні відгуку вказують на те, що радіальне видавлювання в канал певної форми є ефективним способом дослідження пластичності пруткового матеріалу, що володіє широким діапазонами варіювання показників напруженого стану та виду напруженого стану, що включають як позитивні, так і негативні величини (для алюмінієвого сплаву Д16 відповідно – -0,87...0,51 і -1...1), але більш придатним для досліджень у негативній області показників напруженого стану.

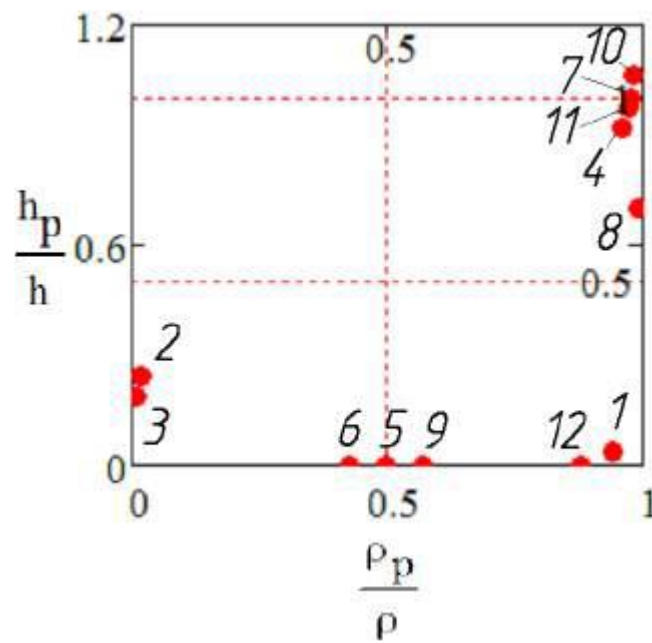
2) Форма каналу, що визначається виразом (4.24), не дозволяє забезпечити сталість у процесі деформування показника напруженого стану.

3) Очікуваний показник напруженого стану має значну похибкою щодо фактичної величини: для алюмінієвого сплаву Д16 величина наведеної похибки у різних моделюваннях змінювалася від 3,142% до 98,073%, середня арифметична величина наведеної похибки всіх дослідів – 45,382%.

Така велика розбіжність розрахункових і фактичних значень обумовлено наступним:

- припущення про рівність нуля зсувних компонентів тензора швидкості деформація при радіальному видавлюванні не виконується;

- не завжди виконується припущення про виникнення руйнування на бічній поверхні фланцю, що видавлюється: залежно від рівнів варійованих факторів місце ініціювання руйнування у виконаних розрахунках переміщалося, як в осьовому, так і у радіальному напрямках. На рис. 4.12 представлені точки, що відображають місця виникнення руйнувань при моделюванні у відносних координатах.



1...12 – результат дослідів №1...12 відповідно до таблиці 3; h_p , ρ_p – координати (відповідно радіус та висота) місця виникнення руйнування

Рисунок 4.12 – Розташування місць виникнення руйнувань у чисельних експериментах

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оцінка дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного листового штампування деталей спецтехніки, що призводить до підвищенні ефективності процесів холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету кафедри галузевого машинобудування: д. т. н., проф. Савуляк В. І., к. т. н., доц. Шиліна О. П. та к. т. н., доц. Янченко О. Б.

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	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі

	властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	властивості продукту на рівні аналогів	властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	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 експлуатаційни х 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	Конкуренція немає
Практична здійсненість					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати 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 повідомлення 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 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Шиліна О. П.	Янченко О. Б.
	Бали, виставлені експертами:		
1	3	3	3
2	4	4	4
3	3	3	3
4	4	4	4
5	2	3	2
6	3	3	3
7	2	2	2
8	4	4	4
9	3	3	3
10	4	4	4
11	4	4	4
12	3	3	2
Сума балів	СБ ₁ =39	СБ ₂ =40	СБ ₃ =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{39 + 40 + 38}{3} = 39$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 39 балів, і згідно з таблицею 5.3, це вказує на вище середнього рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результатом магістерської роботи є оцінка впливу траєкторії переміщення згинального ролика на етапі підгину на використання ресурсу пластичності матеріалу трубної заготовки у процесах згинання проштовхуванням на трубозгинальному верстаті та підтвердження ефективності цього процесу.

Результати досліджень магістерської роботи можуть бути реалізовані 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 елемент трубопроводу отриманий зварюванням. Основними недоліками аналога є непроварювання, що відбувається при недостатньому плавленні та склеюванні. Також до недоліків можна віднести пористість при зварюванні, що означає утворення невеликих повітряних кишень або пір, які послаблюють зварний шов. У розробці дана проблема вирішується безшовні труби будь-якої конфігурації отримані холодним пластичним деформуванням. Також система випереджає аналог за такими параметрами як жаростійкість, корозійностійкість, висока питома міцність, викликані особливостями умов експлуатації, що полягають у взаємодії з високошвидкісними потоками плазми та газу, з агресивними середовищами тощо.

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

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

Таблиця 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	10%
Функціонал, бар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1,13	25%
Похибка, %	2	1	2	40%
Напрацювання на відмову, год	3000	5000	1,7	15%
Масо-габарити, кг	0,5	0,5	1	10%

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.

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

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

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

$$q_4 = \frac{5000}{3000} = 1,7;$$

$$q_5 = \frac{0,5}{0,5} = 1.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

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

$$K_{\text{я.в.}} = 1,08 \cdot 0,1 + 1,13 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,4 + 1,7 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,1 = 1,55$$

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	0,5	0,5
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.

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

$$K = \frac{1,55}{0,8} = 1,94.$$

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_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (5.6)$$

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.

Для розробки необхідно залучити інженера з посадовим окладом 12000 грн. Кількість робочих днів у місяці складає 21, а кількість робочих днів інженера складає 35. Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 5.7.

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	12000	571,4	35	20000
Всього				24762

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.

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

$$З_d = 0,11 * (24762 + 850,0) = 2817,31 \text{ (грн)}$$

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

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

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:

$$H_{зп} = (24762 + 850,0 + 2817,31) \cdot \frac{22}{100} = 6254,43 \text{ (грн)}$$

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:

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

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_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 5.9.

6. Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

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

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{np.i}$ – 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.

Таблиця 5.9 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
12X18H10T	200	100	20000
Всього			20000
З врахуванням коефіцієнта транспортування			22000

Отримані результати необхідно звести до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Трубогвинтальний верстат	1	15000	15000
Ролики	3	200	600
Всього			17160

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 таблиці 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 з врахування транспортних витрат			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:

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

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;

$T_{г}$ – 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. Гідравлічний прес	20000	2	1	833,33
2. Фрезерний верстат	15000	4	1	312,50
Всього				1145,83

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.

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

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;

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

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

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

$$B_e = \frac{0,25 \cdot 270 \cdot 10,5 \cdot 0,5}{0,8} = 442,97$$

10. Службові відрядження.

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

$$B_{св} = (З_o + З_p) * \frac{H_{св}}{100\%}, \quad (5.16)$$

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

$$B_{св} = 0,2 * (24762 + 850,0) = 5122,38$$

11. Накладні (загальновиробничі) витрати $B_{нзв}$ 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 $B_{нзв}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.17)$$

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

$$B_{\text{нзв}} = (24762 + 850,0) \cdot \frac{100}{100\%} = 25611,9 \text{ грн}$$

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

$$B = 24762 + 850 + 2817,31 + 6254,43 + 22000 + 17160 + 1100 + 1145,83 + 442,97 + 5122,38 + 25611,9 = 107926,73 \text{ грн}$$

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:

$$ЗВ = \frac{107926,73}{0,7} = 154181,04 \text{ грн.}$$

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

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

де $\Delta\Pi_o$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

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

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 підвищиться ефективність процесів холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки. Припустимо, що ціна зросте на 100 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 1500 шт., протягом другого року – на 3000 шт., протягом третього року на 5000 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 2500 шт., а її ціна до 200 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_1 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot 1500] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 119578,55 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_2 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot (1500 + 3000)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 480615,78 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_3 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot (1500 + 3000 + 5000)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 736855,53 \text{ грн.}\end{aligned}$$

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 ($k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$).

$$PV = 2 \cdot 154181,04 = 308362,08$$

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.;

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

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).

$$ПП = \frac{119578,55}{(1 + 0,2)^1} + \frac{480615,78}{(1 + 0,2)^2} + \frac{736855,53}{(1 + 0,2)^3} = 861814,12 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (861814,12 - 308362,08) = 553452,04 \text{ грн.}$$

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:

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

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

$$E_e = \sqrt[3]{1 + \frac{553452,04}{308362,08}} - 1 = 0,66 = 66\%$$

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 2022 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

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

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

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

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

$$T_{ок} = \frac{1}{E_e} \quad (4.25)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,66} = 1,5 \text{ роки}$$

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

ВИСНОВКИ

1. З дослідження напружено-деформованого стану суцільних циліндричних зразків у місці виникнення граничного деформування при крученні під зовнішнім тиском встановлено, що величини (1.22), (1.23) в процесі випробування змінюються немонотонно, у зв'язку з чим в якості показника накопиченої деформації, з відомих показників, застосовні тільки величини (1.20) і (1.21), що відрізняють постійним множником і тому рівнозначні щодо відносного відхилення діаграм пластичності для різноманітних видів напруженого стану.

2. Аналіз відомих способів дослідження пластичності матеріалу листових та об'ємних заготовок на одному випробувальному устаткуванні, без застосування спеціалізованих пристроїв показав, що тільки радіальне видавлювання суцільних циліндричних зразків у канал певної форми має широкі діапазони варіювання показника напруженого стану та показника виду напруженого стану, для алюмінієвого сплаву Д16, відповідно, рівними $-0,9...0,5$ та $-1...1$. Тим не менш, при застосуванні методу необхідно враховувати, що величина наведеної похибки очікуваного показника напруженого стану щодо теоретичного діапазону варіювання показника напруженого стану у деяких випадках більше 98%.

3. На основі математичного опису в термінах механіки суцільного середовища процесу досягнення граничного деформування, що базується на уявленні про накопичення дефектів деформаційного походження, з врахуванням факторів, що на нього впливають, сформульовано загальний вигляд теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу ізотропних металів процесу обробки матеріалів тиском, уточненням якої, за рахунок застосування відомих гіпотез та експериментально встановлених фактів, отримано критерій, який дозволяє визначати досягнення граничного деформування заготовок з ізотропних металів у процесах холодного листового штампування.

4. Здійснено експериментальну перевірку та оцінку ефективності створеної теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу в процесах холодного листового штампування на алюмінієвих сплавах АМг6 і Д16 і стали А710, внаслідок чого визначено максимальну та середню відносні похибки діаграми пластичності, що отримана із створеної моделі від експериментальної, для досліджуваних матеріалів відповідно рівні 10,4% та 3,3%, 12,1% та 5,5%, 5,8% та 1,2%. Встановлено, що ці результати менші за найкращі результати відомих критеріїв та апроксимуючих діаграму пластичності функцій більш ніж у 1,4 та 1,7 рази.

5. Проведено апробацію розробленої теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу у процесах холодного листового штампування та створеного на її основі розрахункового апарату при дослідженні впливу траєкторії переміщення згинального ролика на етапі підгину на використання ресурсу пластичності матеріалу трубної заготовки у процесах згинання прошовуванням на трубозгинальному верстаті, в результаті чого підтверджена її ефективність.

6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на вище середнього рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,5 роки.

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. 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.
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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. Staat, M. (2021). An extension strain type Mohr–Coulomb criterion. *Rock mechanics and rock engineering*, 54(12), 6207-6233.
11. 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.
12. Bulzak, T., Pater, Z., Tomczak, J., & Wójcik, Ł. (2020). A rotary compression test for determining the critical value of the Cockcroft–Latham criterion for R260 steel. *International Journal of Damage Mechanics*, 29(6), 874-886.
13. Kukhar, V., Hrushko, O., Markov, O., Anishchenko, O., Prysiashnyi, 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.
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. 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.
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.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.
- 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.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.
- 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.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.
- 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.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.
- 24.Yu, Z.-M., Peng, W.-F., Zhang, X., Oleksandr, M., Titov, V. Evolution of microstructure of aluminum alloy hollow shaft in cross wedge rolling without mandrel / *Journal of Central South University*, 2022, 29(3), pp. 807–820.

25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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 “Mehatronics”. Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100.

33. 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.
34. 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.
35. Тітов В., Гожій С., Мироненко В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1).
36. Калюжный 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.
37. Калюжный В.Л., Бісик С.П., Калюжный 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.
38. 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.
39. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp. 14004.
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 » вересня 2024

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного
листового штампування деталей спецтехніки

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

Ілля РУСИН

« 24 » вересня 2024 р.

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК

1 Найменування і область застосування

Найменування – елемент трубопроводу 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 холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки.

Призначення розробки – створення критерію, що дозволяє оцінювати граничне деформування ізотропної заготовки в процесах холодного листового штампування.

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 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.

4.3 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 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 Вихідні дані для розробки:

1	Матеріал	алюмінієвий сплав Д16, АМг6, сталь А710, 12Х18Н10Т
2	Розмір смуги, мм	25x245x10
3	Кути пропилів, град	0°, 60°, 65°, 75°, 90°, 95°
4	Розмір смуги, мм	35x245x10
5	Кути пропилів, град	110°, 115°
6	Початкова висота каналу, мм	6
7	Діаметри заготовок, мм	10, 15, 20, 30

5.1 Технічні вимоги

- гідравлічний прес зусиллям - 100 кН;
- максимальне переміщення рухомої траверси – до 1500 мм;
- робоча температура – від 20°C до 300°C;
- діапазон швидкостей – до 500 мм/хв.;
- витримка відпалу сплаву АМг6 – 1,5 год;

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 елемента трубопроводу шляхом згинання труби за схемою прошовування на трубозгинальному верстаті 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 736 855,53 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
Ілля РУСИН

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- моделювання процесу згинання труби за схемою прошовування на трубозгинальному верстаті;
- 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 ДЕФОРМАЦІЇ ІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСАХ
ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ СПЕЦТЕХНІКИ

Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування

1. Механічні теорії міцності (критерії миттєвої відмови)

Критерій Coulomb або Rankine

$$\begin{cases} \sigma_1 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \\ \sigma_2 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \\ \sigma_3 \in (-\infty; c_{111_1}] \cup [c_{111_2}; \infty), \end{cases} \quad (1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головне нормальне напруження ($\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$), МПа

Критерій Маріотта або Сен-Венана

$$\begin{cases} \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \\ \sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \\ \sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2) \in (-\infty; c_{111_3}] \cup [c_{111_4}; \infty), \end{cases} \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона

Критерій Tresca

$$\begin{cases} \tau_{12} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \\ \tau_{23} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \\ \tau_{13} \in (-\infty; c_{111_5}] \cup [c_{111_6}; \infty), \end{cases} \quad (3)$$

де $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$ – максимальне дотичне напруження, що діє на площадці, нахилений під кутом 45° до головних осей, МПа;

Критерій Mises

$$\sigma_i \geq c_{111_7}, \quad (4)$$

де σ_i – інтенсивність нормальних напружень, МПа;

2. Енергетичні теорії руйнування

Критерій Freudenthal

$$\int_0^{t_p} \sigma_i d\varepsilon_i = c_{112_1} \quad (5)$$

де t_p – час деформування в момент руйнування, с; ε_i – ступінь деформації.

Критерій Cockcroft та Latham

$$\int_0^{t_p} \sigma_1 d\varepsilon_i = c_{112_2} \quad (6)$$

Критерій Brozzo

$$\int_0^{t_p} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_{cp})} d\varepsilon_i = c_{112_4} \quad (7)$$

де σ_{cp} – середнє нормальне напруження, МПа;

Критерій Ayada

$$\int_0^{t_p} \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i} d\varepsilon_i = c_{112_6}, \quad (8)$$

Перш заст

Довідк. №

Ліній. (Ліній)

Ліній. (Ліній)

Ліній. (Ліній)

Ліній. (Ліній)

Ліній. (Ліній)

08-62.МКР.06.00.001ПЛ			
Макроскопічні феноменологічні теорії руйнування			
Літера Маса Месит			
Аркус 1 Аркус 10			
ВНТУ, ст. гр. 1ГМ-23м			

Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив	Руденко Ю.		
Перевірив	Сивак Р. І.		
Г. контр.			
Н. контр.	Слабко А. В.		
Зам.	Головченко Л. К.		

3. Деформаційні теорії руйнування

Критерій Johnson-Cook

$$\Psi = \int_0^{t_p} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p(\eta)} = 1, \quad (9)$$

де $\Lambda_p(\eta)$ – діаграма пластичності матеріалу, показник накопиченої деформації на момент руйнування якої визначається

виразом $\varepsilon_p = \Lambda|_{t=t_p}$

Критерій В. А. Огороднікова

$$\Psi = \int_0^{t_p} c_{113_1} \frac{\varepsilon_i^{c_{113_1}-1}}{\varepsilon_p^{c_{113_1}}(\eta)} d\varepsilon_i = 1, \quad (10)$$

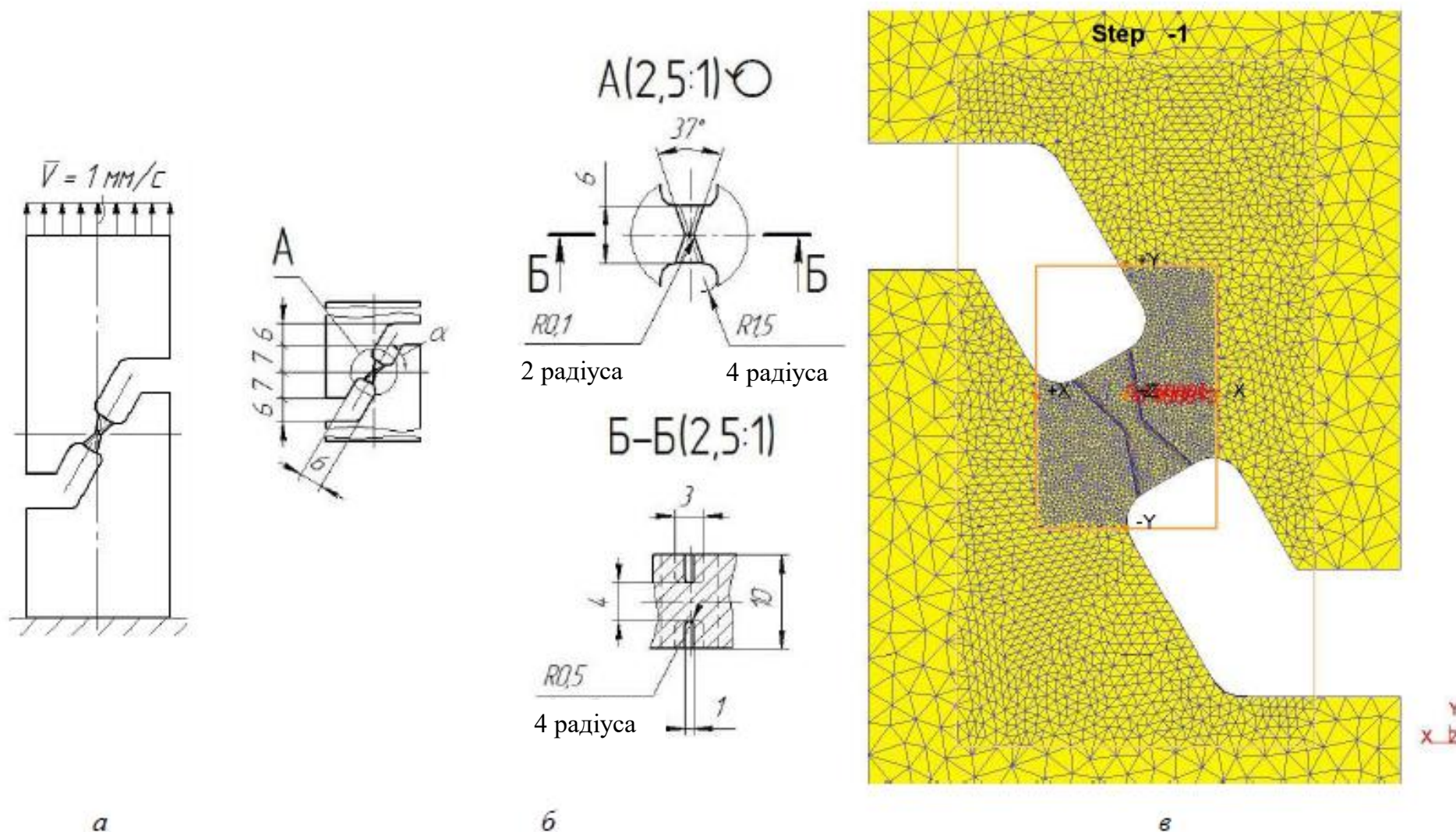
Критерій GISSMO

$$\Psi = \int_0^{t_p} c_{113_1} \frac{\Psi^{(c_{113_1}-1)/c_{113_1}}}{\varepsilon_p(\eta)} d\varepsilon_i \quad (11)$$

Теоретична модель використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування

$$\Psi = c_{31_7} \int_0^t \cos^2(c_{31_4}\chi + c_{31_5}) e^{c_{122_25}\eta} \frac{\tau_{13}}{\sigma_i} \varepsilon_i d\varepsilon_i, \quad (12)$$

Експериментальна верифікація теоретичної моделі використання ресурсу пластичності ізотропного матеріалу в процесах холодного листового штампування



a – розрахункова схема; б – розміри перемички; в – кінцево-елементна модель зразка

Рисунок 1 – Моделювання розтягування спеціальних смуг

Перш за

Довідк №

Підп. керів

Ім'я науков

Ім'я науков

Підп. керів

Ім'я науков

18

08-62.МКР.06.00.003ПЛ

Вм	Арг	№ докум	Підпис	Дата
Розробка		Роско І.Ю.		
Перевірка		Сивак Р.І.		
П.контр				
М.контр		Слабко А.В.		
Дата		Попович П.К.		

Експериментальна верифікація
теоретичної моделі використання
ресурсу пластичності листового
матеріалу в процесі холодного
листового цяткування

Литера	Маса	Масит
Архив 3		Архив 10

ВНТУ, см. ар. 1ГМ-23м

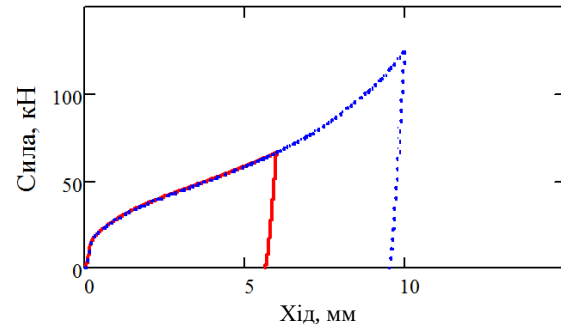


Рисунок 2 – Машинні діаграми випробувань на стиск

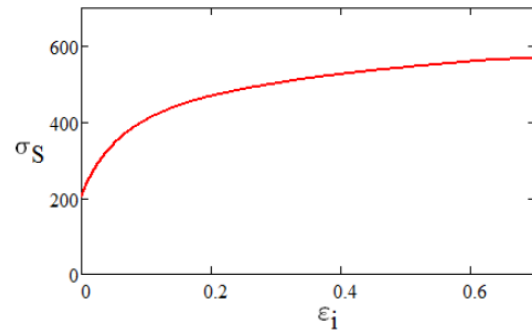
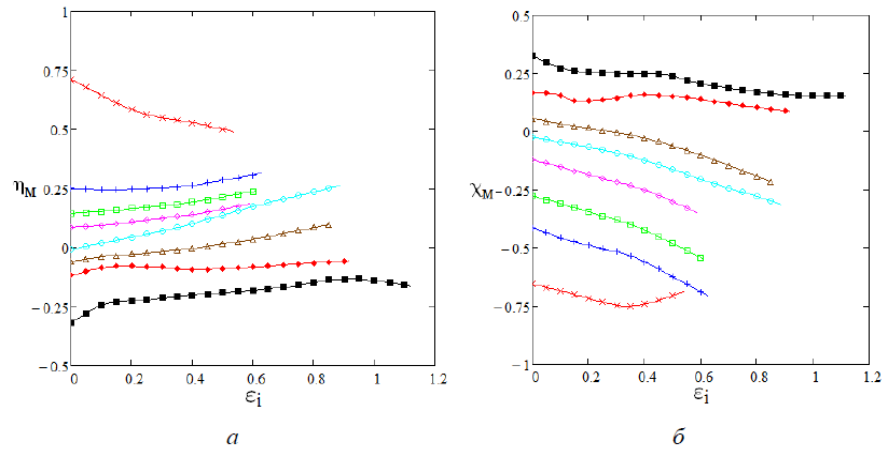


Рисунок 3 – Опір деформації алюмінієвого сплаву АМг6



а – показники напруженого стану у місці виникнення руйнування; *б* – показники виду напруженого стану у місці виникнення руйнування:
 $\times$ - 0° ; $/$ - 60° ; $\square$ - 65° ; $\diamond$ - 75° ; o - 90° ; Δ - 95° ; $\blacklozenge$ - 110° ; $\blacksquare$ - 115°

Рисунок 4 – Результати чисельного експерименту

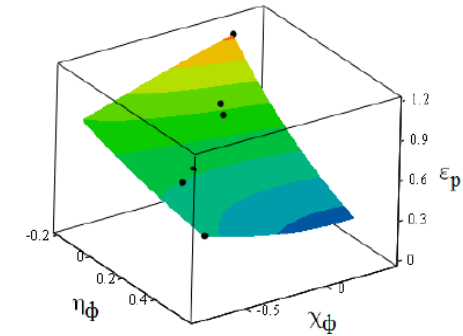
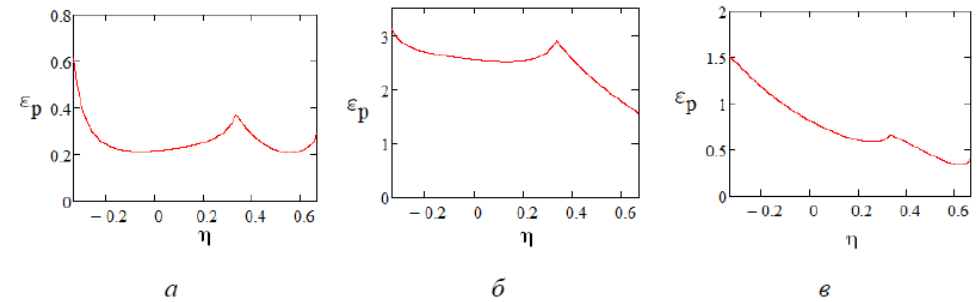
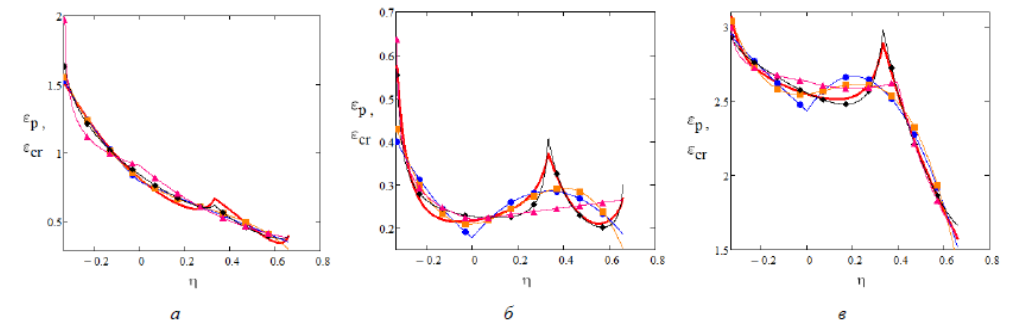


Рисунок 5 – Поверхня пластичності алюмінієвого сплаву АМг6



а - алюмінієвого сплаву Д16; *б* - сталі А710; *в* - алюмінієвого сплаву АМг6

Рисунок 6 – Діаграми пластичності для процесів холодного листового штампування досліджуваних матеріалів



а - алюмінієвого сплаву АМг6; *б* - алюмінієвого сплаву Д16; *в* - сталі А710;
 — ϵ_p ; $\bullet$ - по Козлову (варіант 1); $\blacksquare$ - по Козлову (варіант 2); $\blacktriangle$ - по Y. Бао; $\blacklozenge$ - (12)

Рисунок 7 – Діаграми пластичності ϵ_p та ϵ_{cr} у процесах холодного листового штампування

Перш асст

Додатк. №

ГДН. / Дарма

ГДН. / Дарма

ГДН. / Дарма

ГДН. / Дарма

ГДН. / Дарма

08-62.МКР.06.00.004ПЛ

Зв.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробка		Рисун. 1.10		
Перевірка		Склад Р. 1		
Г. контр.				

Експериментальна верифікація
теоретичної моделі використання
ресурсу пластичності контролюючого
матеріалу в процесі набивання
випробовуваного з'єднання (продовження)

Літера Маса Массит

Аркуш 4 Аркуш 10

Н. контр.	Склад А. В.
Дата	Підпис П. В.

ВНТУ, ст. гр. 1ГМ-23м

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ В ПРОЦЕСАХ ХОЛОДНОГО ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ ПРИ ЗГИНАННІ ТРУБ

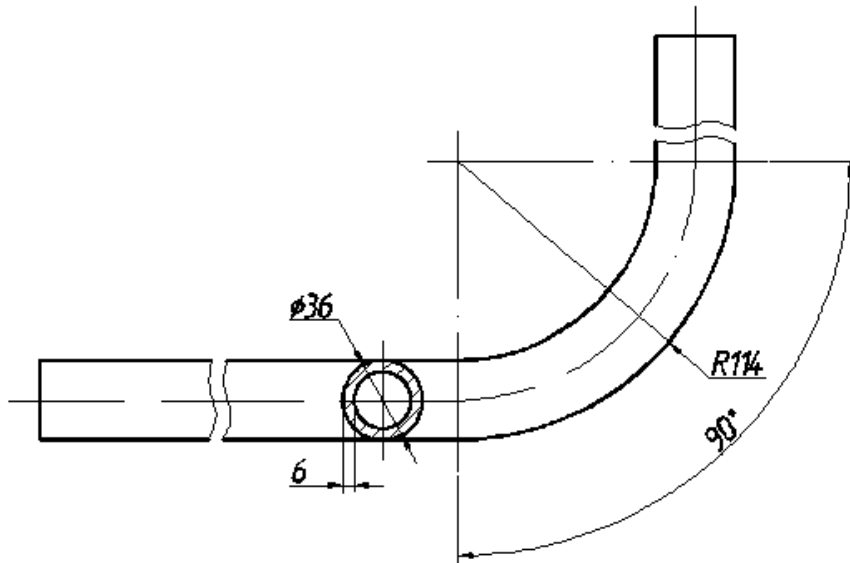
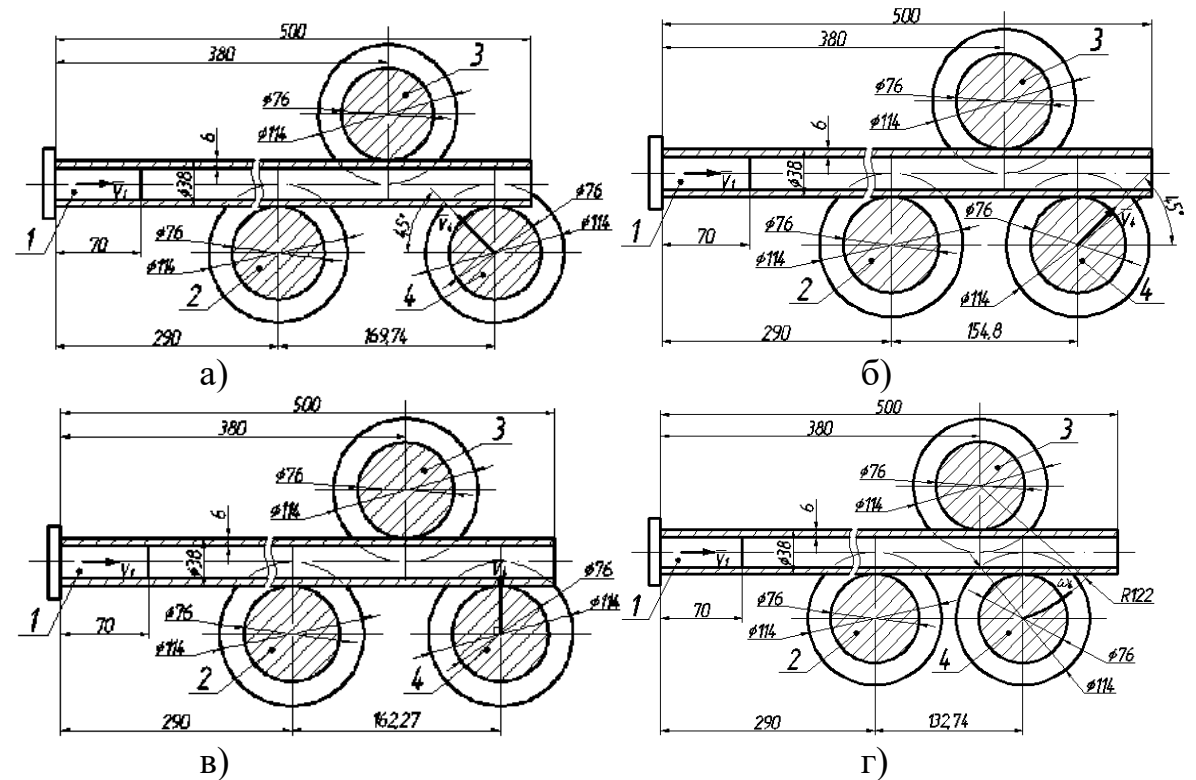


Рисунок 8 – Ескіз дослідної деталі



а - діагональна зустрічна схема, б - діагональна попутна схема, в – прямокутна схема, г – радіально-дужева схема: 1 – штовхач, 2, 3, 4 – згинальні ролики, v_i – лінійна швидкість i -ої ланки, ω_i – кутова швидкість i -ої ланки

Рисунок 9 – Кінематичні розрахункові схеми етапів підгинання

Перш. збег

Додаток №

Робот. / Дата

Робот. / Дата

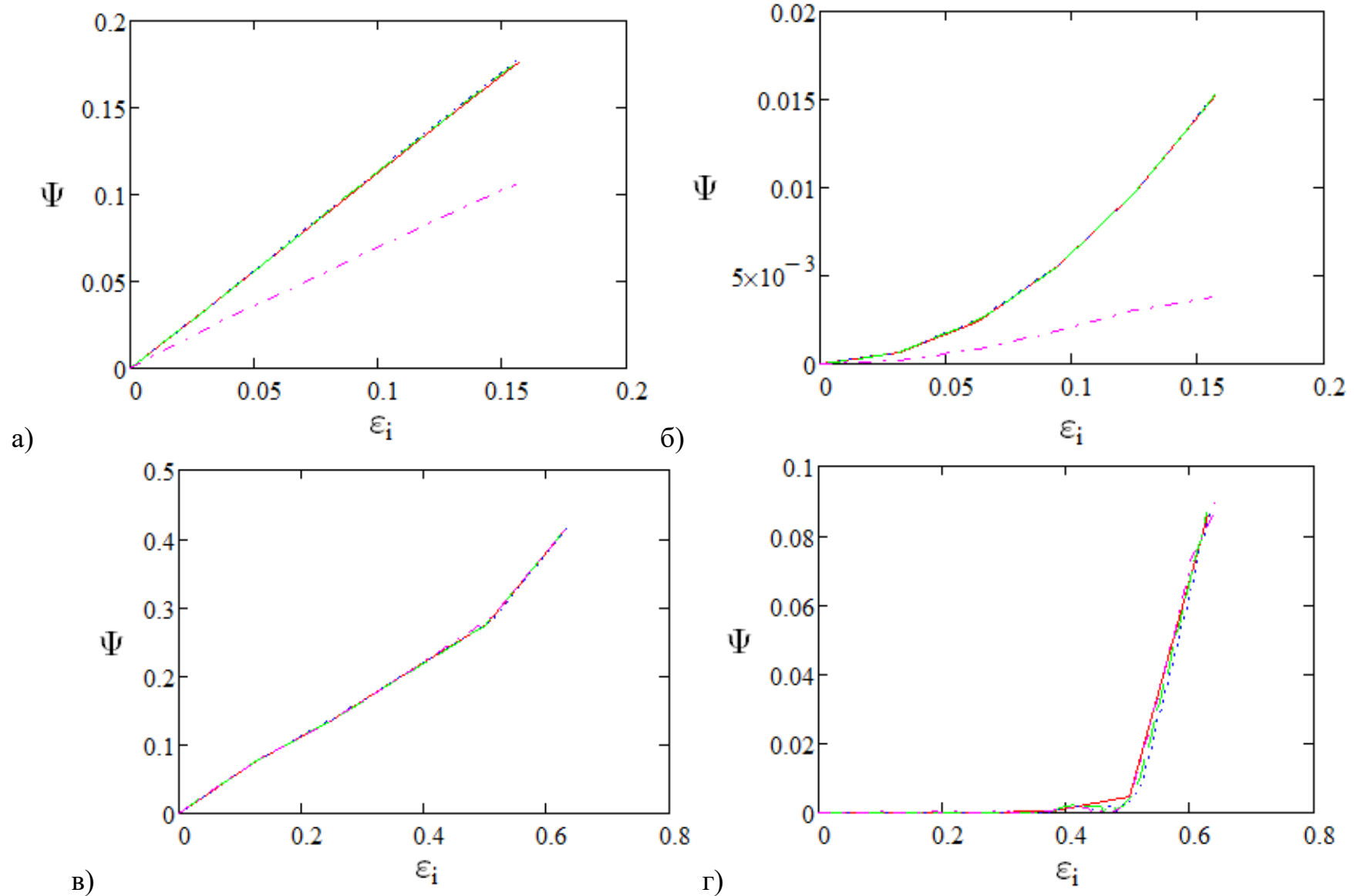
Робот. / Дата

Робот. / Дата

Робот. / Дата

08-62.МКР.06.00.005ПЛ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Застосування теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесах холодної листового штампування при виготовленні труб	Діаметр	Маса	Масштаб
Розробив	Рудик І. Ю.							
Перевірив	Сивак Р. І.							
Т. контр.								
Н. контр.	Слабкий А. В.					Аркуш 5	Аркуш 10	
Затв.	Потішняк П. К.					ВНТУ, ст. ар. 1ГМ-23м		



а – за критерієм (9) на етапі підгину; б – за критерієм (12) на етапі підгину; в – за критерієм (9) протягом усього згинання; г – за критерієм (12) протягом усього згинання; ———- діагональна зустрічна схема; ———- діагональна попутна схема; - - - - прямокутна схема; — - - - - радіально-дужева схема

Рисунок 10 – Зміна ступеня використання ресурсу пластичності

Листів звіт

Довідк. №

Підп. / Дата

Ім'я / П.І.О.

Ім'я / П.І.О.

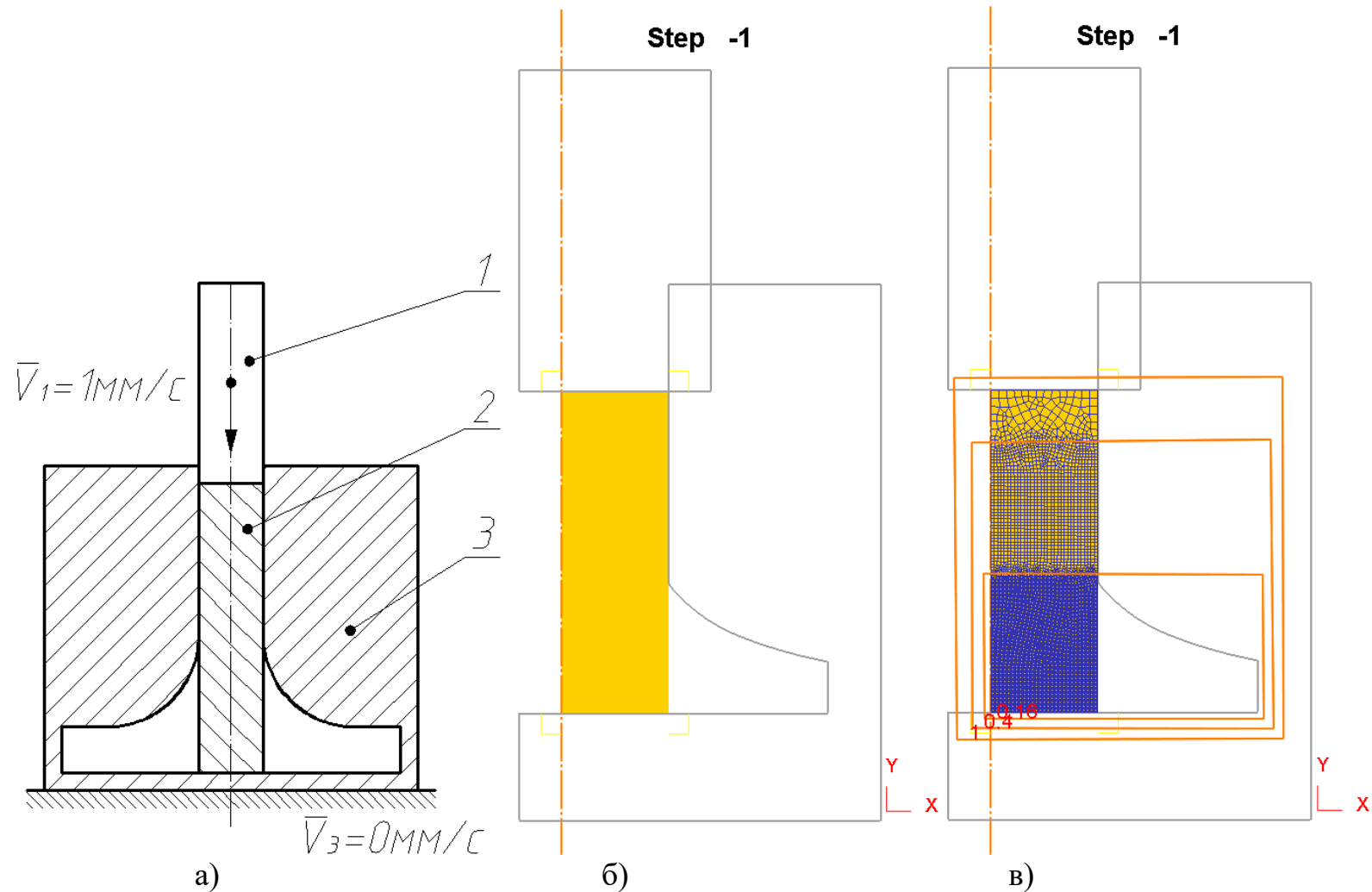
Ім'я / П.І.О.

Ім'я / П.І.О.

08-62.МКР.06.00.006ПЛ

Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Застосування теоретичної моделі використання ресурсу пластичності в процесах холодного листового штампування при виготовленні труб (продовження)	Літера	Маса	Масштаб
Розробив	Рудик Т. Ю.							
Перевірив	Савен Р. І.							
І. контр.								
Н. контр.	Слабко А. В.							
Зам.	Потопчик Л. К.					Аркуш 6	Аркуш 10	
						ВНТУ, ст. вр. 1ГМ-23м		

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛУ ПРИ УМОВІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ВЕЛИЧИНИ ПОКАЗНИКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У ПРОЦЕСІ ДЕФОРМУВАННЯ

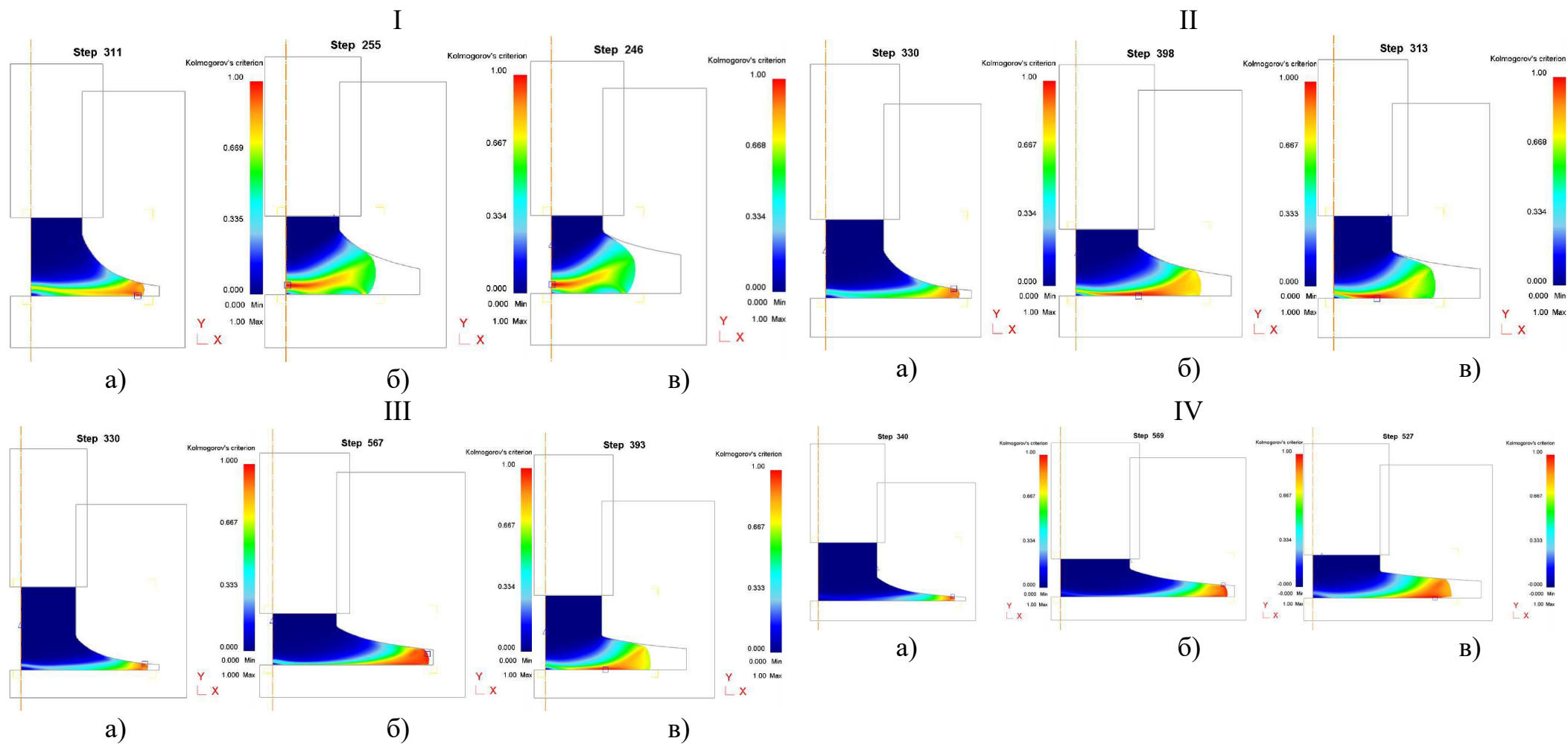


а – розрахункова схема; б - розрахункова схема, візуалізована в програмній системі; в – кінцево-елементна модель зразка; 1 – пуансон; 2 – зразок; 3 – матриця

Рисунок 11 – Моделювання радіального видавлювання зразка в канал певної форми

Имя и фамилия	Полное имя	Имя, отчество	Фамилия	Подпись

						08-62.МКР.06.00.007ПЛ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування			Литера	Маса	Марит
Розробка		Руса І. Ю.								
Перевірка		Сивак Р. І.								
І. контр.								Аркуш 7	Аркуш 10	
ІІ. контр.		Слабчук А. В.						ВНТУ, ст. гр. 1ГМ-23м		
Затв.		Поліщук Л. К.								



$a - \eta = -1/3$; $б - \eta = 0$; $в - \eta = 1/3$;

□ - положення точки з максимальним значенням; △ - положення точки з мінімальним значенням

Рисунок 12 – Розподіл величини критерію (9) при радіальному видавлюванні заготовок діаметром 10 (I), 15 (II), 20 (III), 30мм (IV) міліметрів у канал певної форми

Лист № документа	Годн. / Дата	Ндв. змін. / Дод. №	Лист № документа	Годн. / Дата	Додаток №	Перш. змін

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив		Русак І. Ю.	<i>[Signature]</i>	
Перевірив		Сивак Р. І.	<i>[Signature]</i>	
Т. експ.				
Н. контр.		Слабко А. В.	<i>[Signature]</i>	
Зам.		Попілюк Л. К.	<i>[Signature]</i>	

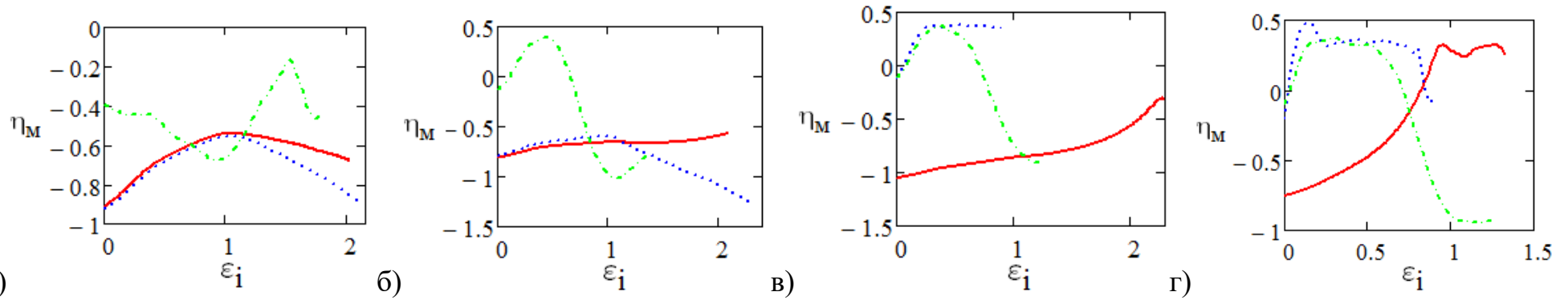
08-62.МКР.06.00.008ПЛ

Дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування (продовження)

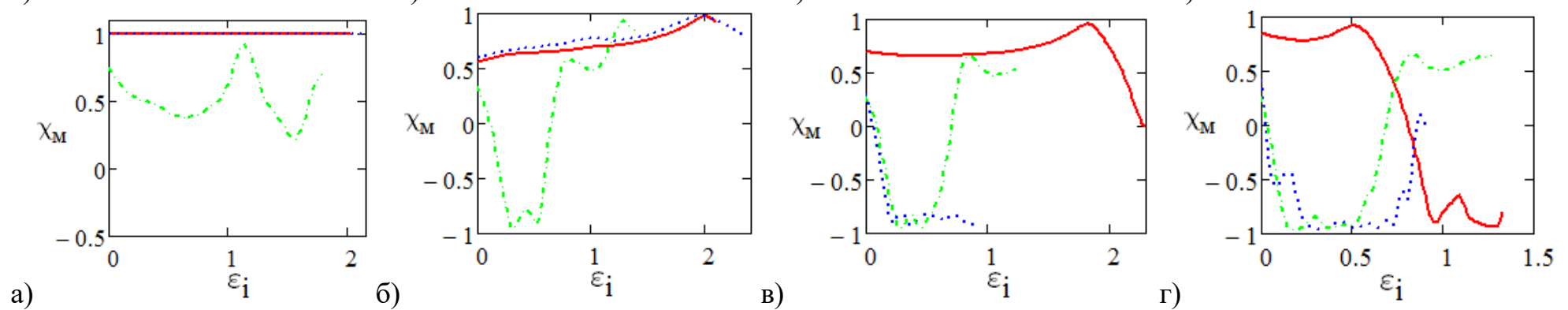
Літера	Маса	Масштаб
Аркуш 8	Аркуш 10	

ВНТУ, ст. гр. 1ГМ-23м

I



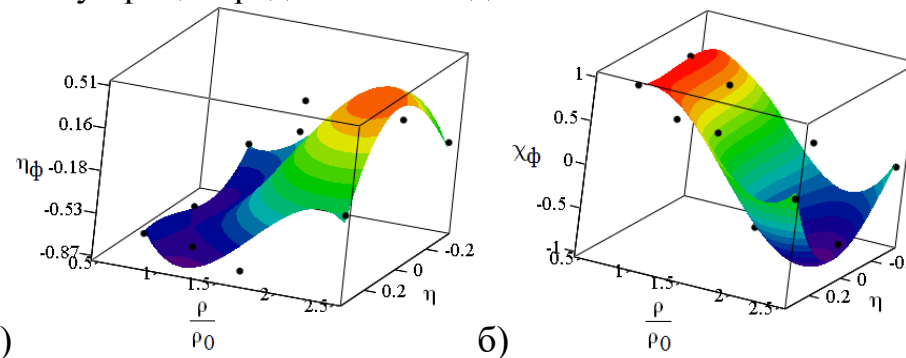
II



a - $d_0 = 10$ мм; б - $d_0 = 15$ мм; в - $d_0 = 20$ мм; г - $d_0 = 30$ мм;

— $\eta = -1/3$; ---- $\eta = 0$; $\eta = 1/3$

Рисунок 13 – Величина показника напруженого стану (I) та показника виду напруженого стану (II) на місці виникнення руйнування у процесі радіального видавлювання в канал певної форми



а – показника напруженого стану; б – показника виду напруженого стану

Рисунок 14 – Поверхні відгуку із зазначеним положенням результатів моделювання

Підпис

Довідки №

Підпис

Підпис

Підпис

Підпис

Підпис

Підпис

08-62.МКР.06.00.009ПЛ

Вм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробляв	Рущак І. Ю.			
Перевірив	Сивак Р. І.			
Г. кон. пр.				

Дослідження пластичності металу при умові забезпечення сталості величини показника напруженого стану у процесі деформування (продовження)

Літера	Маса	Масштаб
Архив 9	Архив 10	

Н. контр.	Слабко А. В.	
Зам.	Поліщук Л. К.	

ВНТУ, см. гр. 1ГМ-23м

ВИСНОВКИ

1. З дослідження напружено-деформованого стану суцільних циліндричних зразків у місці виникнення граничного деформування при крученні під зовнішнім тиском встановлено, що величини граничної деформації в процесі випробування змінюються немонотонно, у зв'язку з чим в якості показника накопиченої деформації, з відомих показників, застосовні тільки величини граничної деформації по J. R. Trice, що відрізняють постійним множником і тому рівнозначні щодо відносного відхилення діаграм пластичності для різноманітних видів напруженого стану.

2. Аналіз відомих способів дослідження пластичності матеріалу листових та об'ємних заготовок на одному випробувальному устаткуванні, без застосування спеціалізованих пристроїв показав, що тільки радіальне видавлювання суцільних циліндричних зразків у канал певної форми має широкі діапазони варіювання показника напруженого стану та показника виду напруженого стану, для алюмінієвого сплаву Д16, відповідно, рівними $-0,9...0,5$ та $-1...1$. Тим не менш, при застосуванні методу необхідно враховувати, що величина наведеної похибки очікуваного показника напруженого стану щодо теоретичного діапазону варіювання показника напруженого стану у деяких випадках більше 98%.

3. На основі математичного опису в термінах механіки суцільного середовища процесу досягнення граничного деформування, що базується на уявленні про накопичення дефектів деформаційного походження, з врахуванням факторів, що на нього впливають, сформульовано загальний вигляд теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу ізотропних металів процеси обробки матеріалів тиском, уточненням якої, за рахунок застосування відомих гіпотез та експериментально встановлених фактів, отримано критерій, який дозволяє визначати досягнення граничного деформування заготовок з ізотропних металів у процесах холодного листового штампування.

4. Здійснено експериментальну перевірку та оцінку ефективності створеної теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу в процесах холодного листового штампування на алюмінієвих сплавах АМг6, Д16 і сталі А710, внаслідок чого визначено максимальну та середню відносні похибки діаграми пластичності, що отримана із створеної моделі від експериментальної, для досліджуваних матеріалів відповідно рівні 10,4% та 3,3%, 12,1% та 5,5%, 5,8% та 1,2%. Встановлено, що ці результати менші за найкращі результати відомих критеріїв та апроксимуючих діаграму пластичності функцій більш ніж у 1,4 та 1,7 рази.

5. Проведено апробацію розробленої теоретичної моделі використання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з ізотропного металу у процесах холодного листового штампування та створеного на її основі розрахункового апарату при дослідженні впливу траєкторії переміщення згинального ролика на етапі підгину на використання ресурсу пластичності матеріалу трубної заготовки у процесах згинання прошовхуванням на трубозгинальному верстаті, в результаті чого підтверджена її ефективність.

6. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на рівень, що вище середнього рівня комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних показників. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,5 роки.

Договор №

Договор №

				08-62.МКР.06.00.010ПЛ			
				Висновки			
				Літера			
				Міся			
				Місяц			
				Архив 10			
				Архив 10			
				ВНТУ, ст. ар. 1ГМ-23м			

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного листового штампування деталей спецтехніки.»

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)

Русин І. Ю.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сивак Р. І.

(прізвище, ініціали)