

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра загальнотехнічних дисциплін та охорони праці

Допущений до захисту:
завідувач кафедри загальнотехнічних
дисциплін та охорони праці
к. т. н., доц. Солона О. В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2019 р.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ШТАМПУВАННЯ ДИСКІВ З УСТУПАМИ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування

Виконав студент групи 61-МП
Галайський Дмитро Валентинович

Керівник: д. т. н., доцент
Сивак Роман Іванович

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування

«Затверджую»

завідувач кафедри загальнотехнічних
дисциплін та охорони праці

к. т. н., доц. Солоня О. В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Галайському Дмитру Валентиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

Тема роботи: «Розробка технологічних режимів штампування дисків з
уступами»

Термін здачі студентом завершеної роботи на кафедру до _____

Затверджено наказом ректора від _____

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План – проспект магістерської роботи.
3. Підручники, навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали).
5. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Перелік питань, що розробляються в роботі

1. Аналіз стану теорії і технології об'ємного штампування дисків
2. Теоретичний аналіз процесу радіального видавлювання
3. Вибір методів теоретичного і експериментального дослідження процесу радіального видавлювання дисків з уступами
4. Експериментальне дослідження процесів радіального видавлювання

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки
Анотація		1-2	
Вступ		2-3	
Розділ 1	Аналіз стану теорії і технології об'ємного штампування дисків	20-25	
Розділ 2	Теоретичний аналіз процесу радіального видавлювання	20-25	
Розділ 3	Вибір методів теоретичного і експериментального дослідження процесу радіального видавлювання дисків з уступами	20-25	
Розділ 4	Експериментальне дослідження процесів радіального видавлювання	20-25	
Висновки		1-3	
Список використаних джерел		4-5	

Керівник магістерської роботи _____ Сивак Р. І.

Завдання до виконання прийняв _____ Галайський Д. В.

Дата отримання завдання « _____ » _____ 2019 р.

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота складається із вступу, 4 розділів, висновку, списку використаної літератури, обсяг роботи 110 сторінок

Магістерська робота присвячена визначенню основних закономірностей формозміни металу при використанні кільцевого конусного інструменту, а також визначенню деформаційних умов максимального наближення форми і розмірів поковки до готового виробу та створенню нової технології одержання поковок деталей типу «диск з уступом» і «диск-шестірня конічна».

Було виконано аналіз і порівняння одержаних результатів експериментальних досліджень при використанні кільцевого конусного інструменту з подальшою осадкою у підкладному кільці і даних, одержаних шляхом математичного моделювання з використанням програмного забезпечення «Forge3».

За результатами експериментальних і теоретичних досліджень були розроблені технологічні рекомендації із застосування нового способу кування з використанням кільцевого конусного інструменту для одержання куванням поковок деталей типу «диск з уступом» і «диск-шестірня конічна», у яких діаметр диска та висота уступу значно перевищують висоту полотна диска.

Кільцевий конусний інструмент складної форми використаний як спроектований напівштамп при виробництві повнопрофільної заготовки залізничних коліс для попереднього перерозподілу об'єму металу перед остаточним штампуванням з метою оптимізації технологічного процесу.

Ключові слова: *кування, заготовка, осадка, інструмент, диск, уступ, поковка, кільце.*

ABSTRACT

Master's thesis consists of introduction, 4 sections, conclusion, list of used literature, volume of work 110 pages

The master's thesis is devoted to the determination of the basic patterns of metal forming when using a circular cone tool, as well as to determine the deformation conditions of the maximum approximation of the shape and size of the forging to the finished product and to create a new technology of forging parts such as "disk with a ledge" and "disk gear."

An analysis and comparison of the experimental results obtained with the use of a ring cone tool with subsequent sediment deposition in the washer and the data obtained by mathematical modeling using Forge3 software was performed.

According to the results of experimental and theoretical studies, technological recommendations have been developed for the use of a new forging method using a circular conical tool to obtain forging forgings of parts "disc with ledge" and "disk-gear conical", in which the diameter of the disk and the height of the ledge significantly exceeds the height of the web disk.

The intricate circular cone tool is used as a designed semi-stamp in the production of a complete profile of the castor wheels for preliminary redistribution of the volume of metal before final stamping in order to optimize the process.

Keywords: forging, billet, sediment, tool, disk, ledge, forging, ring

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТЕОРІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ДИСКІВ	11
1.1. Деформовність металу в процесах видавлювання	11
1.2. Штампи для процесів видавлювання	19
1.3. Аналіз існуючих технологій виготовлення дисків з уступами	22
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ	25
2.1. Моделювання процесу радіального видавлювання деталей типу стрижень з фланцем	25
2.1.1. Радіальне видавлювання фланця на кінці стержня з односторонньою подачею	27
2.1.2. Радіальне видавлювання фланця в середній частині стержня з односторонньою подачею	29
2.1.3. Радіальне видавлювання фланця в середній частині стержня з двосторонньою подачею	38
2.2. Радіальне видавлювання фланця на кінці труби з односторонньою подачею	47
2.3. Експериментальне дослідження виготовлення дисків з уступами при використанні кільцевого конусного інструменту	53
РОЗДІЛ 3. ВИБІР МЕТОДІВ ТЕОРЕТИЧНОГО І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДИСКІВ З УСТУПАМИ	59
3.1. Вибір напрямку досліджень	59
3.2. Вибір методів теоретичного аналізу процесу радіального видавлювання	61
3.3. Вибір методів експериментальних досліджень	73

3.4.	Теоретичні дослідження процесу гарячої пластичної деформації заготовки при впровадженні кільцевого конусного інструменту з подальшою осадкою в підкладному кільці	80
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ		
4.1.	Дослідження силового режиму процесу радіального видавлювання	84
4.2.	Удосконалення технологічного процесу виготовлення дисків з уступами	92
4.3.	Використання кільцевого конусного інструменту при виробництві заготовок залізничних коліс	94
ВИСНОВКИ		98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		100

ВСТУП

В останні роки в машинобудуванні зростає попит на вироби, форма яких наближена до диска з одним або двома уступами. Процеси виготовлення таких деталей за допомогою процесів ковальсько-штампувального виробництва є базовими для сучасного машинобудування, де широко розповсюджені деталі типу дисків з уступами (шестерні, колеса та ін.). Такі вироби отримують, зазвичай, з використанням великої кількості технологічних операцій, у тому числі, механічної обробки, що веде до значного збільшення витратного коефіцієнта металу за рахунок ковальського напуску. Окрім цього, формозміна зовнішньої бічної поверхні заготовки зумовлює форму поковки диска з уступом (циліндричної або конусної форми), що, в свою чергу, при неврахуванні закономірностей течії металу також призводить до необхідності призначення ковальського напуску. Наближення форми поковки до форми готової деталі передбачає розробку ресурсозберігаючої технології, що базується на зменшенні ковальського напуску. Одним із шляхів розробки таких технологій є використання доцільної форми технологічного інструменту. Різновидом інструменту, що використовується в ковальському виробництві, є кільцевий інструмент. На жаль, наразі відсутні дані про напружено-деформований та тепловий стан заготовки при використанні такого інструменту, що не дозволяє врахувати комплексний вплив на характер формозміни металу ряду важливих факторів, таких як зовнішній та внутрішній кути конусності кільцевого конусного інструменту, ступінь деформації та розміри заготовки. Зазначена обставина не дає, в загальному випадку, розрахувати всі необхідні технологічні параметри кування дисків з уступами, у тому числі заготовок для залізничних коліс, що веде до надлишкових витрат металу.

Використання математичного моделювання, зокрема, методу скінчених елементів, може дозволити належним чином врахувати комплексний вплив вищезгаданих параметрів на формозміну металу в процесах вільного кування. Але дослідження в такій постановці до наявної роботи не проводилися.

Таким чином, робота, що спрямована на визначення закономірностей формозміни металу в залежності від геометрії вихідної заготовки і форми та розмірів кільцевого технологічного інструменту при виробництві деталей дисків з уступом та розробку на основі отриманих даних ресурсозберігаючої технології виробництва таких деталей, є актуальною.

Метою магістерської роботи стало вивчення закономірностей формозміни металу в залежності від форми і геометрії кільцевого конусного інструменту і розробка на основі отриманих даних удосконаленої технології виготовлення продукції ковальсько-штампувального виробництва, що забезпечує зменшення показників металоємкості

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі: провести експериментальні та теоретичні дослідження течії металу на зовнішній бічній поверхні циліндричної заготовки поковки диска з уступом при куванні з використанням кільцевого конусного інструменту в залежності від величини внутрішньої, зовнішньої конусності кільцевого конусного інструменту та глибини його проникнення. Проаналізувати результати досліджень і одержати математичний опис залежностей впливу зовнішнього кута конусності на кінцеву висоту заготовки та вплив внутрішнього кута конусності кільцевого конусного інструменту на висоту отриманого уступу при обтисненні вихідної заготовки. Теоретично визначити залежності обтиснення заготовки з розрахунку напружено-деформованого та теплового стану металу в функції від геометрії поперечного перерізу заготовки та інструменту. Отримати теоретично і перевірити експериментально закономірності параметрів формозміни (висоти уступу, висоти та діаметра заготовки) від обтиснення заготовки при використанні кільцевого конусного інструменту. Визначити раціональні геометричні розміри кільцевого конусного інструменту для виробництва дисків з уступами, а також визначити вплив геометрії кільцевого конусного інструменту складної форми на формозміну заготовки залізничних коліс. Визначити за отриманими залежностями технологічні параметри процесу виробництва дисків з уступами, зокрема, зовнішні і внутрішні кути конусності та висоту кільцевого конусного

інструменту, величину деформації. Розробити технологічні рекомендації для удосконалення технології виробництва залізничних коліс. Впровадити отримані розробки у виробництво та навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Процес виробництва дисків з уступами, у тому числі, вільним куванням.

Предмет дослідження. Закономірності формозміни металу при використанні кільцевого конусного інструменту в процесі ковальсько-штампувального виробництва.

Для теоретичного визначення формозміни металу при новому способі кування із застосуванням кільцевого конусного інструменту використано варіаційний підхід у сполученні з методом скінчених елементів при урахуванні граничних умов у заданій області довільної форми. При проведенні фізичних експериментів використано елементи теорії подібності стосовно реологічно складних металів. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах з використанням сучасної вимірювальної апаратури. При проведенні досліджень використано методи математичного моделювання, методи планування експерименту і статистичної обробки даних із застосуванням комп'ютерної техніки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТЕОРІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ДИСКІВ

1.1. Деформовність металу в процесах видавлювання

Тенденція зростання вимог до якості продукції машинобудування знаходить своє відображення в технологіях металообробки і, зокрема, в технологіях обробки металів тиском. Останні роки дали незаперечні докази в можливості забезпечення якості та надійності машин із залученням нових технологій, що включають такі ознаки, як наукоємність, системність, моделювання, комп'ютеризацію тощо. Реалізація зазначених технологій здійснюється із застосуванням досягнень як фундаментальних, так і прикладних наук [1].

Появі нових методів обробки металів тиском і матеріалів зі складною реологією передувало ряд проблем: втрата стійкості заготовки під час пластичного деформування, руйнування металу в процесі його обробки, зростання зерна після термообробки; критична пористість, що виникає в процесі формозміни матеріалів. У подальшому вказані дефекти будемо називати "технологічною відмовою". Перераховані проблеми можуть бути вирішені за допомогою феноменологічної теорії деформування, яка інтенсивно розвивається останнім часом, що є по суті, новим розділом прикладної теорії пластичності [2].

Застосування теорії деформовності для вирішення технологічних задач обробки металів тиском дозволяє дати відповідь не тільки на питання, яка гранична ступінь деформації заготовки. До цієї теорії примикають ще дві практично важливі і пов'язані з нею завдання. Оцінка ступеня використання пластичності важлива також в тих випадках, коли після даної операції слідує термообробка, оскільки властивості матеріалу після термообробки залежать від ступеня використання запасу пластичності, отриманого на попередніх операціях. Як відомо, існує граничне значення ступеня використаного запасу

пластичності, перевищення якого призводить до різкого погіршення механічних властивостей матеріалу [3]. Друге завдання полягає в оцінці залишкової пластичності отриманої деталі. Це необхідно для з'ясування можливості реалізації наступної операції, пов'язаної з пластичною деформацією, а також для отримання виробів з необхідними фізико-механічними (експлуатаційними) властивостями.

У літературі до теперішнього часу опубліковано досить багато критеріїв, за допомогою яких можна оцінювати використаний ресурс пластичності [3-5]. Однак їх практичне застосування для різних процесів обробки металів тиском часто викликає труднощі, пов'язані з доцільністю застосування того чи іншого підходу.

Історично склалося, що питання про граничні стани матеріалів передувало два підходи: гіпотетичний і феноменологічний. В роботі [3] вказується на перевагу застосування феноменологічного підходу до питань граничного стану матеріалів для великих пластичних деформацій. Тому, головним чином будуть розглянуті феноменологічні теорії деформовності.

Першим кроком у розвитку критеріїв з'явилися критерії Мора, Шлейхера-Надаї, Давніденкова-Фрідмана та ін. [3, 4]. У цих теоріях використовують уявлення про певні поверхні напружень, при досягненні яких в матеріалах порушується суцільність (настає руйнування) - це широко використовувані критерії опору матеріалів. У разі невеликих пластичних деформацій, для крихких матеріалів, такі теорії дають задовільні результати. Однак при великих пластичних деформаціях, коли крива течії має дуже пологоу форму, прогнозування настання граничного стану призведе до істотних похибок.

У зв'язку з викладеними критеріями, в основі яких лежать обмеження, що накладаються на деформації, заслуговують більш пильну увагу для оцінки граничного стану при високих кінцевих деформаціях [4-7].

Для розрахунку використаного ресурсу пластичності в одноперехідних процесах обробки металів тиском в якості міри пошкоджень використовують певну скалярну характеристику граничної деформації.

Енергетичні критерії в певних випадках дають хорошу відповідність розрахунків і експерименту. Вони можуть застосовуватися для оцінки граничного стану пористих матеріалів. Однак з їх допомогою неможливо передбачити ресурс пластичності матеріалу (для даної технологічної операції), відмінного від того, на якому проводилися експерименти, оскільки енергетичний шлях деформування залежить від властивостей матеріалу. При використанні енергетичних критеріїв виключається важлива властивість моделювання процесів для різних матеріалів. За допомогою критеріїв деформації можна оцінити граничне формозмінення для різних матеріалів, досить вивчити напружено-деформований стан на модельному матеріалі [6].

В роботах [6, 8] показано, що в багатьох випадках відмічений слабкий вплив властивостей матеріалу на шлях деформування часток в небезпечній області деформуємих заготовок $\eta = \eta(\varepsilon_p)$, (де η – показник напруженого стану, ε_p – показник граничної деформації). Цей висновок підтверджений експериментально для процесів осадки в осьовому і радіальному напрямках, поперечного видавлювання, холодної висадки, розкатки заготовок в торець і ін. [6]. Таким чином, для розрахунку граничних технологічних параметрів процесів обробки металів тиском можна скористатися залежностями $\eta = \eta(\varepsilon_p)$, отриманими на моделі із іншого матеріалу.

У розглянутих вище критеріях передбачається, що накопичення дефектів в деформуємому металі описується скалярно, однак, в разі, коли розглядаються багатоперехідні операції обробки металів тиском (навантаження немонотонне, з развантаженнями, зміною напрямку деформування, прояв ефекту Баушінгера) відзначається розбіжність розрахункових і експериментальних даних. В цьому випадку слід застосовувати критерії руйнування, в яких мірою пошкодження є тензор другого рангу, тобто в загальному випадку критерій руйнування повинен враховувати спрямований характер пошкоджень.

Таким чином, подальшим кроком у розвитку теорії деформовності, є уявлення накопичення ушкоджень у вигляді тензора другого рангу [9, 10].

Ідея врахування спрямованого характеру пошкоджень за допомогою тензора пошкоджень належать Ільюшину А. А. В подальшому Дель Г. Д. [9], виходячи з дослідних даних, знайшов конкретний вид підінтегральної функції тензора пошкоджень. Запропонована тензорно-лінійна модель накопичення пошкоджень при холодній пластичній деформації тіл, які мають в початковому стані ізотропію граничних деформацій.

В роботі Михалевича В. М. отримали розвиток тензорні моделі накопичення пошкоджень для обчислення граничних деформацій. Узагальнено моделі, запропоновані в роботах Деля Г. Д., для середовищ з початкової анізотропією, розроблена модель граничних деформацій при гарячому штампуванні, встановлені явні критерії залежності для циклічного гарячого деформування [10].

Тензорне уявлення моделей накопичення пошкоджень є перспективним напрямком у розвитку теорії деформовності і руйнування матеріалів, що дає найбільш повний опис процесів і високу точність відповідності реальної моделі, особливо у випадках немонотонного, складного деформування анізотропних матеріалів зі складною реологією. Однак при побудові моделей виникають значні труднощі у визначенні відповідних параметрів, проведення необхідних експериментів, розрахунків тощо. Крім того, це знижує практичну цінність описаних вище критеріїв.

Застосування сучасних феноменологічних критеріїв деформовності можливо, якщо відомо напружено-деформований стан в пластичній області деформуємих заготовок, а також передбачаються задані характеристики пластичності досліджуваних матеріалів при найпростіших випробуваннях. Інформація про напружено-деформований стан представляється у вигляді залежності показників і ступеня деформації в небезпечній зоні деформованого об'єму від значення характерної деформації (припустимо, обтиску) та інших параметрів процесу. Такими параметрами при різних процесах обробки металів тиском є осадка або обтиснення при куванні, кут розчину матриці при видавлюванні, тертя на контакті тощо [11].

Надійна оцінка граничних технологічних параметрів процесів залежить, головним чином, від точності розрахунку напружено-деформованого стану.

Формозміна при радіальному видавлюванні має певні спільні особливості. При радіальному видавлюванні з односторонньою подачею металу між відростком (фланцем) і нижнім торцем полуматріці утворюється зазор, через що відросток в перерізі набуває еліптичної форми, а фланець - грибовидну. Унаслідок розтягання металу в зоні фланця, товщина фланця в напрямку від центру до периферії безперервно зменшується і має місце незаповнення кругової порожнини. Усунення спотворень форми відростків можливо за допомогою спеціальних конструкцій канальних порожнин, а також застосуванням двосторонньої схеми деформування. При радіальному видавлюванні ефективне накладення на кромку фланця, що видавлюється, гідростатичного протиску. Це може бути виправдано лише при обробці крихких матеріалів, тому що веде до значного ускладнення процесу. Ведення процесу за певними кінематичними варіантами (рис. 1.1 – 1.2) дозволяє отримати фланці не тільки з паралельними торцями, а й деталі більш складної форми. При радіальному видавлюванні фланців на порожнистих заготовках, при значеннях висоти порожнини, що перевищують, товщину стінки, можлива поява складок на внутрішній поверхні заготовки і в області фланця, де діють значні окружні напруження розтягу, що викликають руйнування матеріалу на крайках фланця і знижують граничну ступінь деформації.

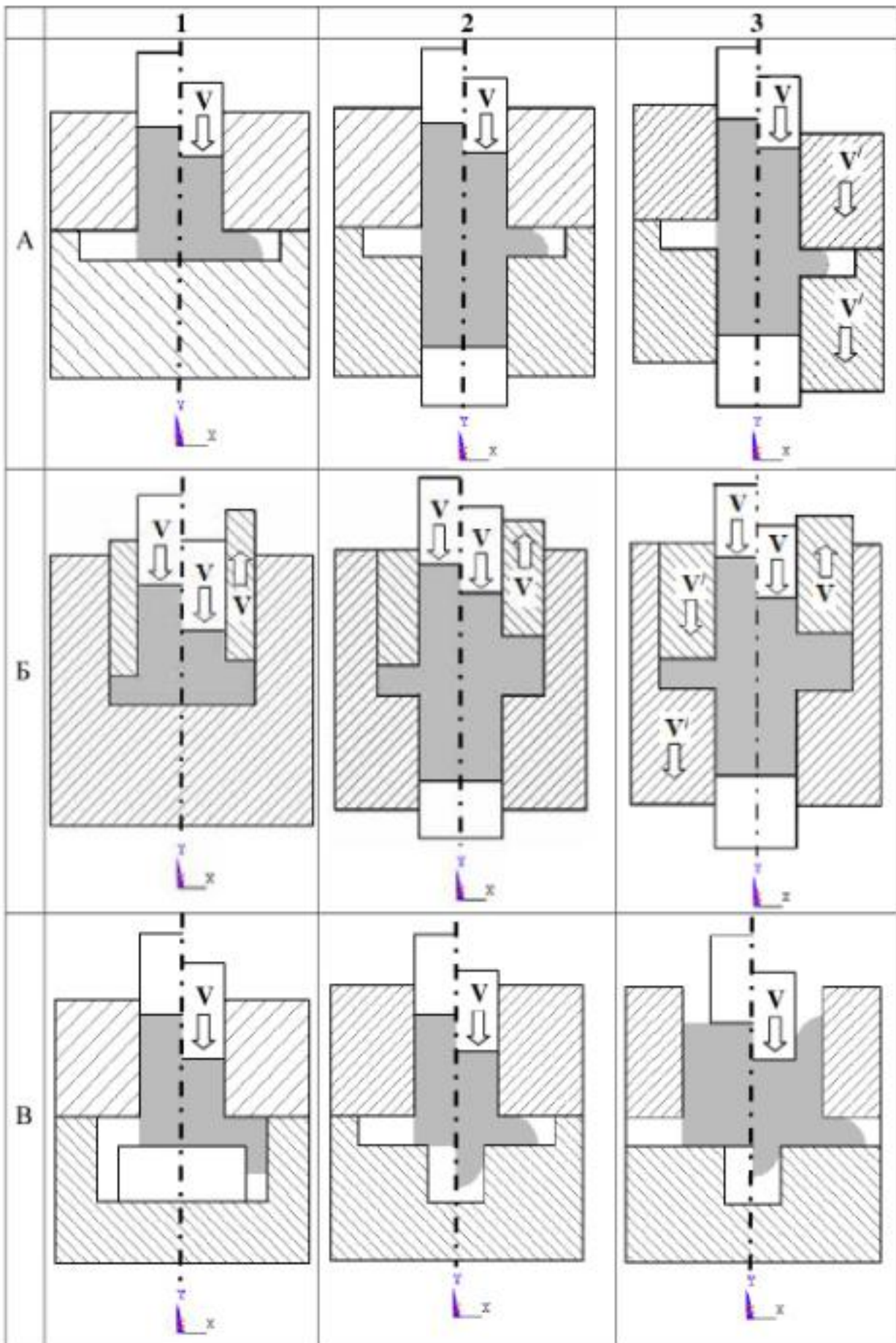


Рисунок – 1.1. Кінематичні варіанти видавлювання із суцільних заготовок

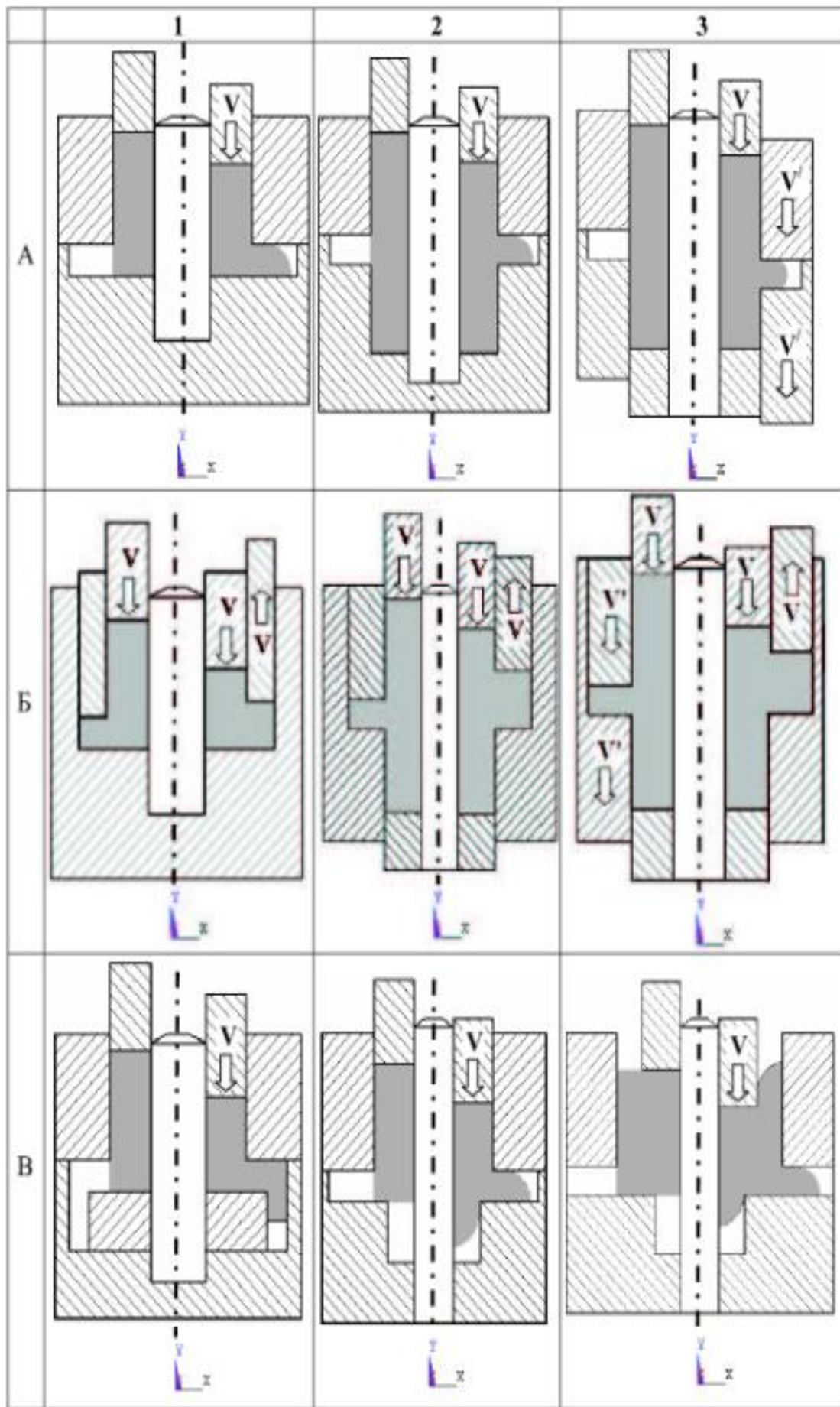


Рисунок – 1.2. Кінематичні варіанти видавлювання із порожнистих заготовок

В роботі [12] стверджується, що величина радіуса кромки матриці мало впливає на граничну ступінь деформації, і наводяться експериментальні значення граничного ступеня деформації при радіальному видавлюванні.

По цих даним для сталі 20 збільшення відносної товщини фланцю h/R_0 з 0,2 до 0,6 (де h – висота приймальної порожнини для фланцю, що видавлюється, R_0 – радіус заготовки) викликає зниження граничного ступеню деформації з 0,71...0,74 до 0,63...0,65.

Дослідження Гусинського В. І. [13] свідчать про протилежний характер впливу h/R_0 . Зростання величини цього параметра від 0,4 до 1,2 призводить до збільшення ступеня деформації від 0,78 до 0,82 при видавлюванні сталі 20Х. У цій же роботі зазначено, що фактор наявності недеформуємої частини заготовки в нижній матриці знижує гранично допустимий ступінь деформації при радіальному видавлюванні.

Дотримуючись Колмогорову В. Л. [5], при вивченні впливу схеми напруженого стану на пластичність матеріалу, напруження і деформації в процесі деформації потрібно визначити небезпечну локальну зону з несприятливою схемою напружено-деформованого стану.

Останнім часом такий підхід при аналізі радіального видавлювання був розвинений Огородніковим В. А. Беручи за кількісну міру пластичності і для оцінки схеми напруженого стану інваріантні показники інтенсивності деформацій ε_i і коефіцієнт жорсткості Огородніков В. А. показав, що на фактичну пластичність впливає характер зміни η в залежності від ε_i в небезпечній зоні [4, 6, 14, 15].

У роботах Григор'єва А. К., Смірнова В. С. і ін. [16] при оцінці пластичності рекомендується встановити граничні показники процесу безпосередньо моделюванням досліджуваного процесу з дотриманням умов подібності за всіма факторами, що істотно впливають.

1.2. Штампи для процесів видавлювання

Для процесів видавлювання задача безпечної і довговічної роботи штампів є особливо важливою, в зв'язку з високою інтенсивністю і важкими умовами експлуатації інструменту. Забезпечення стійкості штампів здійснюється сучасними підходами, що включають в себе вирішення задач дослідження і оптимізації термомеханічних параметрів і режимів навантаження на інструмент [16, 17-20], пошуком нових рішень в напрямку виробництва штампових матеріалів, виготовлення інструменту (технології механічної, хіміко-термічної та поверхневої зміцнювальної обробки) [17], а також поліпшенням умов експлуатації інструменту.

При поперечному видавлюванні необхідне застосування оснастки, яка містить матрицю, що складається з двох частин з наявністю роз'єму по горизонтальній (поперечній) або вертикальній (поздовжній) площині. Штампи з поперечним роз'ємом матриць [20, 21], мають більші технологічні можливості. В процесі видавлювання, змикання і розмикання складових матриць здійснюється за допомогою гідравлічних і пневматичних подушок, пружинних і буферних пакетів, важільних, клинових і клино-важільних механізмів [21].

Приклад впровадження штампів з роз'ємними матрицями показує їх перспективність і надійність [20]. Застосування штампів з роз'ємними матрицями ефективно також для осесіметричних поковок нескладної форми, що інтенсифікує формозміна і скорочує кількість переходів штампування деталей [20].

Штампи з роз'ємними матрицями складаються з тих же основних функціональних частин, що і звичайні штампи для поздовжнього видавлювання. Головною відмінністю є те, що штампи з роз'ємними матрицями забезпечені вузлами замикання, які призначені для затиску напівматриць, які утворюють при змиканні робочу порожнину. Функціональний розгляд штампів і вузлів затиску дає можливість генерування більшості різновидів їх конструктивного виконання [21]. В першу чергу, в штампах з роз'ємними і

рухливими матрицями, виникає необхідність в здійсненні безлічі кінематичних варіантів поперечного та комбінованого видавлювання.

Застосування переміщення напівматриць для регулювання обсягу приймальної порожнини призвело до розробки безлічі пристроїв для видавлювання і висадки фланців або потовщень на трубчастій заготовці, а також попередження, тим самим, втрати стійкості тонкостінної заготовки. У роботах [22, 23] розроблено пристрої для видавлювання фланців на трубчастих заготовках з рухомими напівматрицями. На рис. 1.3 представлені конструкції таких механізмів, переміщення напівматриць в яких здійснюється за допомогою вузлів механічного (рядок А) і гідравлічного типу (рядок Б). У них рухлива напівматриця переміщається уздовж твірної труби і звільняє потрібний обсяг порожнини матриці для заповнення його деформуємим металом до тих пір, поки весь метал деформуємої частини заготовки не переміститься в зону потовщення. Здійснення переміщення напівматриць може здійснюватися за рахунок взаємодії клинів (схеми А1, А2) [22, 23], за допомогою важільних механізмів (схема А3) [23], а також за рахунок гідравлічного приводу (схеми Б1, Б2) [22]. Поряд з цим швидкість переміщення напівматриць може регулюватися і визначатися співвідношенням кутів клинів, плечей важелів і площ порожнин гідроциліндрів. Оригінальний пристрій для деформування в рухомих напівматрицях (схема Б3) засновано на корисному використанні дефекту типу утяжини, який з'являється при розімкнутих напівматрицях, тобто при значній висоті приймальної радіальної порожнини.

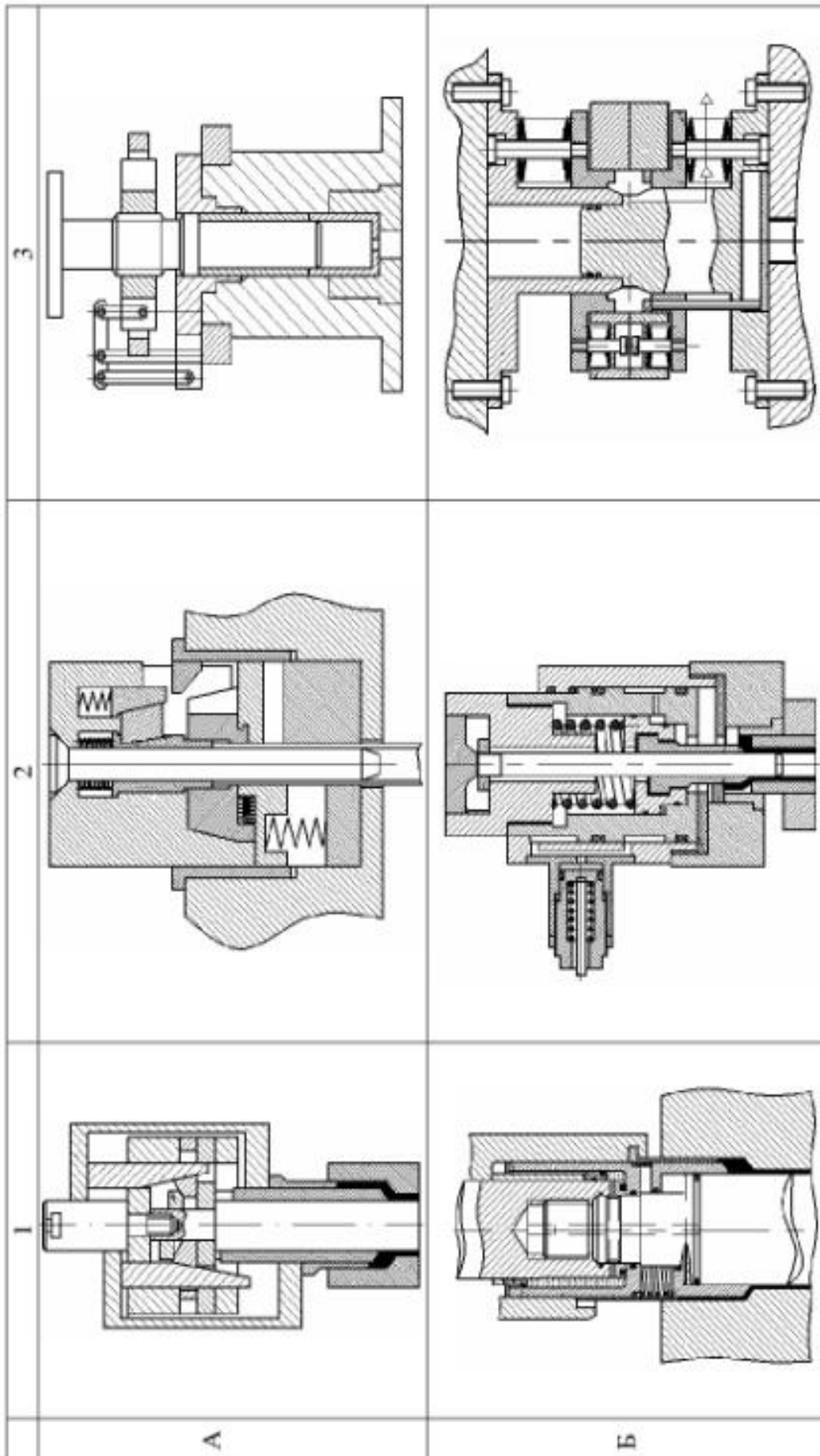


Рисунок 1.3 – Конструкції штампів з рухомими напівматрицями

Подальше змикання напівматриць дозволяє отримати втулки з об'ємними (більш масивними) фланцями [24].

Конструкції спеціалізованих пресів подвійної дії дозволяють значно спростити використовуване технологічне оснащення, а приклади промислового впровадження свідчать про їх досить високу ефективність [25]. Для виготовлення поковок зі складною зовнішньою поверхнею зі сплавів кольорових металів ефективні багатоплунжерні преси [26]. Перспективними є преси подвійної дії [27, 28], в т. ч. преси для видавлювання в режимі активного тертя [29, 30]. Розгляд закономірностей зміни силових і кінематичних параметрів процесів видавлювання і накопичення даних з технологічних режимів є необхідними умовами для складання технологічних вимог і розробки принципово нових конструкційних схем пресів [31, 32, 33]. Згідно з новими технологічними схемами поперечного та комбінованого поздовжньо-поперечного видавлювання необхідно розробляти технологічне обладнання, яке дозволяє реалізувати різні кінематичні режими видавлювання, а також здійснювати роздільне переміщення матриць, пуансонів і їх частин.

1.3. Аналіз існуючих технологій виготовлення дисків з уступами

У даний час існує потреба в поковках типу дисків, виробництво яких становить на деяких машинобудівних заводах до 10% від загального випуску поковок.

З різноманіття поковок для дисків, які виготовляються куванням на пресах, можна виділити чотири групи, що відрізняються за формою, співвідношенням основних розмірів і технологічними особливостями.

До першої групи належать робочі диски, що мають одну або дві втулки та полотно, переріз якого може бути плоским або конічним; відношення зовнішнього діаметра D до товщини дисків по втулці H становить 7,5—15, а

відношення висоти диска по втулці до товщини полотна h до 35, при цьому діаметр полотна диска перевищує діаметр втулки в 3,8—5 разів.

До другої групи належать покриваючі диски компресорних машин, які мають одну втулку та полотно з конічним профілем і відрізняються більшими розмірами центрального отвору в межах 550-1200 мм при зовнішньому діаметрі дисків 1250-2250 мм.

Третю групу складають диски турбін, у яких $\frac{D}{H}$ становить 1,2—1,5, $\frac{H}{h} = 2,5$ і центральний отвір відносно невеликий.

До четвертої групи відносяться диски газових турбін, що працюють при більш високій температурі, і звичайно виготовляються з високолегованих марок сталей і нікелевих сплавів. Диски цієї групи характеризуються великою висотою втулкової частини без центрального отвору.

Технологічні процеси кування дисків характеризуються багатоопераційністю. Найбільший інтерес становлять кінцеве формоутворення та операція розгонки, які, зокрема, переважно виконують за допомогою спеціального пристрою, використовуючи вузькі розсувні бойки, що спричиняється недостатньою силою кувальних пресів (диски малих розмірів формоутворюються осадкою заготовок у кільцях або підкладних штампах).

Подібне співвідношення величини уступу до полотна диска можна одержати при штампуванні поковок. Але недоліком цієї технології є те, що ці поковки мають вагу до 250 кг, а одержання більшої маси поковки неможливе.

Аналіз існуючих технологічних процесів кування дисків з уступами показав, що при їх виготовленні у випадку, коли діаметр диска та висота уступу значно перевищують висоту полотна диска, має місце підвищена витрата металу за рахунок призначення ковальського напуску. Його призначення пов'язано з тим, що за існуючою технологією неможливо одержати форму поковки максимально наближену до форми готової деталі. Ця різниця компенсується призначенням ковальського напуску, що у подальшому

видаляється механічною обробкою як надлишки металу з полотна диска, що призводить до підвищення металоємкості.

Розглянуто операції осадки та розгонки полотна диска, які відіграють істотну роль при одержанні повнопрофільної заготовки в існуючій технології виробництва залізничних коліс. Видами браку при їх виконанні є «затиск» металу та незаповнення порожнини штампа при подальшій деформації. Аналіз показав, що при виконанні цих операцій є запас металу, який у подальшому формує обід і диск залізничного колеса, і управляючи формозміною металу при виконанні цих операцій, можна підвищити якість одержуваного виробу.

Аналіз літературних джерел показав, що робота, спрямована на дослідження формозміни металу при куванні дисків з уступами і удосконалення існуючої технології шляхом наближення форми поковки до форми деталі, є актуальною. Актуальність теми обумовлена зниженням металоємкості продукції, що випускається, за рахунок зменшення ковальського напуску.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

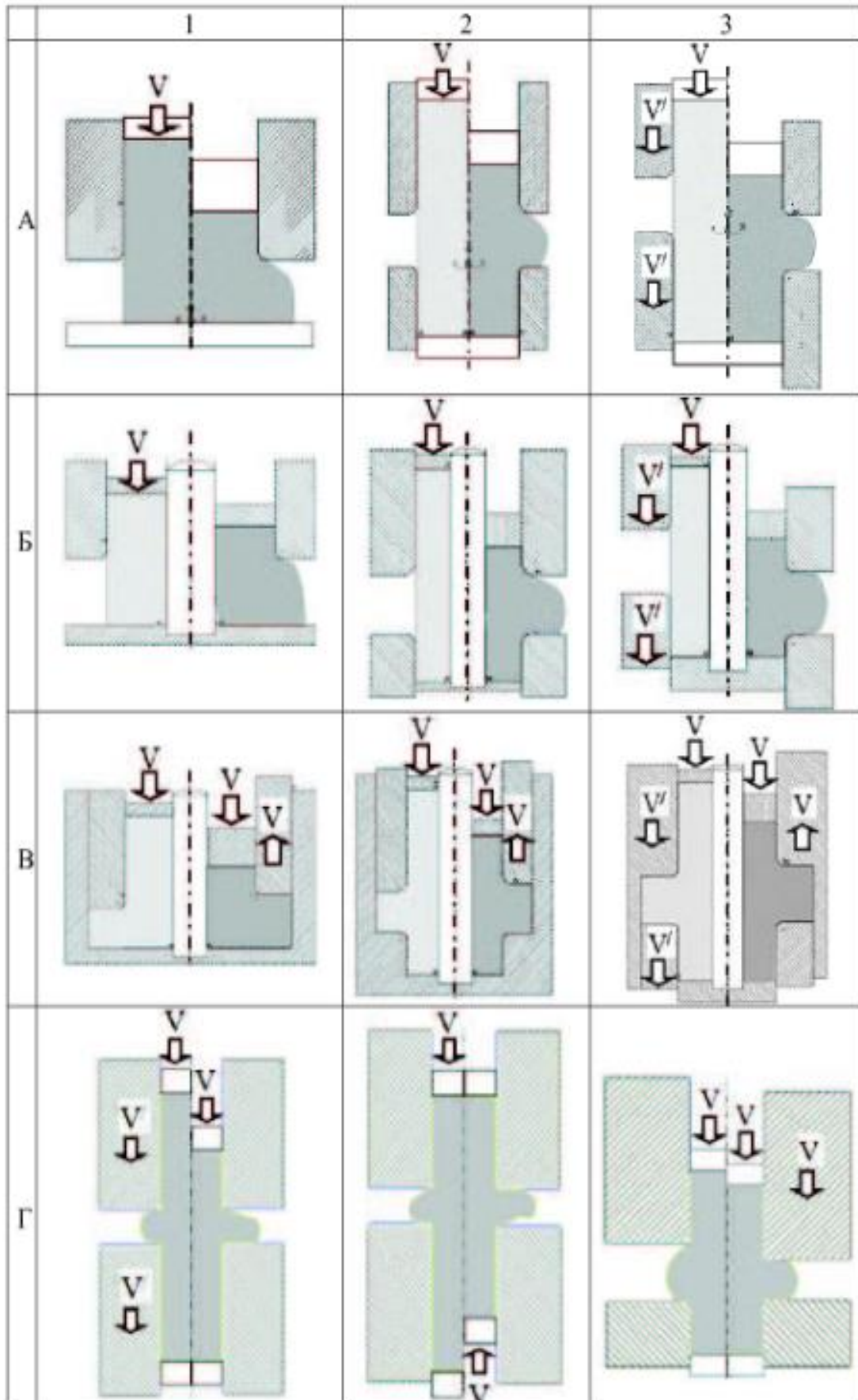
Процеси радіального видавлювання мають велику кількість кінематичних схем і їх здійснення та відрізняються різноманітністю деталей, які можливо отримувати за цими схемами. Певні схеми радіального видавлювання деталей з фланцем представлені в табл. 2.1.

Схеми радіального видавлювання фланців на кінці стержня з односторонньою подачею (А1), в середній частині стержня з односторонньою подачею (А2), і в середній частині стержня з двосторонньою подачею (А3). Схеми групи Б - це схеми радіального видавлювання фланців на кінці труби з односторонньою подачею (Б1), в середній частині труби з односторонньою подачею (Б2) і в середній частині труби з двосторонньою подачею (Б3). Схеми групи В - це схеми радіального видавлювання фланців на кінці труби з односторонньою подачею і з додатково рухомою матрицею (В1), в середній частині труби з односторонньою (В2) і двосторонньою подачею (В3), з додатково рухомою матрицею. Схеми групи Г - це схеми радіального видавлювання фланців в середній частині стержня з послідовною двосторонньої і односторонньої подачею (Г1), з послідовною двосторонньої подачею (Г2) і в середній частині стержня з односторонньою подачею металу заготовки в осередок деформації з підсадки (Г3)

2.1. Моделювання процесу радіального видавлювання деталей типу стрижень з фланцем

В даному розділі представлено математичне моделювання процесів радіального видавлювання фланців на стрижні в середовищі ANSYS.

Кінематичні варіанти схем радіального видавлювання



Розглянуто схеми видавлювання фланців на кінці стержня і в його середній частині з односторонньою подачею і видавлювання фланця в середній частині стержня з двосторонньою подачею [34-39].

2.1.1. Радіальне видавлювання фланця на кінці стержня з односторонньою подачею

В силу симетрії розглядається одна половина схеми. Схема процесу представлена на рис. 2.1.

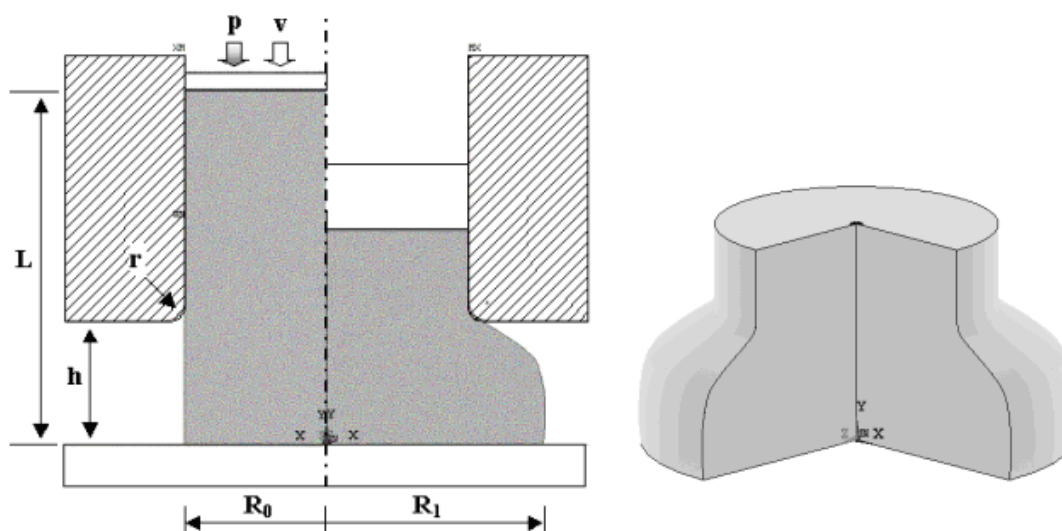


Рисунок 2.1 - Схема радіального видавлювання фланця з односторонньою подачею на кінці стержня.

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на кінці стержня з односторонньою подачею вибирали такі параметри:

- параметри механічних властивостей матеріалу заготовки M1: крива істинних напружень, яка описується рівнянням $\sigma_s(\varepsilon) = 397,3 \varepsilon^{0,2}$, границя текучості $\sigma_{0,2} = 170$ МПа, модуль Юнга $E = 110000$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu = 0,3$ і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом $\mu = 0,0 \dots 0,1$ (закон Зібеля).

- геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0 = 7,6\text{мм}$), h – висота приймальної порожнини для фланцю, що видавлюється ($h = 7\text{мм}$), r – радіус округлення кромки інструменту ($r = 1,0\text{мм}$), L – висота заготовки ($L = 20\text{мм}$).

Моделювання силового режиму

В результаті моделювання визначено силовий режим процесу радіального видавлювання, представлений у вигляді графіків наведених на рис. 2.2.

Силовий режим процесу радіального видавлювання досліджений в певному інтервалі значень

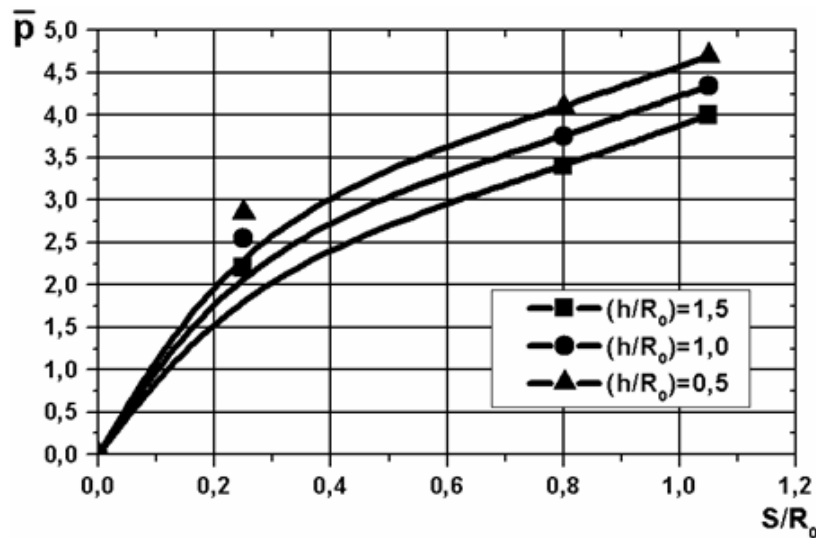


Рисунок 2.2 - Графік залежності приведенного тиску від відносного ходу процесу

Як видно з графіків, при збільшенні ступеня деформації тиск на головний деформуючий інструмент при радіальному видавлюванні зростає.

Також досліджено вплив величини висоти фланця, що видавлюється, на силовий режим радіального видавлювання. Встановлено, що чим більше висота видавлюється фланця, тим вище розташована на графіку (рис. 2.2) крива залежності тиску від ступеня деформації, що свідчить про збільшення висоти фланця і про зниження зусилля видавлювання. Так при збільшенні відносної висоти фланця від 0,5 до 1,5 зусилля видавлювання зменшується на 12 ... 15%.

Моделювання деформованого стану

Пакет ANSYS дозволяє визначати деформований стан при видавлюванні.

На рис. 2.3, 2.4 представлені спотворення ділильної сітки при радіальному видавлюванні і розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації.

Як видно з рисунка, осередок деформації по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині осередку деформації.

Максимальне значення інтенсивності деформацій перебуває в межах 2,5.

Моделювання напруженого стану

Пакет ANSYS також дозволяє визначати і напружений стан при видавлюванні.

На рис. 2.5, 2.6 представлено розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перетині заготовки, що видавлюється, та наведено розподіл нормальних напружень на стінках інструменту.

Як видно з малюнка, інтенсивність напружень по осередку деформації розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення.

Значення напружень і їх розподіл представлені на рис. 2.5, 2.6.

Розподіл нормальних напружень на стінках інструменту показує, що найбільш небезпечна ділянка, з точки зору руйнування оснащення, перебуває у верхній частині приймальної порожнини під фланець. Там напруги досягають 1,0 ГПа.

2.1.2 Радіальне видавлювання фланця в середній частині стержня з односторонньою подачею

Оскільки схема (рис. 2.7) симетрична, розглянемо тільки одну її половину.

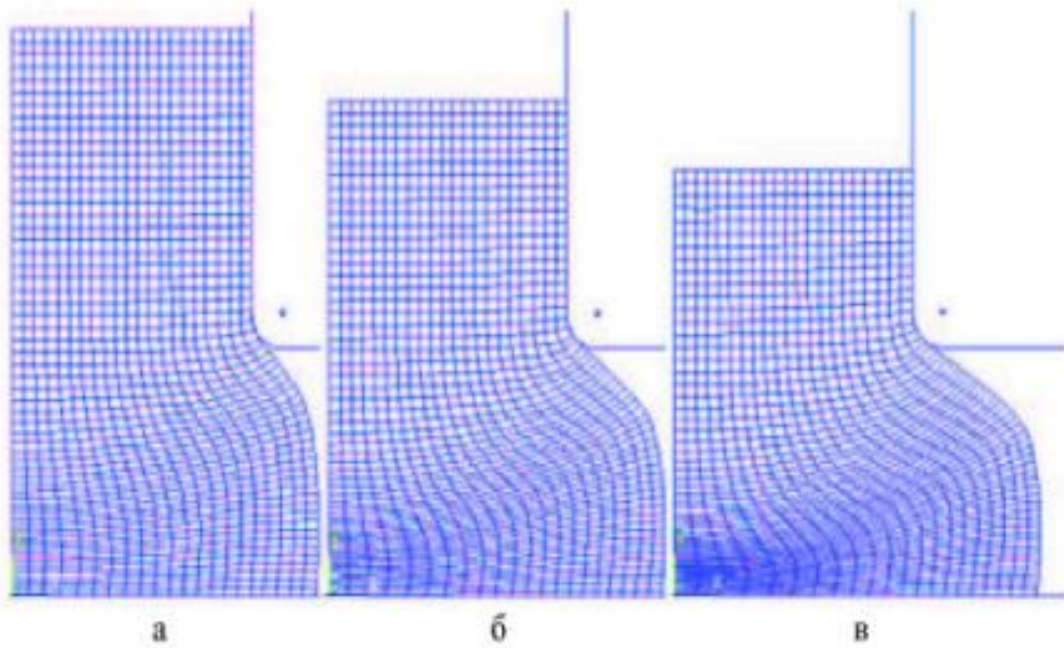


Рисунок 2.3 – Викривлення ділильної сітки по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.25$; б - $\frac{S}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.05$$

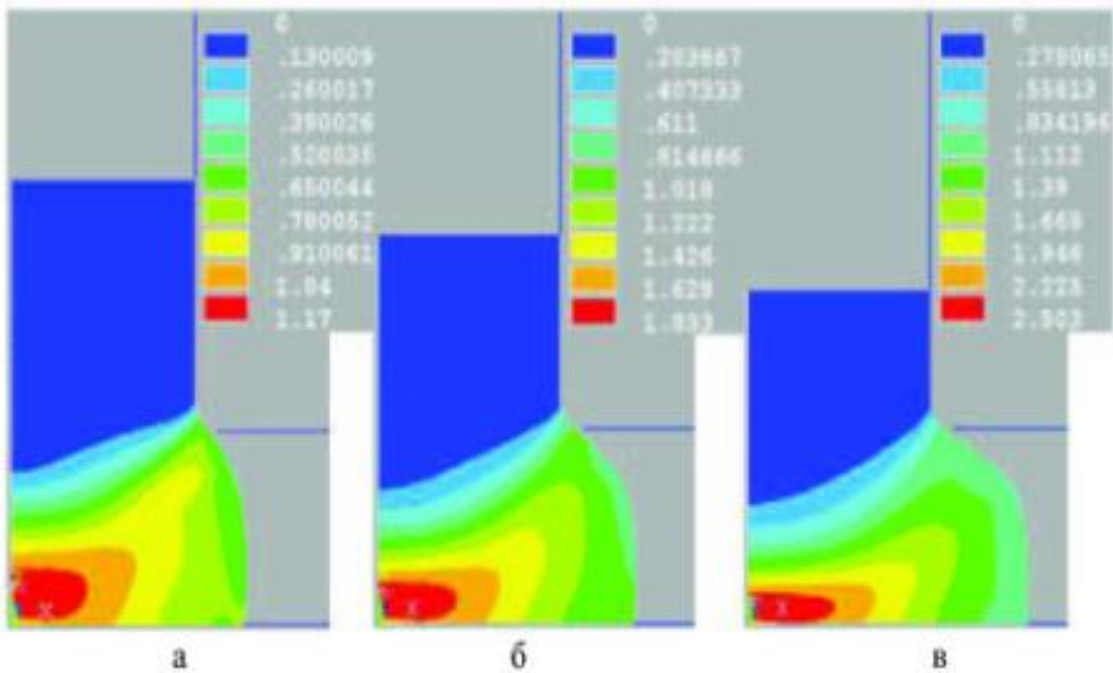


Рисунок 2.4 – Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.25$; б - $\frac{S}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.05$$

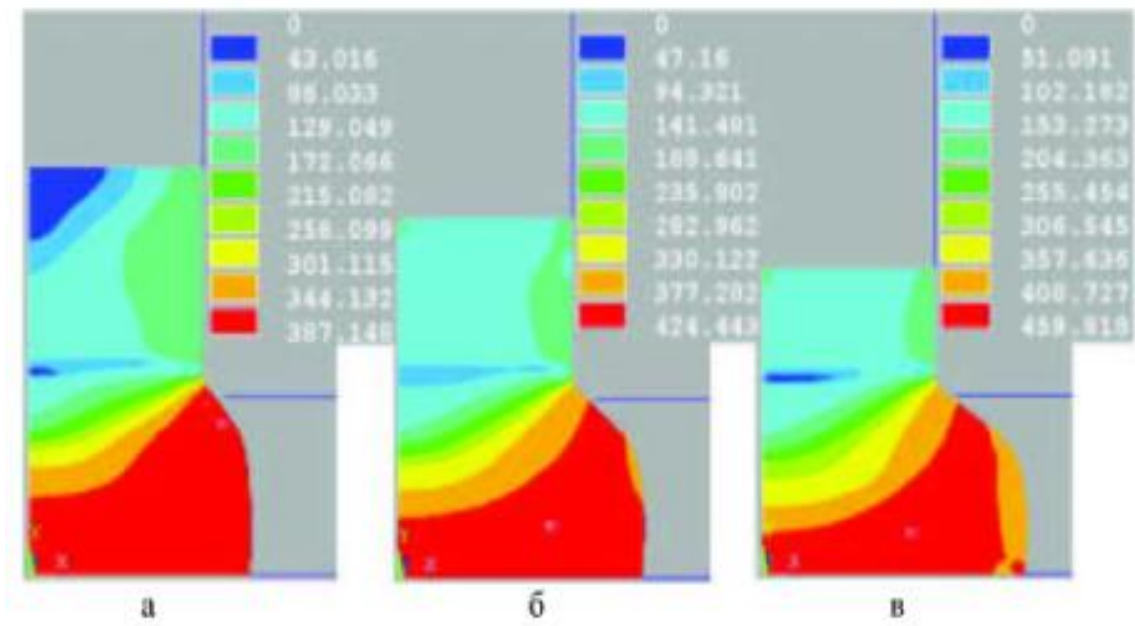


Рисунок 2.5 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.25$; б - $\frac{S}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.05$$

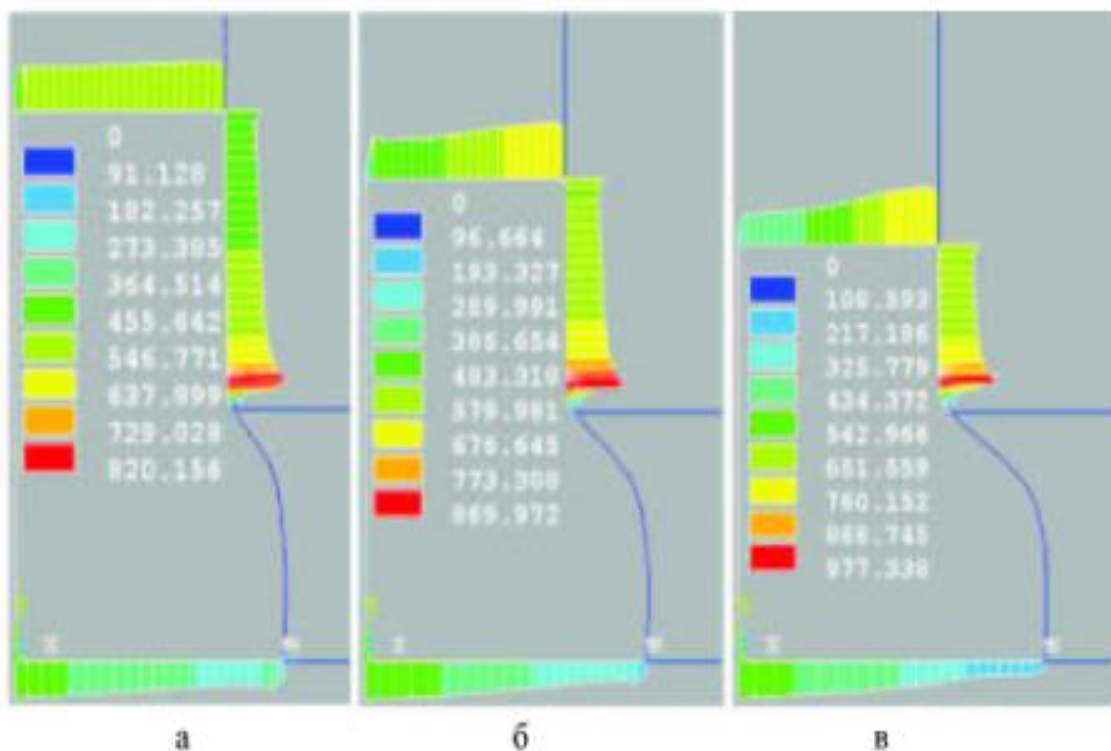


Рисунок 2.6 – Розподіл нормальних напружень σ_t на інструмент по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а -

$$\frac{S}{R_0} = 0.25; \text{ б - } \frac{S}{R_0} = 0.8; \text{ в - } \frac{S}{R_0} = 1.05$$

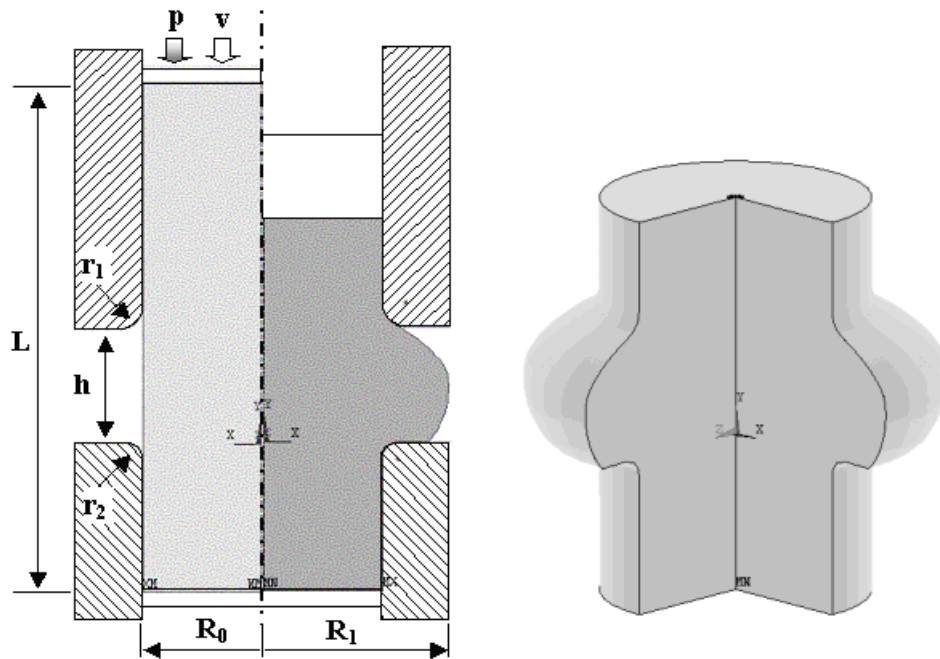


Рисунок 2.7 - Схема радіального видавлювання фланця з односторонньою подачею в середній частині стержня

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця в середній частині стержня з односторонньою подачею необхідні наступні параметри:

- матеріал заготовки приймаємо М1, параметри механічних властивостей якого вказані вище (див. п.п. 2.1.1);
- геометричні параметри процесу: R_0 – радіус заготовки ($R_0 = 7,6 \text{ мм}$), h – висота приймальної порожнини для фланцю, що видавлюється, ($h = 7 \text{ мм}$), r_1 і r_2 – радіус округлення кромки інструменту ($r_1 = 1,5 \text{ мм}$, $r_2 = 1 \text{ мм}$), L – висота заготовки ($L = 31 \text{ мм}$).

Моделювання силового режиму

В результаті моделювання визначено силовий режим процесу радіального видавлювання в діапазоні значень $S/R_0 = 0,0 \dots 1,25$; побудовані графіки представлені на рис. 2.8.

На графіках видно, що зі збільшенням ступеня деформації зростає тиск на головний деформуючий інструмент.

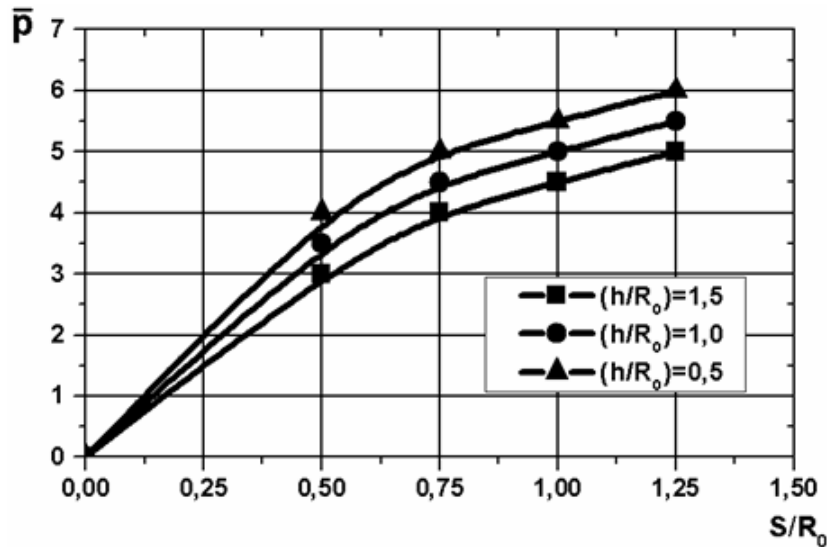


Рисунок 2.8 - Графік залежності приведенного тиску радіального видавлювання від відносного ходу процесу

Також розглянуто вплив величини висоти фланця на силовий режим радіального видавлювання. Встановлено, що зі збільшенням висоти видавлюється фланця від 0,5 до 1,5 зусилля видавлювання зростає на 15 ... 18%.

Моделювання деформованого стану

При радіальному видавлюванні спостерігається викривлення ділильної сітки і розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації (рис. 2.9, 2.10).

З рисунка видно, що висота осередку деформації обмежується розміром приймальні порожнини під фланець, а в середній його частині зосереджена найбільша інтенсивність деформацій, максимальне значення якої перебуває в межах 2,12.

Розподіл деформацій $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta$ представлено на рис. 2.11...2.14. Максимальні значення $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}$ розташовані в середній частині осередку деформації, а значення γ_{rz} – по його краям і примикають до радіусних

переходів на інструменті.

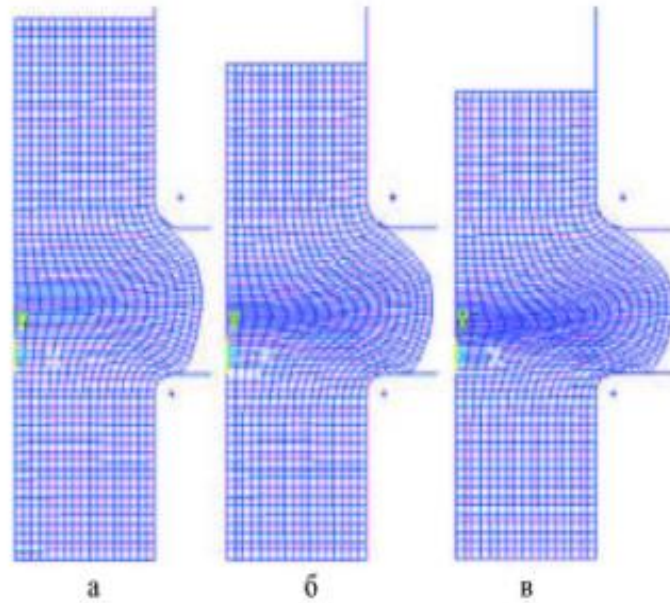


Рисунок 2.9 – Викривлення ділильної сітки по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

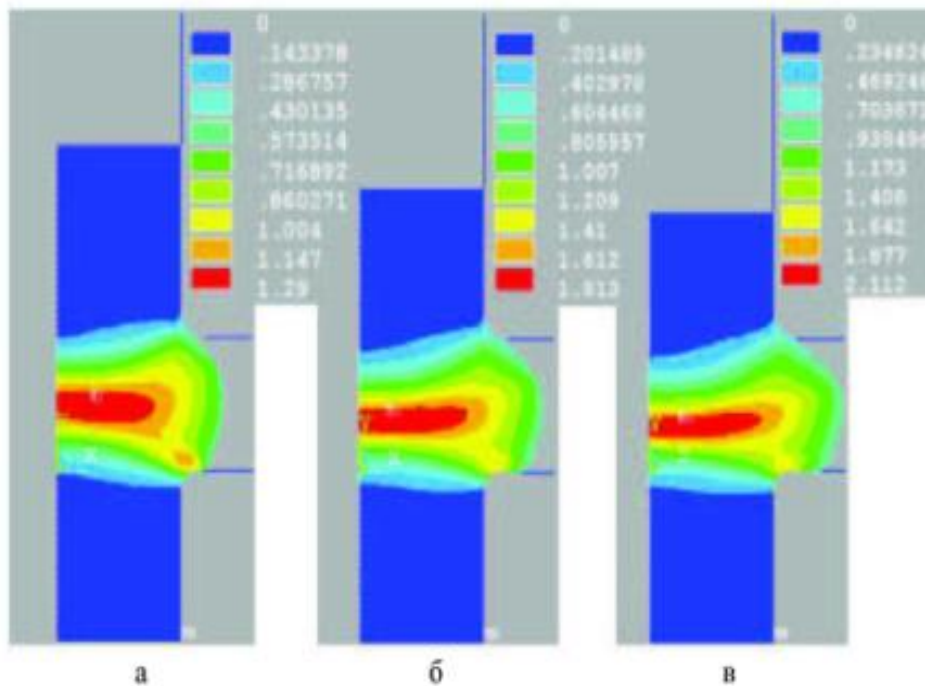


Рисунок 2.10 – Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

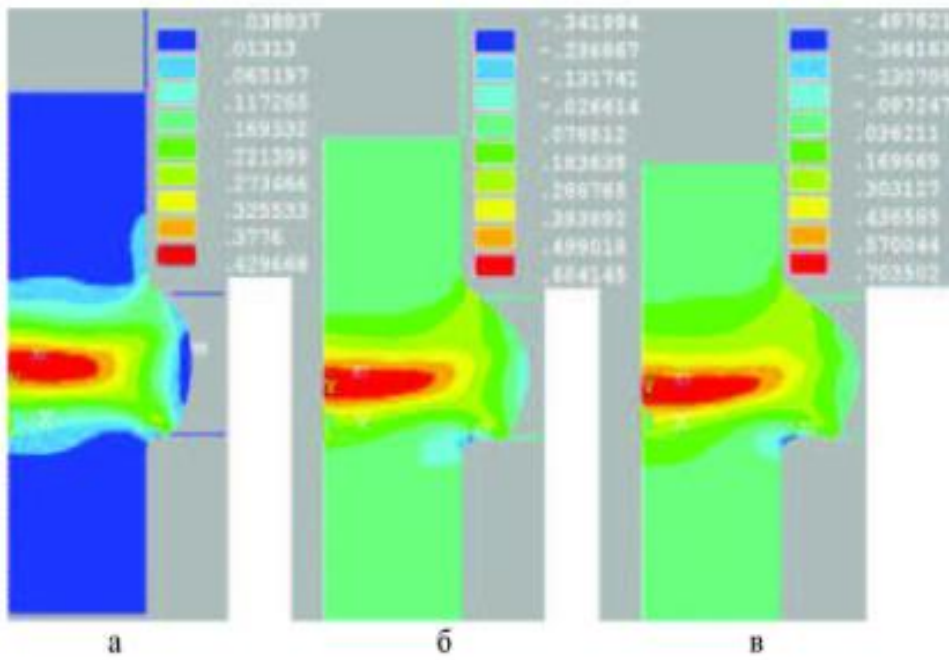


Рисунок 2.11 – Розподіл радіальної деформацій ε_r по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

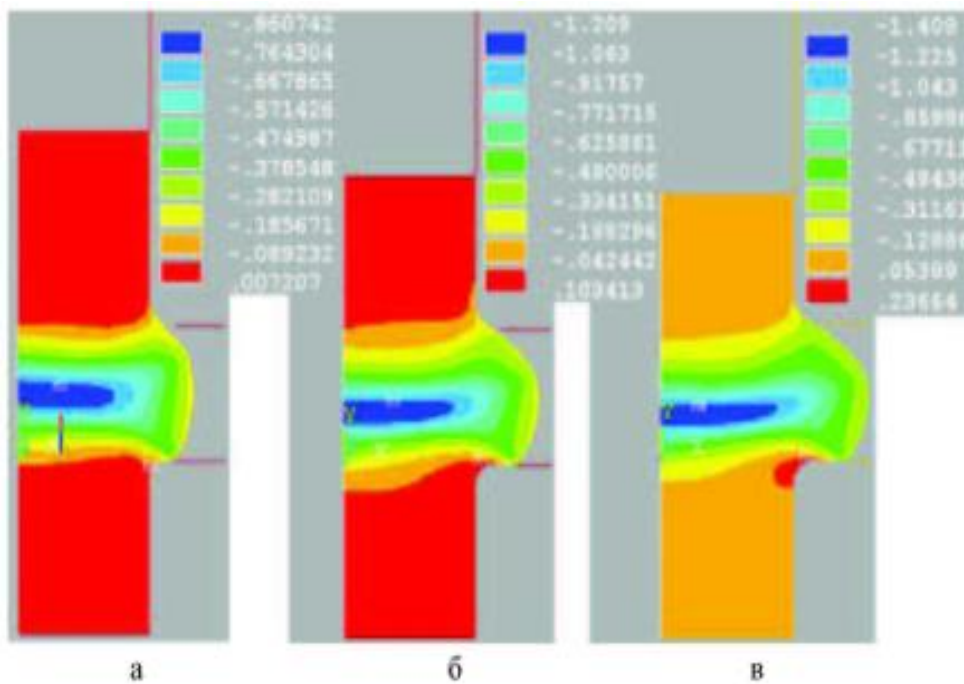


Рисунок 2.12 – Розподіл осьової деформацій ε_z по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

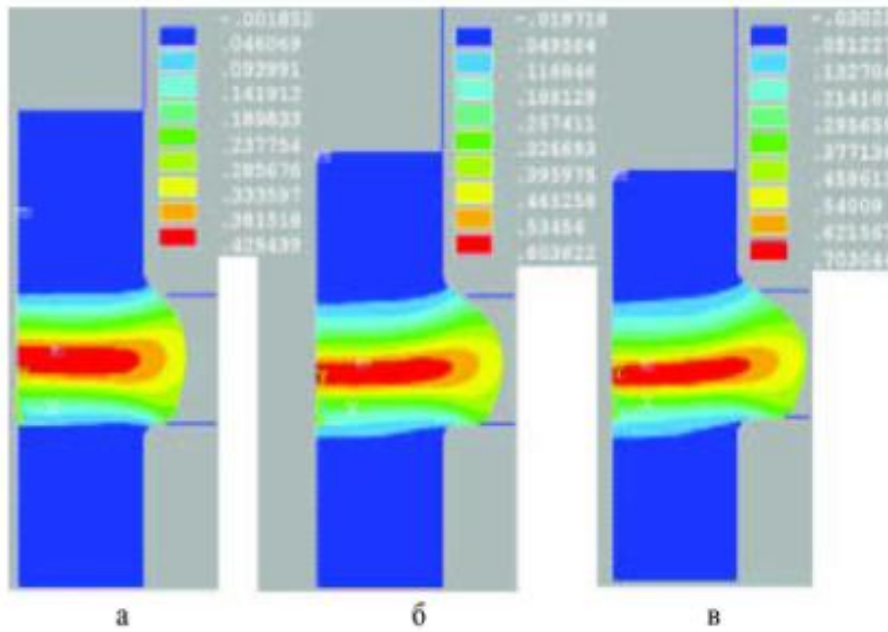


Рисунок 2.13 – Розподіл окружної деформацій ε_{θ} по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

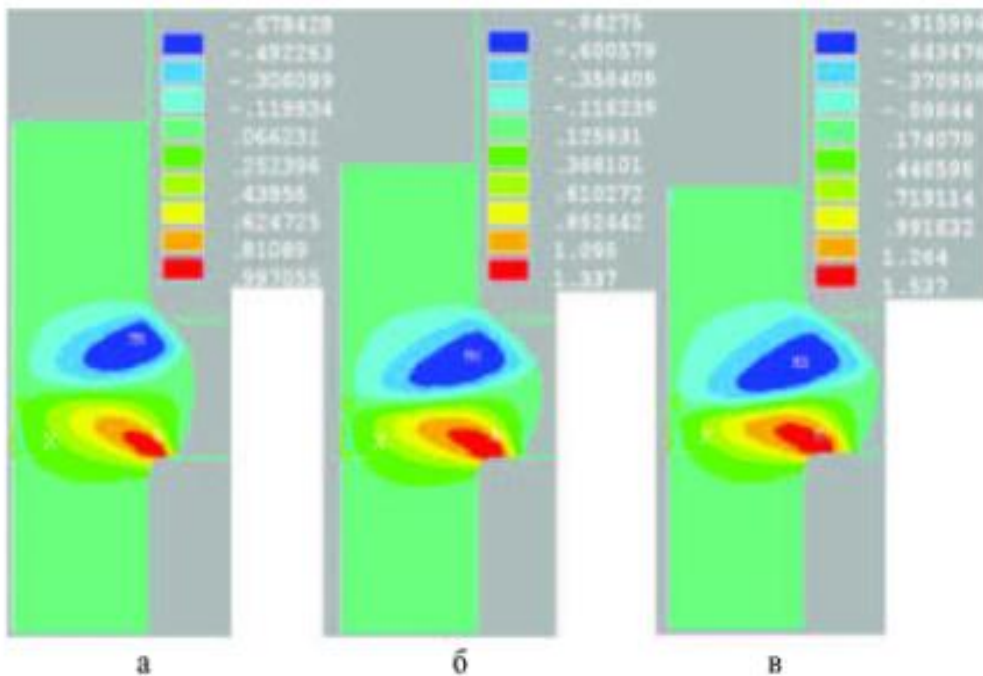


Рисунок 2.14 – Розподіл деформації зсуву ε_z по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

Моделювання напруженого стану

На рис. 2.15, 2.16 представлено розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перетині заготівлі та наведено розподіл нормальних напружень на стінки інструменту.

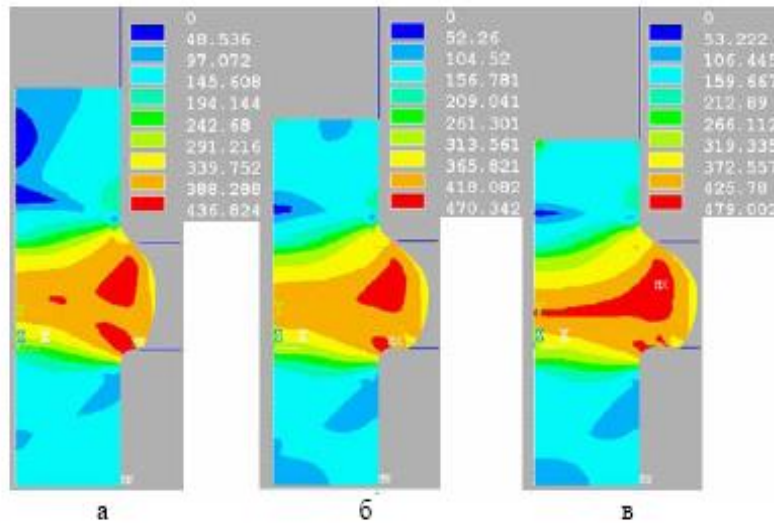


Рисунок 2.15 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.75$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.0$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.25$$

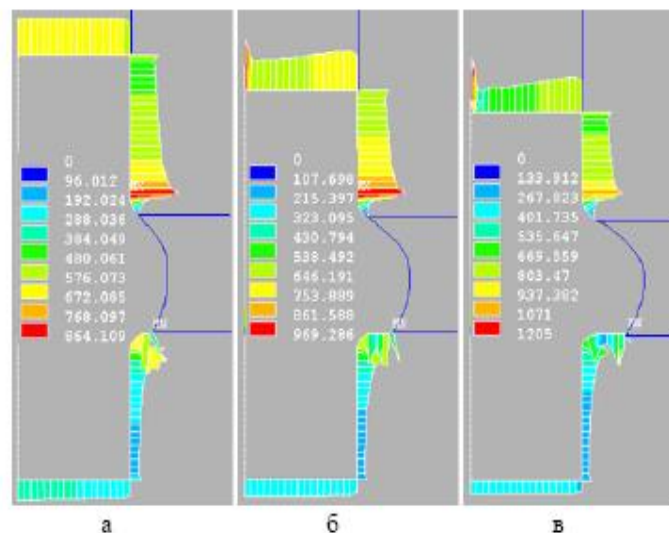


Рисунок 2.16 – Розподіл нормальних напружень σ_i на інструмент по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а -

$$\frac{S}{R_0} = 0.75; \text{ б - } \frac{S}{R_0} = 1.0; \text{ в - } \frac{S}{R_0} = 1.25$$

З малюнка видно, що інтенсивність напружень розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення.

Розподіл нормальних напружень на стінки інструменту показує, що найбільш небезпечну ділянку з точки зору руйнування оснащення знаходиться у верхній частині приймальної порожнини під фланець, так як там напругу досягають 1,2 ГПа.

2.1.3 Радіальне видавлювання фланця в середній частині стержня з двосторонньою подачею

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця в середній частині стержня з двосторонньою подачею параметри процесу брали як для процесу радіального видавлювання фланця в середній частині стержня з односторонньою подачею (див. п.п. 2.1.2). Швидкість руху протипуансона при моделюванні цього процесу приймалася рівною половині швидкості руху пуансона ($V' = 0,5V$). Схема процесу представлена на рис. 2.17.

Моделювання силового режиму

В результаті моделювання було визначено силовий режим процесу радіального видавлювання і побудовані графіки (рис. 2.18). З графіків видно, що при збільшенні ступеня деформації тиск на головний деформуючий інструмент при радіальному видавлюванні зростає.

Силовий режим процесу радіального видавлювання був досліджений в інтервалі значень $S/R_0 = 0,0 \dots 1,4$ з урахуванням впливу висоти фланця, що видавлюється. При розгляді представлених графічних залежностей видно, що з ростом висоти фланця від 0,5 до 1,5 крива залежності тиску від ступеня деформації розташовується нижче, це свідчить про зниження зусилля видавлювання на 15%.

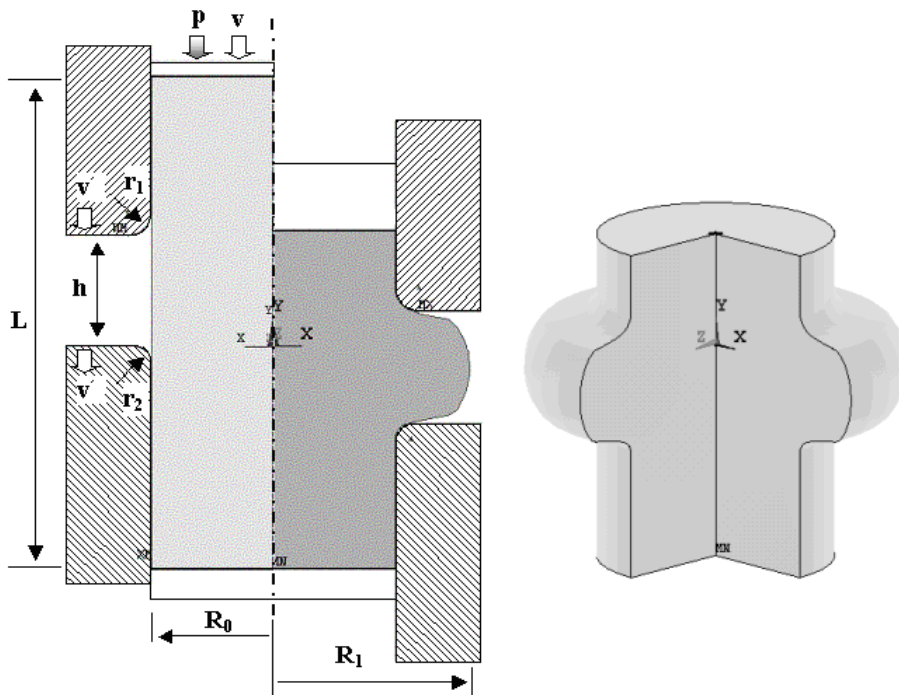


Рисунок 2.17 - Схема радіального видавлювання фланця в середній частині стержня з двосторонньою подачею ($\mu = 0,05$)

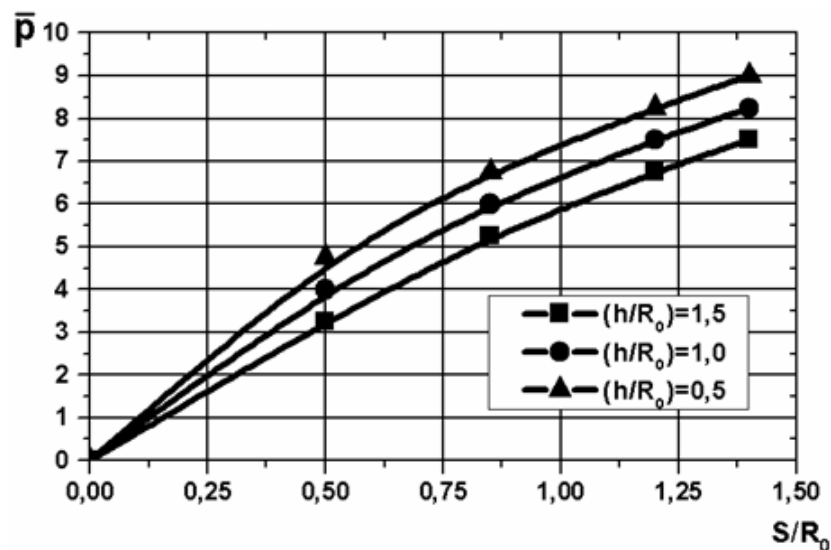


Рисунок 2.18 - Графік залежності приведенного тиску від відносного ходу процесу

При радіальному видавлюванні спостерігається викривлення ділильної сітки і розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації (рис. 2.19, 2.20). Осередок деформації по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в середній частині осередку деформації.

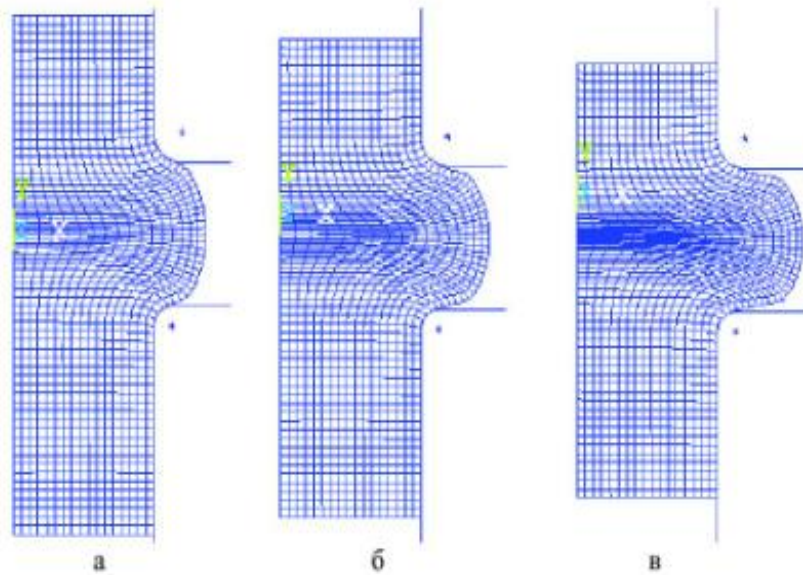


Рисунок 2.19 – Викривлення ділільної сітки по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

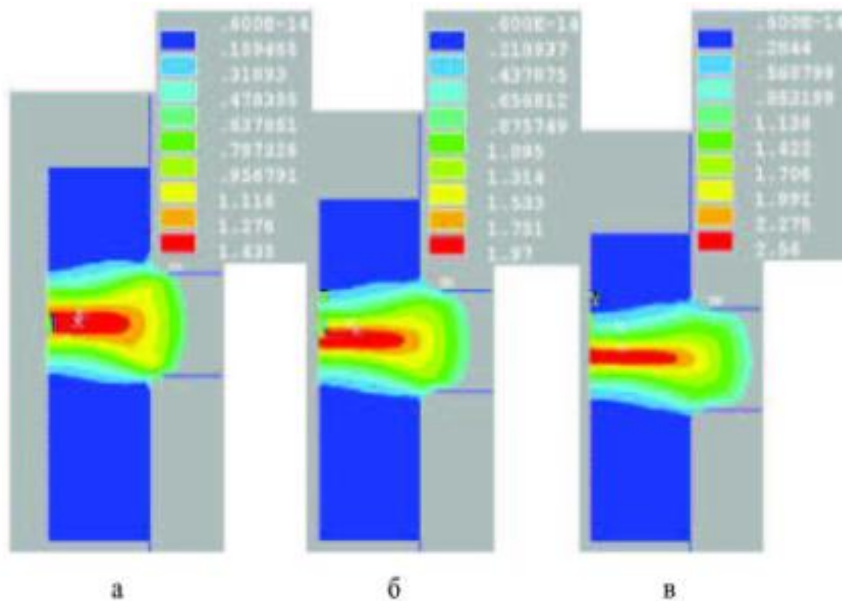


Рисунок 2.20 – Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

Особливістю видавлювання з двосторонньою подачею є те, що осередок деформації є симетричним по горизонталі.

Максимальне значення інтенсивності деформацій знаходиться в межах 2,56.

Розподіл деформацій $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}$, представлено на рис. 2.21-2.24.

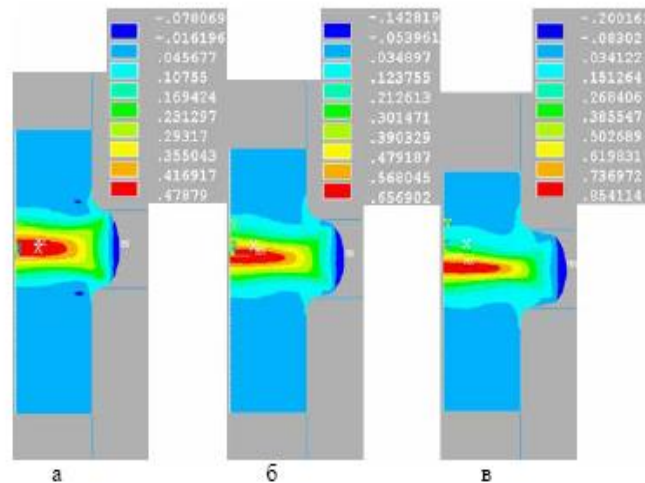


Рисунок 2.21 – Розподіл радіальної деформацій ε_r по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

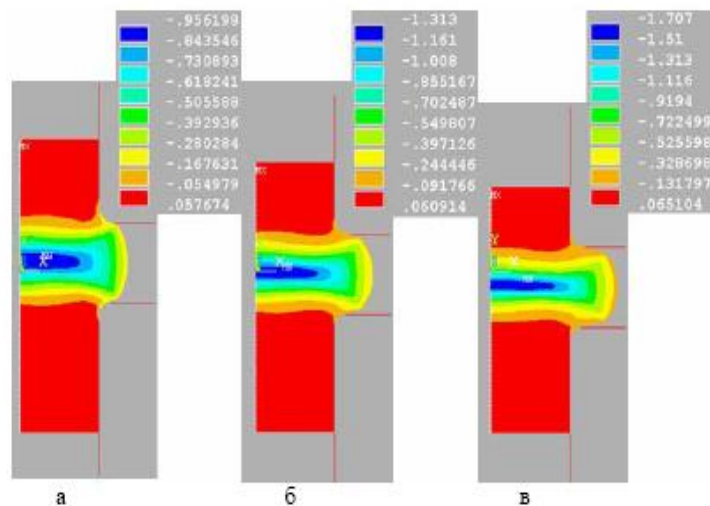


Рисунок 2.22 – Розподіл осьової деформацій ε_z по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

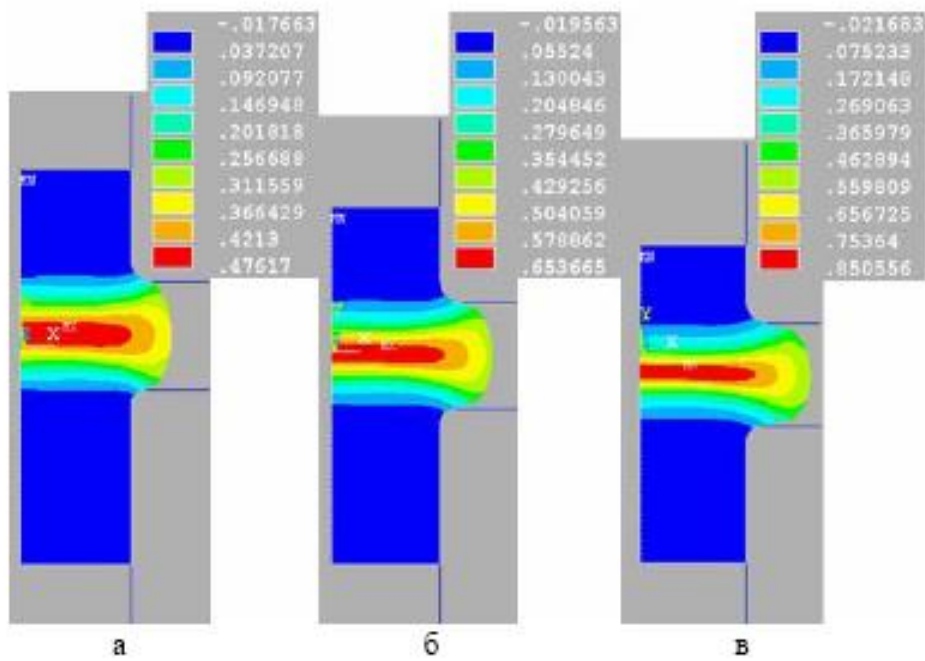


Рисунок 2.23 – Розподіл окружної деформацій ε_{θ} по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

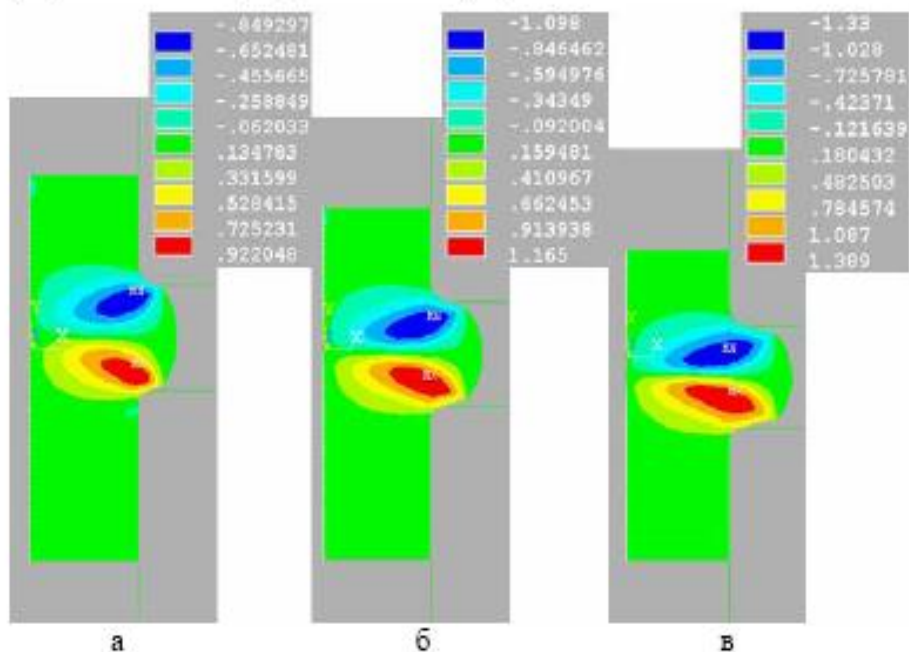


Рисунок 2.24 – Розподіл деформації зсуву γ_{rz} по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

Як видно з малюнків максимальні значення $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta$ розташовані в середній частині осередку деформації, максимальні значення γ_{rz} розташовані по краях осередку деформації і примикають до радіусних переходів на інструменті.

Моделювання напруженого стану

На рис. 2.25, 2.26 представлено розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перетині заготовки, що видавлюється, та наведено розподіл нормальних напружень на стінки інструменту.

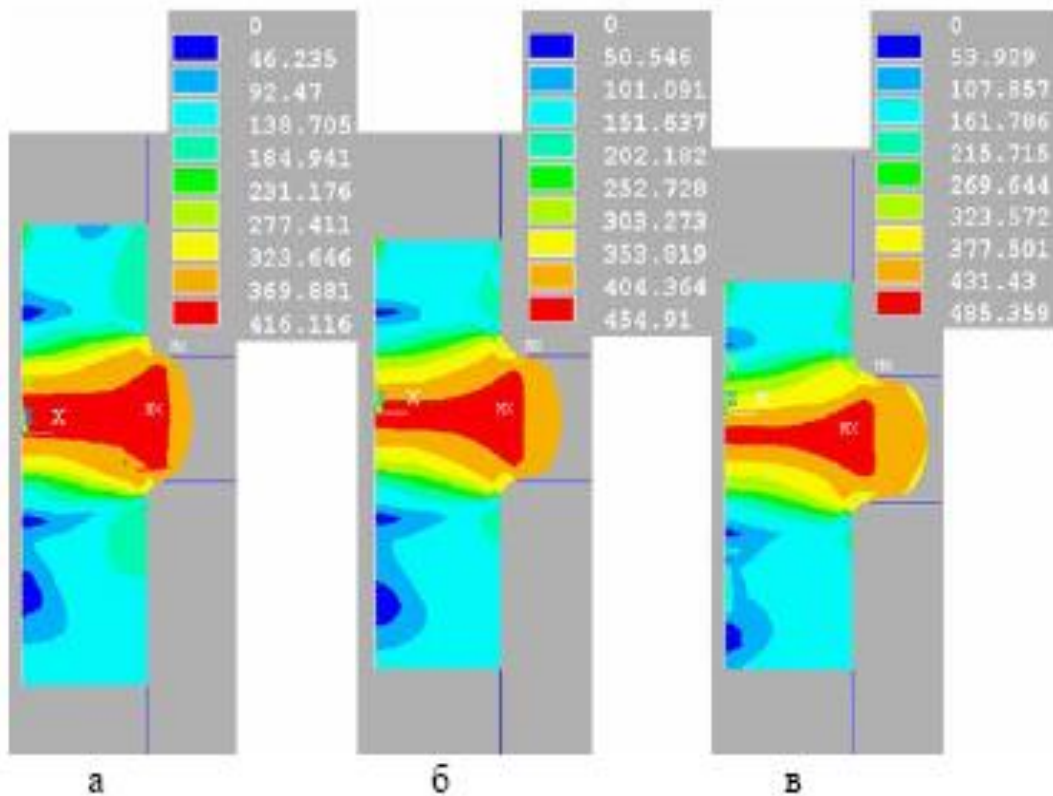


Рисунок 2.25 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.85$; б - $\frac{S}{R_0} = 1.2$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.4$$

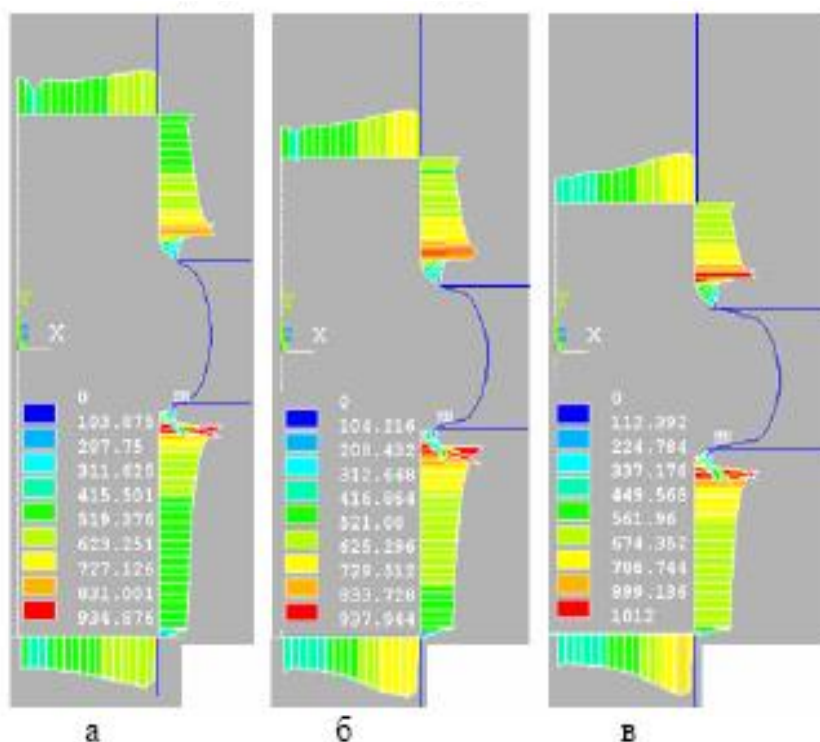


Рисунок 2.26 – Розподіл нормальних напружень σ_t на інструмент по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а -

$$\frac{S}{R_0} = 0.85; \text{ б} - \frac{S}{R_0} = 1.2; \text{ в} - \frac{S}{R_0} = 1.4$$

Інтенсивність напружень по осередку деформації розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення. Значення напружень і їх розподіл представлені на рис. 2.25, 2.26.

Розподіл нормальних напружень на стінки інструменту (рис. 2.25, 2.26) показує, що найбільш небезпечна ділянка з точки зору руйнування оснащення знаходиться у верхній частині приймальної порожнини під фланець. У цій області напруження досягає до 1,0 ГПа, що на 20% менше, ніж при видавлюванні з односторонньою подачею.

Це говорить про те, що видавлювання з двосторонньою подачею є менш завантаженим, ніж видавлювання з односторонньою подачею.

За схемами радіального видавлювання фланців на стрижні (в середній його частині і на кінці) і на трубі (в середній її частині і на кінці) відомі рішення по силовому режиму, вироблені раніше методом балансу потужностей.

Порівняння результатів рішень, отриманих методом балансу потужностей та моделюванням в пакеті ANSYS представлені на рис. 2.27, 2.28.

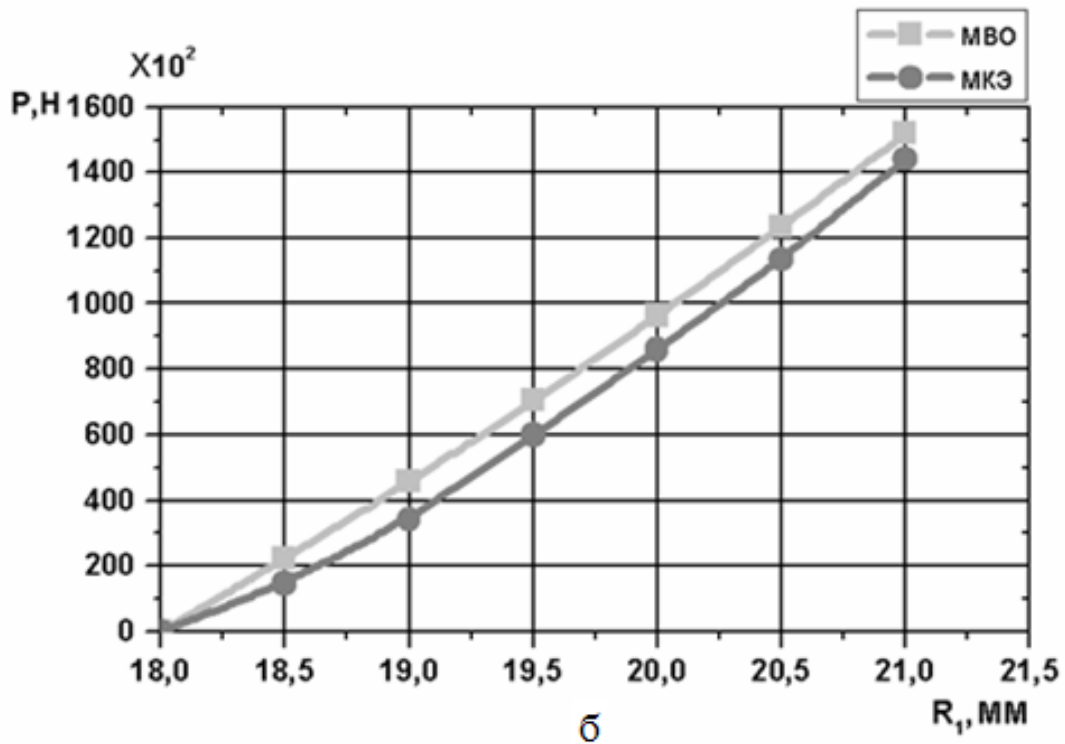
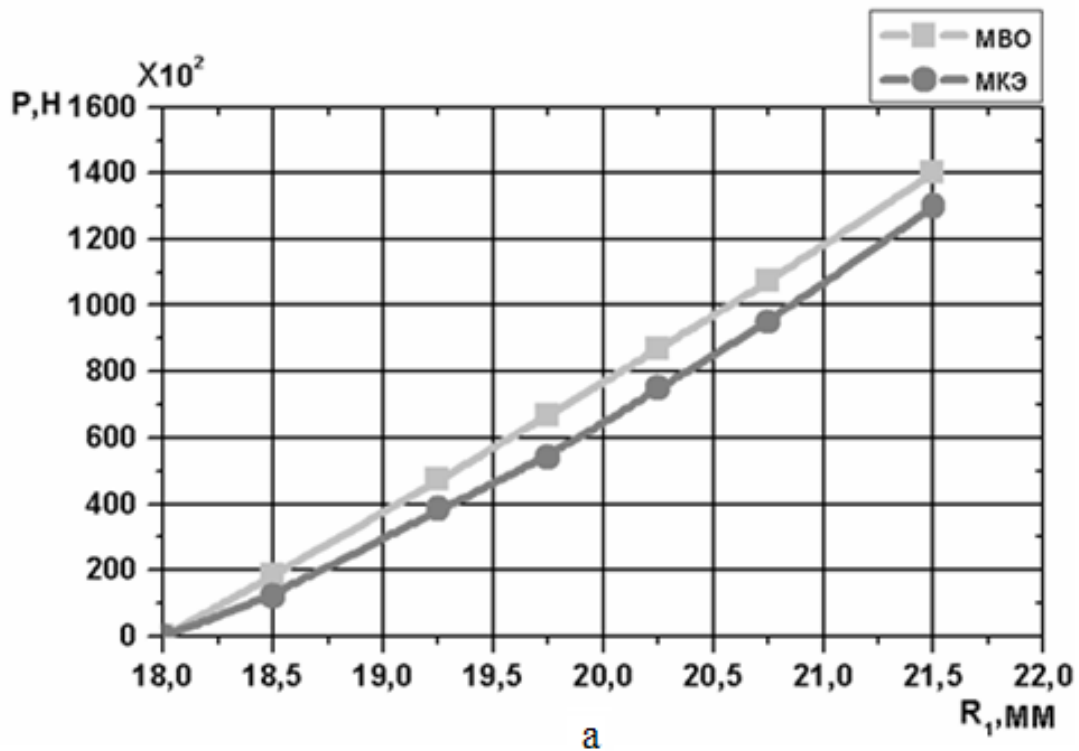


Рисунок 2.27 - Графіки залежності зусилля видавлювання від ходу повзуна преса при радіальному видавлюванні фланця в середній частині труби (а) і на кінці труби (б)

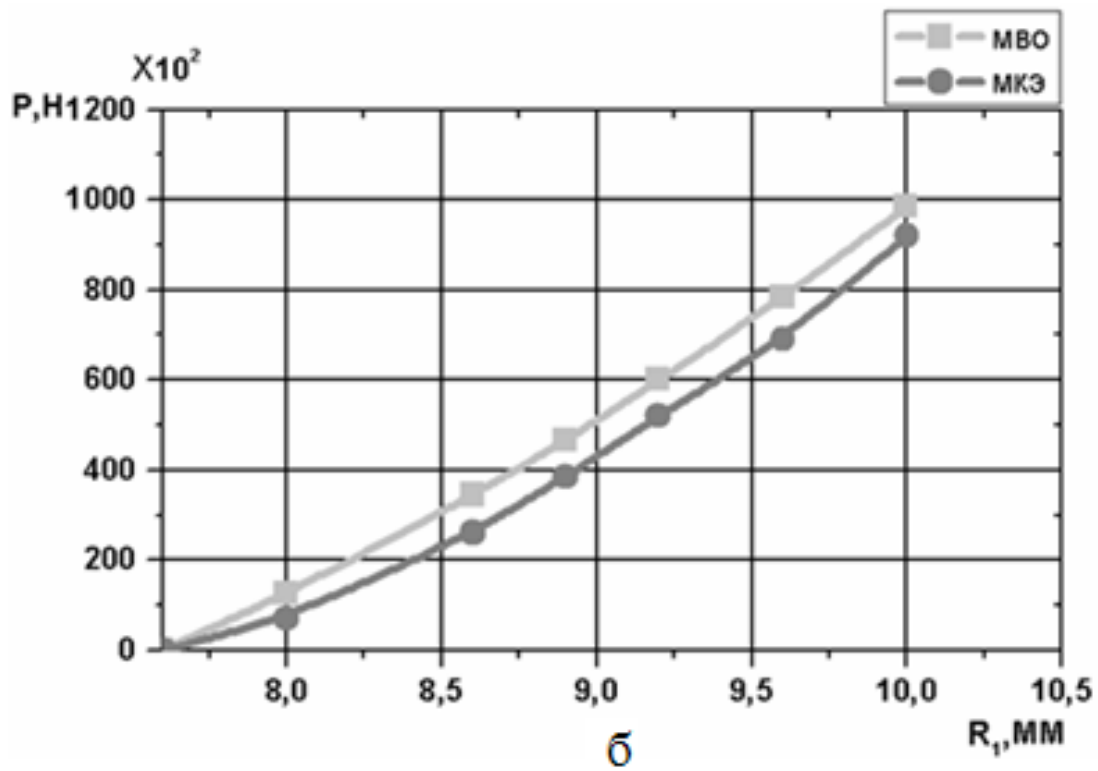
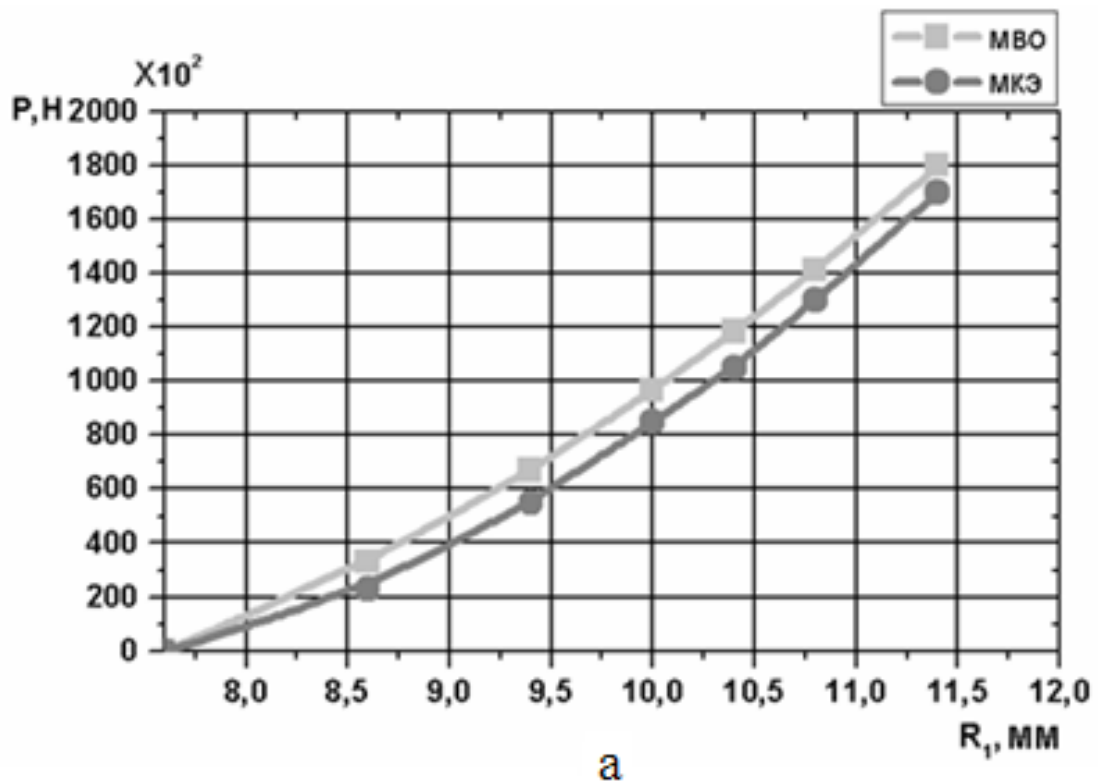


Рисунок 2.28 - Графіки залежності зусилля видавлювання від ходу повзуна преса при радіальному видавлюванні фланця в середній частині стержня (а) на кінці стержня (б)

З графіків видно, що рішення, отримані моделюванням в пакеті ANSYS дають більш низьку оцінку силового режиму процесу радіального видавлювання на 10 ... 12%, ніж енергетичний метод.

2.2. Радіальне видавлювання фланця на кінці труби з односторонньою подачею

В даному параграфі представлено математичне моделювання в середовищі ANSYS процесів радіального видавлювання фланців на трубі [39-41].

Розглянуто схеми видавлювання фланців на кінці труби і в її середній частині з односторонньою подачею і видавлювання фланця в середній частині труби з двосторонньою подачею.

В силу симетрії розглядається одна половина схеми. Схема процесу представлена на рис. 2.29.

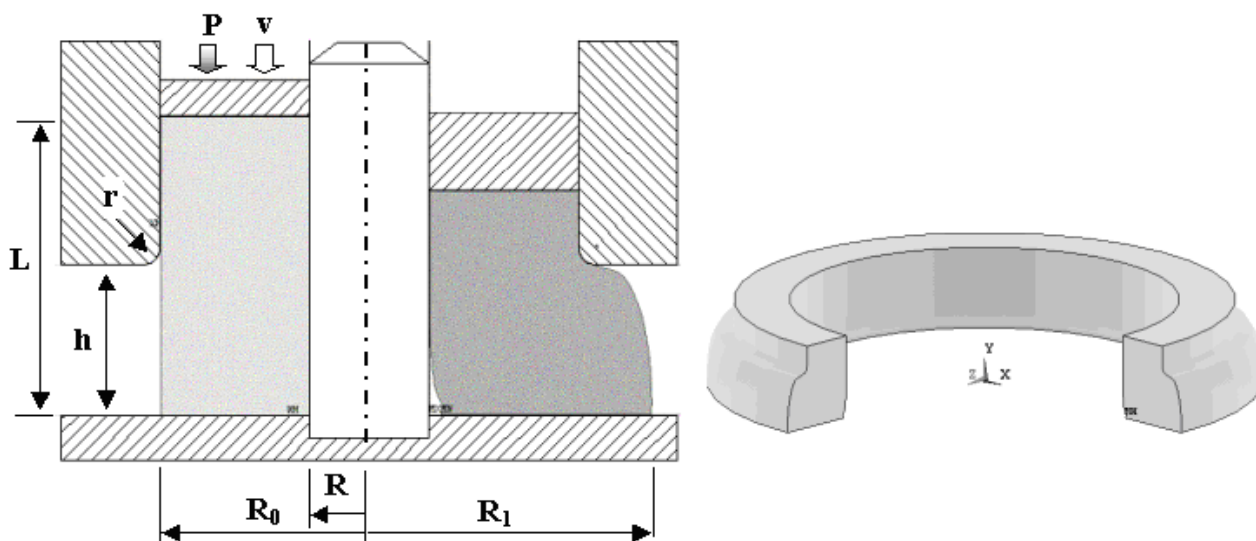


Рисунок 2.29 - Схема радіального видавлювання фланця з односторонньою подачею на кінці труби ($\mu = 0,05$)

Для моделювання процесу радіального видавлювання фланця на кінці труби з односторонньою подачею вибирали такі параметри:

- механічні властивості матеріал заготовки АМцМ: крива істинних

напружень для якого описується рівнянням $\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \varepsilon^{0,15}$, границя текучості $\sigma_{0,2} = 105$ МПа, модуль Юнга $E = 75000$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu = 0,3$ і коефіцієнт тертя між матеріалом заготовки і інструментом $\mu = 0,0 \dots 0,1$ (закон Зібеля).

- геометричні параметри процесу: R_0 – зовнішній радіус заготовки ($R_0 = 18$ мм), R – внутрішній радіус заготовки ($R = 14$ мм), t – товщина стінки заготовки рівна різниці R_0 і R , h – висота приймальної порожнини для фланцю, що видавлюється ($h = 4$ мм), r – радіус округлення кромки інструменту ($r = 0,5$ мм), L – висота заготовки ($L = 8$ мм), t_r – величина фланцю рівна різниці R_0 і R_1 , h/t – відносна висота фланцю ($h/t = 1$).

Моделювання силового режиму

В результаті моделювання визначено силовий режим процесу радіального видавлювання, графіки наведені на рис. 2.30.

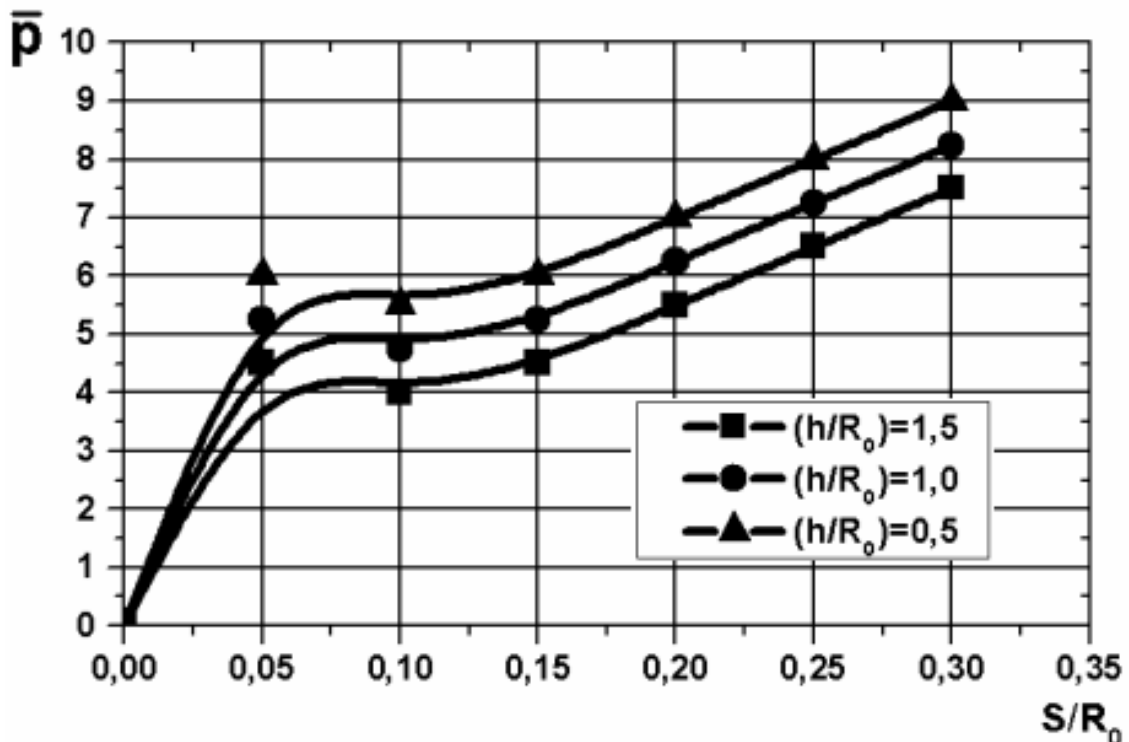


Рисунок 2.30 - Графік залежності приведенного тиску від відносного ходу процесу

Силовий режим процесу радіального видавлювання досліджений в певному проміжку значень $S/R_0 = 0,0 \dots 0,3$.

Як видно з графіків, при збільшенні ступеня деформації тиск на головний деформуючий інструмент при радіальному видавлюванні зростає.

Також досліджено вплив величини висоти фланця, що видавлюється, на силовий режим радіального видавлювання. Як видно з графіків, чим більше висота фланця, що видавлюється, тим нижче розташована на графіку крива залежності тиску від ступеня деформації, це говорить про те, що зі збільшенням висоти фланця зусилля видавлювання зменшується. Так при збільшенні відносної висоти фланця від 0,5 до 1,5 зусилля видавлювання зменшується на 15 ... 18%.

Моделювання деформованого стану

На рис. 2.31, 2.32 представлено викривлення ділильної сітки при радіальному видавлюванні і розподіл інтенсивності деформацій по осередку деформації.

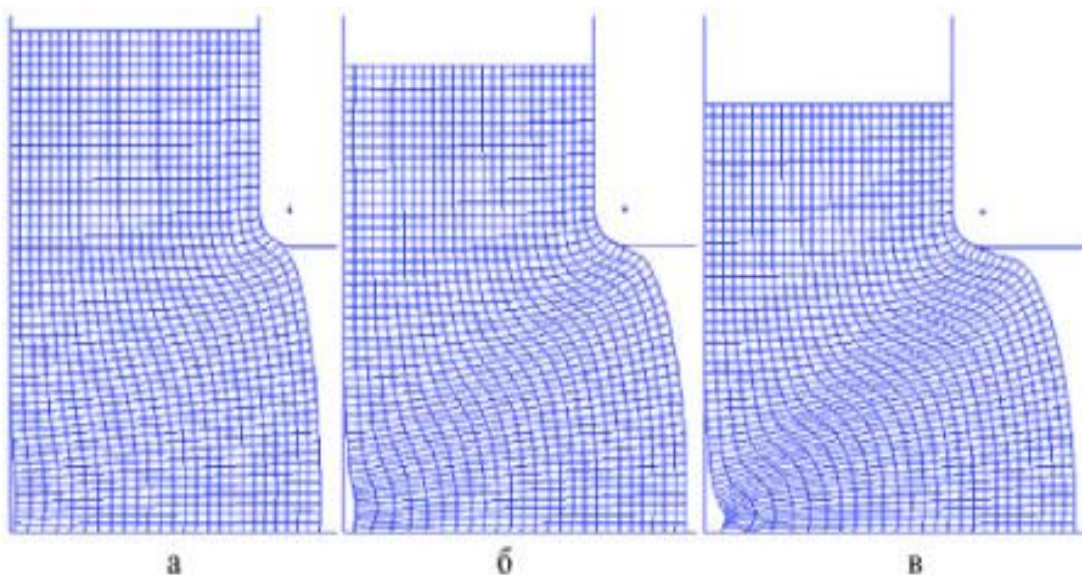


Рисунок 2.31 – Викривлення ділильної сітки по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.05$; б - $\frac{S}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.0$$

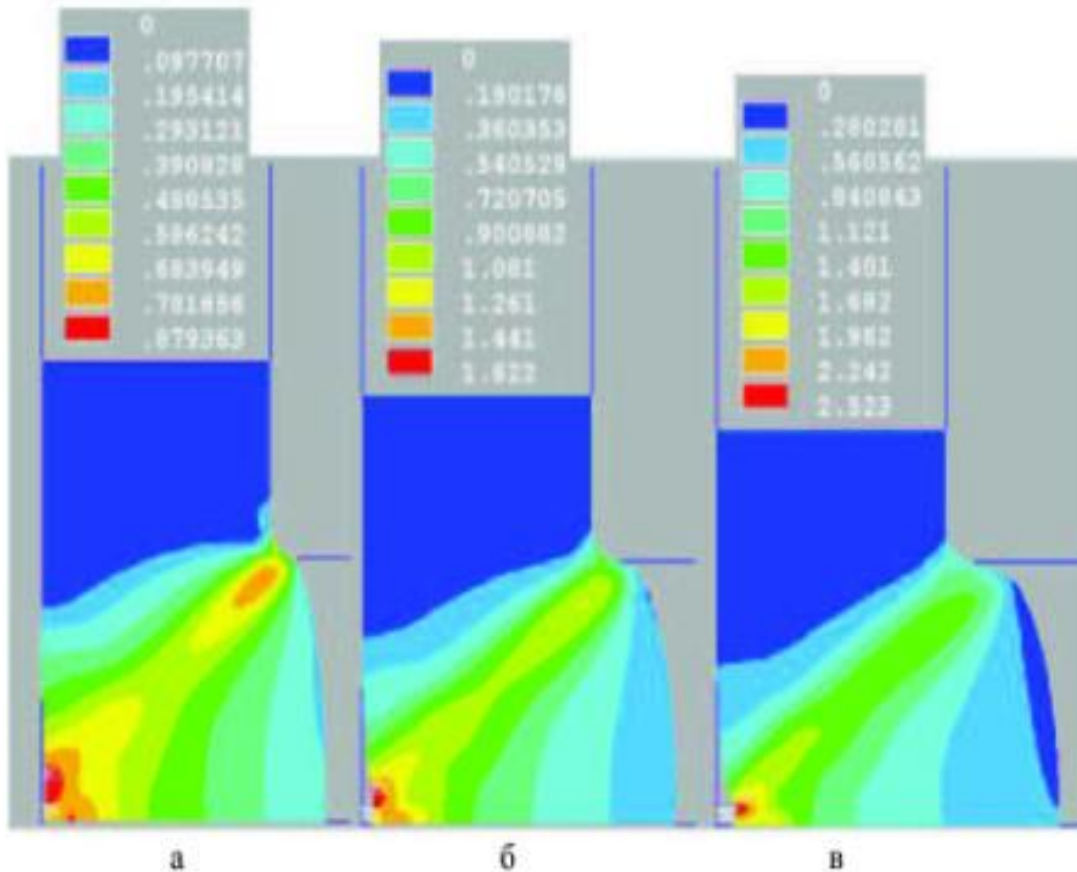


Рисунок 2.32 – Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{s}{R_0} = 0.05$; б - $\frac{s}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{s}{R_0} = 1.0$$

Як видно з рисунка, осередок деформації по висоті обмежується висотою приймальної порожнини під фланець, а найбільша інтенсивність деформацій зосереджена в нижній частині осередку деформації.

Максимальне значення інтенсивності деформацій перебуває в межах 2,5.

Моделювання напруженого стану

На рис. 2.33, 2.34 представлено розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перетині видавлюваної заготовки і нормальних напружень на стінки інструменту.

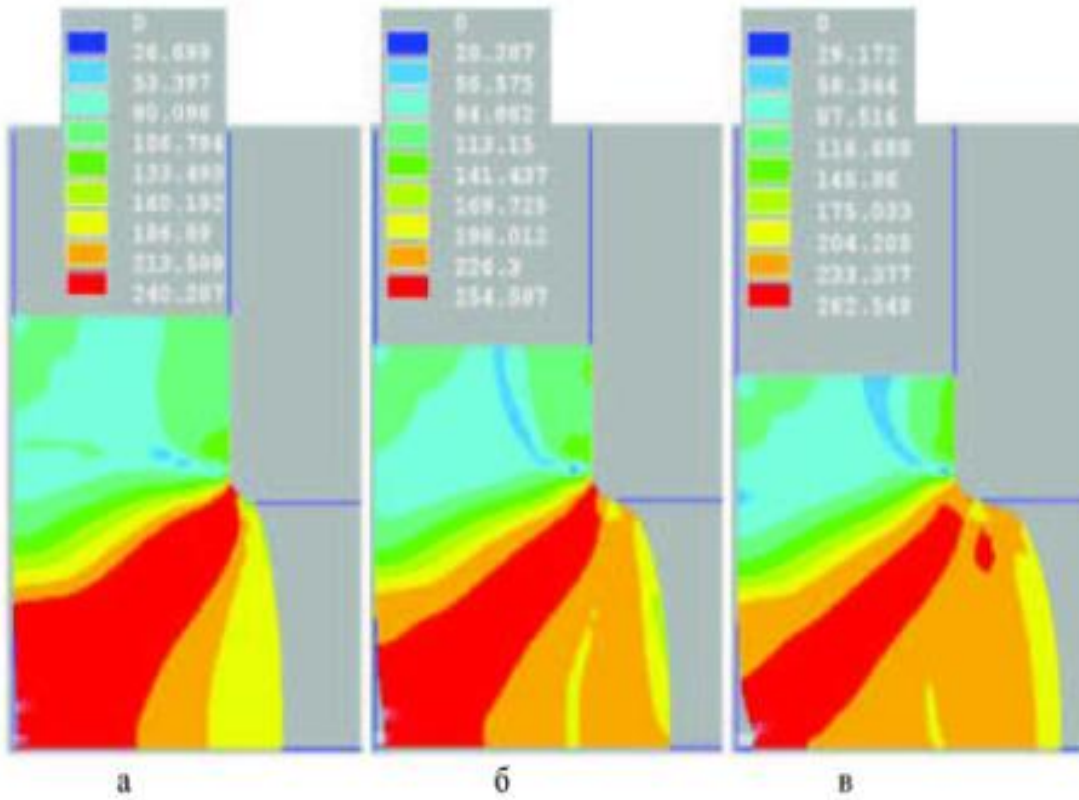


Рисунок 2.33 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а - $\frac{S}{R_0} = 0.05$; б - $\frac{S}{R_0} = 0.8$; в -

$$\frac{S}{R_0} = 1.0$$

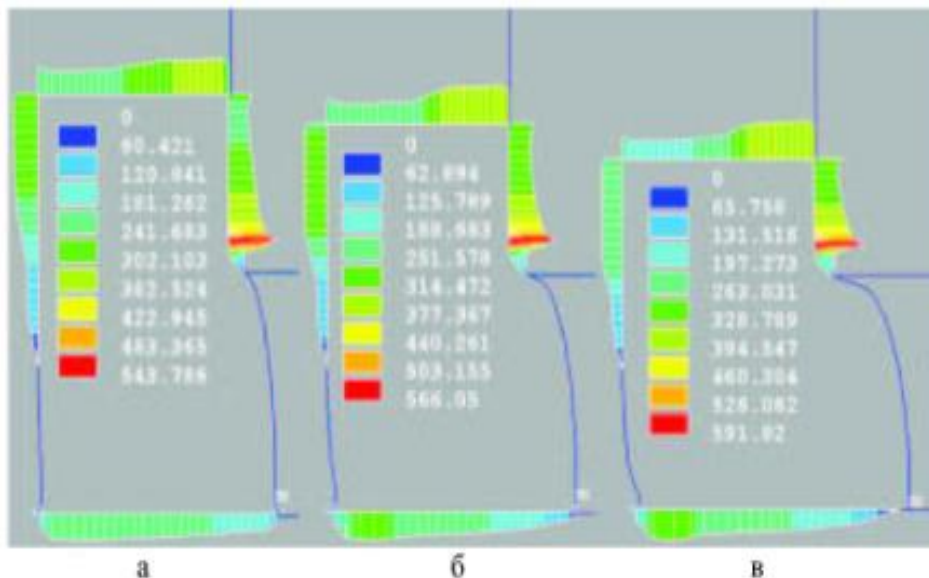


Рисунок 2.34 – Розподіл нормальних напружень σ_t на інструмент по ходу деформування при радіальному видавлюванні при відносному ходові: а -

$$\frac{S}{R_0} = 0.05; \text{ б} - \frac{S}{R_0} = 0.8; \text{ в} - \frac{S}{R_0} = 1.0$$

Як видно з малюнка, інтенсивність напружень по осередку деформації розподіляється практично рівномірно і досягає свого максимального значення. Значення напружень і їх розподіл представлені на рис. 2.33, 2.34.

Розподіл нормальних напружень на стінки інструменту показує, що найбільш небезпечну ділянку з точки зору руйнування оснащення знаходиться у верхній частині приймальної порожнини під фланець. Там напруження досягають 0,6 ГПа.

Особливості формозміни

Моделювання процесу радіального видавлювання фланця на кінці трубчастої заготовки (видавлювання на оправці) показало, що при певних геометричних параметрах процесу спостерігається поява на видавлюваних деталях дефекту типу утяжини.

Також помітно, що максимальні інтенсивності деформацій і напружень зосереджені в зоні появи утяжини.

Значення геометричних параметрів, при яких з'являється даний дефект, визначені, и рекомендації відносно визначення його з'явиться представлені у виді графіків на рис. 2.35, 2.36.

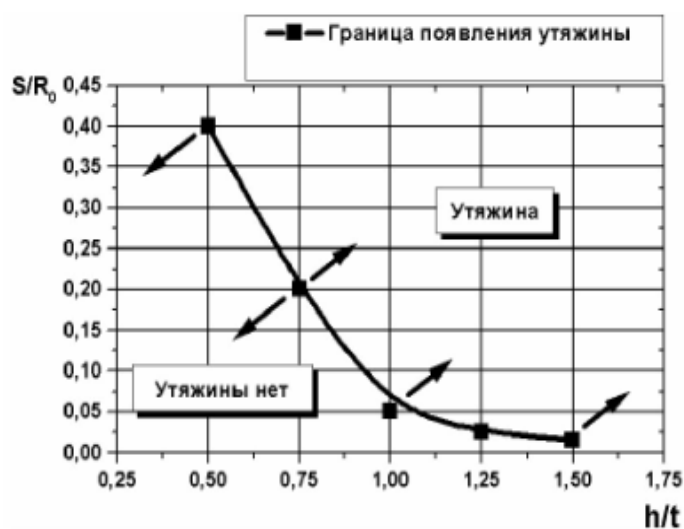


Рисунок 2.35 – Діаграми залежності появи утяжини від відносного ходу деформуючого пуансона S/R_0 і відносної висоти фланцю h/t

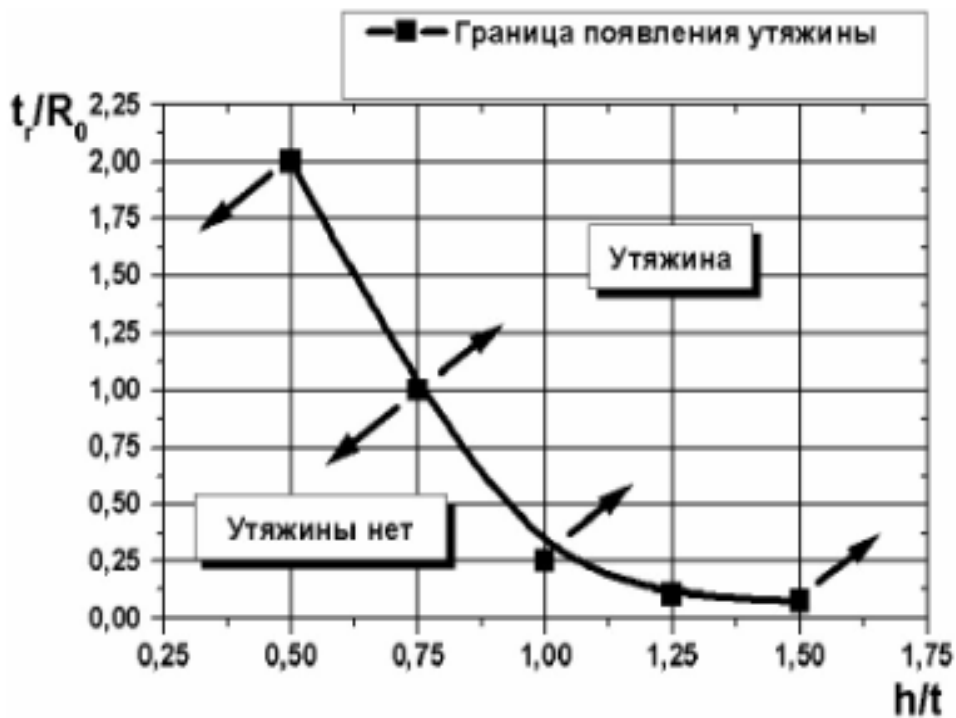


Рисунок 2.36 – Діаграми залежності появи утяжини від відносної величини

t_r/R_0 і відносної висоти фланцю, що видавлюється, h/t

На графіках показано, при яких поєднаннях значень h/t , S/R_0 і t_r/R_0 , і дефект типу утяжини буде з'являтися.

2.3. Експериментальне дослідження виготовлення дисків з уступами при використанні кільцевого конусного інструменту

Основною проблемою при виготовленні дисків з уступами вільним куванням є те, що при використанні існуючої технології, а саме осадки в підкладному кільці, неможливо одержати уступ, висота якого в кілька разів перевищує висоту полотна диска. При цьому частина уступу, що не виконується при осадці в підкладному кільці, закривається ковальським напуском. Надалі цей напуск видаляють при механічній обробці, що призводить до підвищених металовитрат.

Спосіб кування дисків з уступами при використанні кільцевого конусного інструменту включає наступні основні технологічні операції: циліндричну

заготовку осаджують, при цьому операцію осадки виконують у дві стадії. Першу осадку виконують за допомогою кільцевого конусного інструменту із заданим зовнішнім кутом конусності, а також із заданим внутрішнім конусним отвором з кутом конусності (діаметр центрального отвору повинен відповідати діаметру уступу диска). Другу стадію осадки виконують після видалення кільцевого конусного інструменту і наступного кантування на 180° у підкладному кільці, де відбувається остаточне формування уступу.

Для складання повного факторного експерименту (ПФЕ), було обрано такі фактори, які впливають на формозміну заготовки при впровадженні кільцевого конусного інструменту, а саме: $\alpha_{\text{вн.}}$ - внутрішній кут конусності кільцевого конусного інструменту (X_1); $\alpha_{\text{зов.}}$ - зовнішній кут конусності кільцевого конусного інструменту (X_2); $d_{\text{отв.}}/D_3$ – відношення діаметра центрального отвору кільцевого конусного інструменту до діаметра заготовки (X_3); $h_{\text{впров.}}/H_3$ – відношення глибини впровадження кільцевого конусного інструменту до висоти заготовки (X_4). Для розв'язання поставленої задачі був складений план повного факторного експерименту з варіюванням 4-х факторів на 2-х рівнях.

При варіюванні діаметра центрального отвору кільцевого конусного інструменту ($d_{\text{отв.}}=15$ і 25мм) бралася відношення його величини до початкового діаметра заготовки ($D_3=40\text{мм}$), тобто $d_{\text{отв.}}/D_3 = 15/40$ ($0,375$); $25/40$ ($0,625$). Глибина впровадження кільцевого конусного інструменту $h_{\text{впров.}}$ приймалася $1/3$ і $2/3$ від початкової висоти заготовки H_3 , тобто відношення $h_{\text{впров.}}/H_3 = 0,333$; $0,666$ ($1/3$ і $2/3$).

Інтервали, у яких варіювалися досліджувані фактори, знаходилися у таких межах:

- внутрішній кут конусності кільцевого конусного інструменту, $\alpha_{\text{вн.}} = 2..6^\circ$;
- зовнішній кут конусності, $\alpha_{\text{зов.}} = 15..45^\circ$;
- відношення діаметра центрального отвору до діаметра заготовки, $d_{\text{отв.}}/D_3 = 0,375..0,625$;
- відношення глибини впровадження кільцевого конусного інструменту до висоти заготовки, $h_{\text{впров.}}/H_3 = 0,333..0,666$.

Інтервали, в яких варіювалися досліджувані фактори представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Матриця повного факторного експерименту (ПФЕ)

№	$X_1,$ $\alpha_{\text{вн.}}, ^\circ$	$X_2,$ $\alpha_{\text{зов.}}, ^\circ$	$X_3,$ $d_{\text{отв.}}/D_3$	$X_4,$ $h_{\text{впров.}}/H_3$
Верхній рівень	6	45	0,625	0,666
Нижній рівень	2	15	0,375	0,333
Нульовий рівень	4	30	0,5	0,499
Інтервал варіювання	2	15	0,125	0,166

Після складання плану повного факторного експерименту в лабораторії кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П. Національної металургійної академії України (м. Дніпропетровськ) було виконано експериментальне дослідження, що відповідало першій стадії операції осадки за запропонованою технологією. Ця стадія містила в собі впровадження у заготовку кільцевого конусного інструменту. Після проведення експерименту були отримані експериментальні зразки. Типова форма зразків (у поперечному перерізі), отриманих при впровадженні кільцевого конусного інструменту за різними схемами деформації, наведена на рис. 2.37.

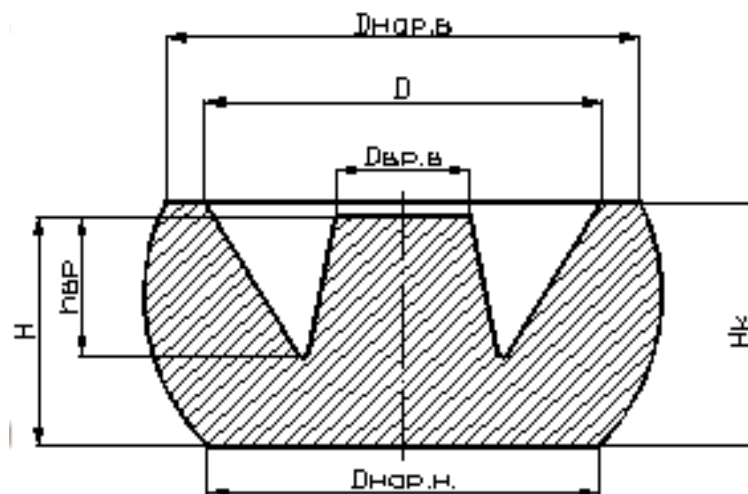


Рисунок 2.37 - Форма заготовки після впровадження кільцевого конусного інструменту

Вимірювання отриманих розмірів зразків виконувалося у 8-ми перерізах, крім діаметрів, які були визначені за результатами вимірів у 4-х перерізах (рис. 2.37). Після цього були отримані середні значення кожного з розмірів і середнє значення для досліду з урахуванням дублювання. Для аналізу формозміни заготовки становить інтерес побудова залежності зміни висоти заготовки в процесі деформації від зовнішнього кута конусності впроваджуваного кільця. Ці залежності представлені на рис. 3 і 4. Як параметр, що характеризує зміну висоти заготовки, обираємо відношення H_k до початкової висоти заготовки H_z .

На рис. 2.38 наведено криві при використанні інструменту з наступними геометричними розмірами: $d_{отв.}/D_3 = 0,375$, $\alpha_{вн.} = 6^\circ$. Крива 1 відповідає глибині впровадження кільцевого конусного інструменту на $1/3$ висоти заготовки H_z ; крива 2 - при впровадженні кільцевого конусного інструменту на $2/3$ висоти заготовки H_z . При аналізі кривої 1 можна відзначити, що при збільшенні зовнішнього кута конусності значення висотного показника H_k/H_z знижується; це, в свою чергу, свідчить про те, що зразок осаджується.

Хотілося б звернути увагу на криву 2. У цьому випадку при одній і тій же геометрії інструменту, але при збільшенні глибини впровадження кільцевого конусного інструменту, спостерігається більше значення зменшення висоти заготовки. Це свідчить про те, що при впровадженні кільцевого конусного інструменту схема деформації максимально наближається до операції осадки.

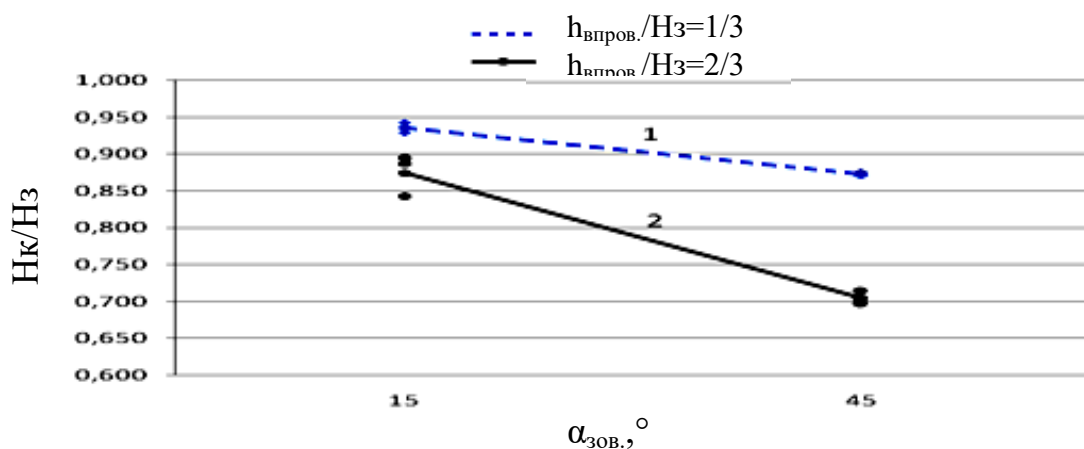


Рисунок 2.38 - Графіки залежності висотного показника H_k/H_z від зовнішнього кута конусності кільцевого конусного інструменту $\alpha_{зов.}$ ($d_{отв.}/D_3 = 0,375$, $\alpha_{вн.} = 6^\circ$)

На рис. 2.39 наведена залежність, аналогічна рис. 2.38, але в цьому випадку використовувався інструмент при $d_{\text{отв.}}/D_3 = 0,625$, $\alpha_{\text{вн.}} = 6^\circ$. При аналізі даних графіків можна відзначити, що зміна висоти заготовки при впровадженні кільцевого конусного інструменту практично ідентична зміні висоти заготовки у випадку, коли використовувався інструмент із $d_{\text{отв.}}/D_3 = 0,375$ (рис. 2.38). Однак при збільшенні відношення $d_{\text{отв.}}/D_3$ з 0,375 до 0,625 спостерігається більш значне зменшення висоти заготовки після впровадження кільцевого конусного інструменту. Так, при порівнянні рис. 2.38 і рис. 2.39 має місце відмінність кожного зі значень. Це свідчить про те, що більший об'єм металу потрапляє в порожнину центрального отвору кільцевого конусного інструменту, і це призводить до більш значного зменшення висоти заготовки.

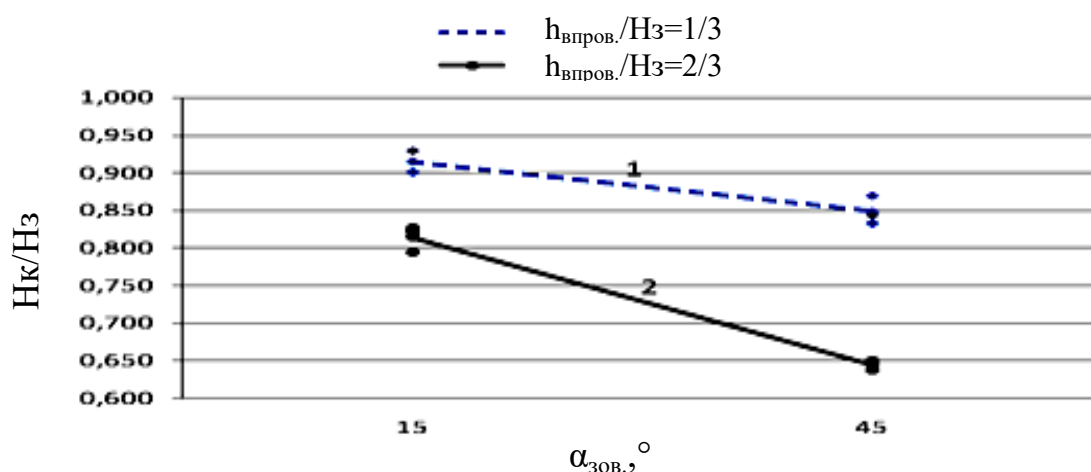


Рисунок 2.39 - Графіки залежності висотного показника H_k/H_3 від зовнішнього кута конусності кільцевого конусного інструменту $\alpha_{\text{зоб.}}$ ($d_{\text{отв.}}/D_3 = 0,625$, $\alpha_{\text{вн.}} = 6^\circ$)

Для аналізу формозміни заготовки становить інтерес побудова залежності зміни висоти уступу, що одержується в процесі деформації, від внутрішнього кута конусності впроваджуваного кільцевого конусного інструменту.

Після проведення ПФЕ та обмірювання отриманих зразків та аналізу графіків залежності впливу зовнішніх і внутрішніх кутів конусності технологічного кільцевого конусного інструменту були отримані рівняння

регресії в алгебраїчному та графічному вигляді. При проведенні експерименту однією з функцій відгуку був обраний параметр: $h_{\text{уст.}}$ - висота уступу.

$$Y = 11,713 - 0,542x_1 - 1,255x_2 + 1,3766x_3 - 3,144x_4 + 0,0923x_{13} + 0,1994x_{14} + 0,1411x_{23} + 0,1657x_{24} - 0,791x_{34} + 0,1184x_{234}, \quad (2.1)$$

де Y – рівняння регресії, що описує вплив факторів (x_i) на висоту уступу ($h_{\text{уст.}}$), що одержується після впровадження кільцевого конусного інструменту.

При аналізі рівняння (2.1) можна відзначити, що на висоту одержуваного уступу, що одержується найбільший вплив має глибина впровадження кільцевого конусного інструменту. При цьому глибина впровадження зменшує значення висоти одержуваного уступу, тобто при збільшенні глибини впровадження уступ більш інтенсивно осаджується, що приводить до зменшення його висоти. Так само приводить до зменшення висоти уступу, що одержується, збільшення внутрішнього кута конусності кільцевого конусного інструменту.

Хотілося б відзначити, що спільний вплив зовнішнього кута конусності і діаметра центрального отвору кільцевого конусного інструменту (це фактор з індексом x_{34}) зменшує значення висоти уступу, але в меншому ступені ніж зовнішній кут конусності кільцевого конусного інструменту. Інші фактори незначно або взагалі не впливають на висоту одержуваного уступу при впровадженні кільцевого конусного інструменту [88, 89]. Це видно з рівняння регресії (2.1).

РОЗДІЛ 3. ВИБІР МЕТОДІВ ТЕОРЕТИЧНОГО І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДИСКІВ З УСТУПАМИ

3.1. Вибір напрямку досліджень

Вітчизняне машинобудування, зокрема штампувальне виробництво, що не задовольняє деяким вимоги, що пред'являються до готової продукції. Це стосується широковживаних у всіх галузях промисловості холодноштампованих деталей з чорних і кольорових металів, що пов'язано з недостатньо високою якістю вихідних заготовок. Низька ефективність реалізованих технологічних процесів відбувається через фізичного і морального устарення обладнання. Для підвищення якості продукції існують різні технічні рішення. Одне з них придбання сучасного обладнання, але для цього необхідні високі матеріальні витрати. Цим шляхом не можуть піти багато підприємств в силу обмежених матеріальних ресурсів і оборотних коштів.

Більшість підприємств цікавлять пропозиції, які можна реалізувати з мінімальними витратами і в мінімально короткі терміни. У таких ситуаціях для кожного конкретного прийнятого рішення необхідна висока ступінь наукової обґрунтованості, для чого потрібне проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень. З метою підвищення ефективності даних досліджень вони повинні бути проведені не тільки для одного технологічного процесу і відповідного йому устаткування, але і для попереднього і подальшого процесів обробки.

Основні заходи, які можуть бути виконані для реалізації комплексного підходу стосовно до виробництва холодно штампованих деталей наступні:

- вдосконалення діючих технологій в напрямку підвищення якості холодноштампованих деталей при одночасній мінімізації питомих матеріальних та експлуатаційних витрат;

- виявлення технологічних можливостей і пред'явлення конкретних вимог до процесів та обладнання для холодного штампування деталей з фланцем;
- розробка науково обгрунтованих вимог щодо підвищення якості холодноштампованих деталей машин з точки зору подальшої термомеханічної обробки;
- докладний розгляд технологічних можливостей вже існуючого обладнання, в тому числі технологічних схем видавлювання, і розробка рекомендацій по діапазонах їх найбільш ефективного використання.

Для вирішення питань щодо розширення номенклатури, підвищення якості та зниження собівартості холодноштампованих виробів з наукової точки зору необхідно:

- забезпечити подальший розвиток уніфікованих методів дослідження для порівняльного аналізу різних технологічних і конструктивних схем, що підвищить ступінь наукової обгрунтованості отриманих результатів;
- уточнити вихідні дані, розширити і вдосконалити методи заліку як для збільшення обсягів наданої інформації, так і для підвищення ступеня її достовірності;
- розробити чисельні математичні моделі різного рівня складності, які будуть відрізнятися по точності наданої інформації, часу реалізації, трудомісткості, при цьому кожна з отриманих моделей буде використана для конкретного випадку;
- розробити рекомендації щодо вдосконалення технології стосовно до конкретного механічного обладнання;
- сформулювати і вирішити завдання з автоматизованого проектування технологічних режимів і механічного устаткування.

Проведення наукових досліджень часто пов'язано з трудомісткістю і великими термінами їх реалізації, для зниження зазначених показників доцільно застосовувати теоретичні методи аналізу, які засновані на розробці і чисельної реалізації математичних моделей, в достатній мірі повно відображають реальні фізичні процеси.

Застосування експериментів з отриманням математичних даних прийнятно ще на стадії проектування технології і обладнання. Їх використання дозволяє розширити обсяг інформації, диференційовано оцінити ступінь впливу кожного окремого конструктивного або технологічного параметра, визначити ряд локальних характеристик, а також комплексно оцінити основні показники якості готових виробів.

Деталі типу втулки і стрижні з фланцем на машинобудівних підприємствах складають велику частину номенклатури. Дані способи видавлювання досить широко відомі, але обмеженість в технологічних рекомендаціях щодо здійснення радіального видавлювання викликає ряд труднощів. Основні труднощі полягає в прогнозуванні різного виду дефектів.

Незважаючи на те, що радіальне видавлювання має безліч кінематичних схем видавлювання, дослідження цих схем практично не ведеться. Це обумовлено труднощами математичного моделювання технологічних режимів формозміни при радіальному видавлюванні. Рішення даного завдання нерозривно пов'язане з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень.

3.2. Вибір методів теоретичного аналізу процесу радіального видавлювання

Для вивчення силового, напруженого і деформованого стану процесів холодного пластичного деформування використовуються різні теоретичні і експериментально-аналітичні методи [42-52].

При дослідженні процесів холодної точної об'ємного штампування видавлюванням потрібна розробка математичних моделей, які дозволили б встановити характер запалення металом форми інструменту, встановити зусилля і тиску деформування, накопичену ступінь деформації, ресурс пластичності металу заготовки, навантаження на інструмент та ін. Удосконалення і розробка нових процесів точної об'ємного штампування

можливі на основі порівняння різних варіантів видавлювання, з відомими кінематичними та силовими режимами течії металу в залежності від геометрії інструменту та інших граничних умов і технологічних факторів.

Енергетичний метод

Одним з ефективних методів вирішення подібних завдань пластичного деформування є енергетичний метод (ЕМ) [53, 54, 55, 46-49, 56, 57].

Перевагою енергетичних методів балансу потужностей слід вважати їх наочність, гнучкість, оперативність, можливість ефективного застосування ЕОМ для вибору відповідних функцій і змінних параметрів, які описують кінематику течії [53, 55, 47-49 56-58]. Привабливою особливістю методу є те, що він дозволяє використовувати і досвідчені дані для уточнення граничних умов, кінематичних полів швидкостей, розмірів і форми зон інтенсивної деформації [48, 49, 57-59]. Ця властивість робить обґрунтованим застосування комплексного підходу до дослідження технологічних режимів процесів видавлювання, що включає проведення попередніх настановних експериментів, необхідних для отримання вихідних даних і розробки математичних моделей процесів деформування, адекватність яких згодом також перевіряється дослідним шляхом.

Згідно енергетичного методу в деформуємої заготовки виділяють ряд пластичних зон - кінематичних елементів. Для кожного елемента знаходять кінематично можливе поле швидкостей (КВПС) і на його основі повну потужність деформування, мінімізація якої дозволяє оптимізувати параметри процесу деформації і уточнити оцінки силового режиму і картин пластичної течії [48, 52].

Допущення, характерні для енергетичного методу:

- а) матеріал незміцнюваний, стискаємо, пружними деформаціями нехтують; б) матеріал ізотропний; в) швидкість руху інструменту постійна $V_0 = const$; г) напруги тертя на контакті постійні і наперед задані (за законом Зібеля).

Умови та обмеження, характерні для методу:

- а) умова нестискаємості (умова сталості обсягу);
 б) кінематичні граничні умови;
 в) умова суцільності матеріалу - умова нерозривності нормальних компонент швидкості течії.

Основне для ЕМ рівняння енергетичного балансу потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на КВПС пов'язує потужність зовнішніх активних сил $N_a = p \cdot F \cdot V_0$ з потужністю внутрішніх сил:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \sum N_{\partial i} + \sum N_{Tj} + \sum N_{ck}, \quad (3.1)$$

де $N_{\partial i}$ - потужність сил, затрачених на деформування;

N_{Tj} - потужність сил тертя;

N_{ck} - потужність сил зрізу.

$$p \cdot F \cdot V_0 = \iiint_V \sigma_s \dot{\epsilon}_i dV + \iint_{F_T} \tau_k [V_k] dF_T + \iint_{F_c} \tau_s [V_c] dF_c, \quad (3.2)$$

З рівняння енергетичного балансу потужностей, отримано значення тиску видавлювання p :

$$p = \frac{\sum N_{\partial i} + \sum N_{Tj} + \sum N_{ck}}{F \cdot V_0}, \quad (3.3)$$

для простоти розрахунків тиск видавлювання приведемо до безрозмірної величини, тобто до приведенного тиску \bar{p} :

$$\bar{p} = (p/2k) = (p/\sigma_s), \quad (3.4)$$

де σ_s - напруження течії матеріалу заготовки, МПа;

k - стала пластичності, МПа, $k = (\sigma_s/\sqrt{3})$.

Потужності, що входять в рівняння балансу (3.1) визначаються по інтегральним залежностям [54-57].

Потужність сил деформування $N_{\partial i}$:

$$N_{\partial i} = \iiint_{V_{\partial i}} \sigma_s \dot{\epsilon}_i dV_{\partial i}, \quad (3.5)$$

де σ_s – напруження течії, МПа;

$\dot{\epsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації;

$V_{\partial i}$ – об'єм пластичної зони;

$dV_{\partial i}$ – нескінченно малий об'єм деформування.

Для процесів осесиметричного деформування інтенсивність швидкості деформації визначається по залежності [54]:

$$\dot{\epsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{rz}^2 \right)}, \quad (3.6)$$

де $\dot{\epsilon}_z = (dV_z/dr)$, $\dot{\epsilon}_r = (dV_r/dr)$, $\dot{\epsilon}_\theta = (dV_\theta/dr)$,

$\dot{\gamma}_{rz} = (dV_r/dr) + (dV_z/dr)$ — малі відносні лінійні і кутові швидкості деформацій.

При цьому повинна виконуватися умова нестискаємості матеріалу:

$$3 \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta = 0, \quad (3.7)$$

Для спрощення розрахунків при визначенні потужності сил деформування виконують лінеаризацію інтенсивності швидкостей деформації $\dot{\epsilon}_i$. Якщо при вибраному розподілі швидкостей в пластичній зоні можливо встановити найбільшу із компонент швидкостей деформацій, то з певною похибкою можна використовувати лінеаризований вираз [54]:

$$\dot{\epsilon}_i = 1,08 \left| \dot{\epsilon}_{\max} \right|, \quad (3.8)$$

$\dot{\epsilon}_{\max}$ — максимальна по абсолютній величині компонента швидкості деформації.

Потужність сил зрізу N_{ck} :

$$N_{ck} = \iint_{F_c} \tau_s [V_c] dF_c, \quad (3.9)$$

де τ_s – напруження течії на зсув, МПа;

$$\tau_s = k = (\sigma_s / \sqrt{3}), \quad (3.10)$$

де $[V_C]$ – відносна швидкість зрізу на границі двох сусідніх зон (величина швидкості розриву);

F_C – площа поверхні зрізу;

dF_C – нескінченно мала площа зрізу.

Потужність сил тертя N_{Tj} :

$$N_{Tj} = \iint_{F_T} \tau_k [V_k] dF_T, \quad (3.11)$$

де τ_k – контактне напруження, МПа;

$$\tau_k = (2\sigma_s / \sqrt{3})\mu_s, \quad (3.12)$$

μ_s – коефіцієнт тертя Зібеля ($0 \leq \mu_s \leq 0,5$);

V_k – відносна швидкість руху заготовки вздовж контакту з інструментом;

F_k – площа контактної поверхні;

dF_k – нескінченно мала площа контакту.

Приведений тиск є критеріальною величиною, що дозволяє розрахувати незалежно від марки матеріалу для певної схеми деформації величину тиску деформування p і силу деформування P :

$$p = \bar{p} \cdot \sigma_s, \text{ (МПа);} \quad P = p \cdot F, \text{ (Н),} \quad (3.13)$$

де F – площа перерізу активного деформуючого інструменту [81].

Значення напруження течії матеріалу заготовки σ_s для врахування деформаційного зміцнення [46-48] можна отримати із діаграм зміцнення для матеріалів, що використовуються, в залежності від середнього ступеню деформації по Хіллу Р. [49, 57]:

$$\dot{\epsilon}_i = \bar{p}, \quad (3.14)$$

Підвищенню оперативності енергетичного методу, зниження трудомісткості обчислень технологічних режимів по зіставляється схемами або етапам деформування може служити модульний підхід, заснований на підборі і використанні уніфікованих кінематичних модулів (елементарних полів

швидкостей) [57, 60, 61] призначених для опису переважаючих схем деформацій в пластичних зонах .

Метод кінцевих елементів

Останнім часом все більшого поширення при моделюванні процесів обробки металів тиском отримує метод скінченних елементів (МСЕ) [62-74]. Цей метод дозволяє визначити різні технологічні параметри, володіє універсальністю. МСЕ знайшов широке застосування для вирішення різного роду завдань. Можливо вирішувати завдання по пружності і пластичного деформації і за визначенням міцності при деформації заготовок в штампах. МСЕ дає можливість визначення напружено-деформованого стану та теплового балансу в специфічних завданнях обробки металів тиском [62, 69].

КЕ заснований на варіаційному методі, особливість якого полягає в тому, що безперервні функції представляють у вигляді дискретних кусочно-лінійних функцій, що спрощує рішення задачі, таким чином, розширюючи можливості методу. Лінеаризація функцій дозволяє виробляти рішення складних процесів, які описуються складними інтегральними і диференціальними рівняннями [62, 69, 70].

МСЕ зарекомендував себе при вирішенні плоских, осесиметричних і об'ємних завдань пластичного деформування. Метод характеризується меншою кількістю припущень в порівнянні з іншими теоретичними методами, при цьому точність і достовірність результатів МСЕ наближаються до експериментальних даних.

В даний час для моделювання процесу видавлювання методом кінцевих елементів використовують як різні загальноінженерні пакети, так і програми, розроблені під реальну технологічну задачу.

Процеси пластичного деформування характеризуються великою величиною накопиченої деформації та значною неоднорідністю деформацій за обсягом заготівлі. Для нових схем комбінованого видавлювання характерна складність форми штампованих деталей і наявність двох і більше напрямків

закінчення металу. В таких умовах деформування елементи сильно стискаються або подовжуються, ставлення сторін вихідного квадратного елемента збільшується в кілька разів, а на перехідних поверхнях сітка відчуває велику і неоднорідну деформацію, що призводить до того, що чотирьох вузловий елемент, вироджується в багатокутник [70-77]. Ці особливості процесу вимагають застосування спеціалізованих програм.

Один з найбільш ефективних у цьому випадку є так зване адаптивне перебудування сітки з встановленим постійним характерним розміром елемента [73, 74].

Використання моделювання процесів об'ємного штампування за допомогою МСЕ є альтернативою експериментальному дослідженню і може бути досить ефективною при аналізі процесів холодного видавлювання і вирішенні поставлених завдань.

Для опису пружно-пластичного [69, 63, 64] поведінки ізотропних твердих тіл при навантаженні будемо використовувати варіаційне рівняння робіт засноване на принципі можливих переміщень

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\varepsilon} dV = \int_S F_i \delta u_i dS, \quad (3.15)$$

де $\bar{\sigma}$ – компоненти тензора напружень;

$\bar{\varepsilon}$ – компоненти тензора малих деформацій на крокові навантаження;

V – об'єм деформованого металу;

F_i – зовнішнє навантаження;

u_i – компонента переміщень по відповідним координатам;

δ – символ варіації;

S – площа поверхні металу.

При необхідності вирішення завдань методом кінцевих елементів з великими поворотами елементів, переміщеннями і пружно-пластичними деформаціями в наведених вище залежностях можливі похибки отриманих результатів, якщо при великих геометричних нелінійних мають місце великі

пластичні деформації. Крім неправильних результатів, рішення буде розходитися при ітераційне процесі при певній кількості кроків навантаження. В такому випадку використовуємо другий підхід визначення пружно-пластичного деформованого стану методом кінцевих елементів.

При кінцевих деформаціях принцип віртуальності робіт має вигляд

$$\int_V \bar{T} \delta \bar{I} dV = \int_S F_i \delta u_i dS, \quad (3.16)$$

Якщо розглядати деформування тіла (2.16) з часом, має:

$$\int_V \bar{T}(t + \Delta t) \delta \bar{I}(t + \Delta t) dV = \int_S F_i(t + \Delta t) \delta u_i(t + \Delta t) dS, \quad (3.17)$$

де \bar{T} – компоненти 2-го тензора напружень Піоли-Кірхгофа;

\bar{I} – компоненти тензора деформації Гріна-Лагранжа;

t – час деформування за певну кількість кроків навантаження;

Δt – прирощення часу за один крок.

Моделювання процесів холодного об'ємного штампування можливо з використанням універсальних загальноінженерних кінцево-елементних пакетів (ANSYS, ABAQUS, DEFORM, QFORM, LS-DYNA, ALGOR, MARC, DYNIFORM і тощо).

Всі згадані вище програми дозволяють вирішувати завдання кінцевого формозміни. Використовуючи пакети цих програм, можна поставити діагноз енергосилові параметри процесу, визначати розподіл деформацій і напружень по перерізу заготовки. Принцип роботи наступний, спочатку задається геометрія інструменту і заготовки, далі вибираються матеріали. Після описуються граничні умови у вигляді швидкостей і переміщень інструменту, температури заготовки, коефіцієнта тертя і тощо.

При використанні пакетів програм КЕ для моделювання процесів ХОШ, необхідні висококваліфіковані фахівці в області ХОШ для аналізу результатів розрахунків та напрямки визначення оптимальних параметрів технології або визначення доцільності використання технологічного процесу в цілому.

Для вирішення завдань холодного пластичного деформування були обрані програми ANSYS і QFORM-2D дозволяють вирішувати плоскі і осесиметричні задачі.

Побудова діаграм пластичності

Для прогнозування появи тріщин в процесі холодного видавлювання використовуються діаграми пластичності (залежність накопиченої деформації від показника виду напруженого стану).

При дослідженні схеми видавлювання вибирається точка в області передбачуваної появи тріщини і по ходу процесу знімаються показання у вигляді показника напруженого стану і ступеня деформації. Зародження тріщини передбачається при перетині шляху деформування з кривою пластичності для даного матеріалу [78-83].

Діаграму пластичності, яка є по суті однією з механічних характеристик матеріалу, будують в координатах - накопичена ступінь деформації до моменту руйнування (далі будемо називати її граничної деформацією) і показник напруженого стану [3, 13, 84, 85].

Дотримуючись визначень Ільюшина А. А. і Смірнова-Аляева Г. А., граничну деформацію визначають за формулою

$$\varepsilon_p = \int_0^{\tau_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (3.18)$$

де $\dot{\varepsilon}_u$ - інтенсивність швидкостей деформацій;

τ_p - час деформування до руйнування.

В останній час віддають перевагу показникам напруженого стану, в які входять інваріанти тензора напружень або їх функції.

Такими показниками є:

- показник С. І. Губкіна [86]:

$$\alpha_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{3} \tau_p} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3} \tau_u}, \quad (3.19)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження;

τ_u - інтенсивність дотичних напружень.

- показник Бабічкова В. А.:

$$\Pi = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{2} \sigma_u}, \quad (3.20)$$

- показник Колмогорова В. Л.:

$$K = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt[3]{I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3} \sigma_u}, \quad (3.21)$$

- показник Смірнова-Аляєва Г. А. [42]:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (3.22)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження;

σ_u - інтенсивність напружень.

Як правило, діаграми пластичності будують по результатам трьох видів випробувань: на стиск, зсув і розтяг.

При стискові $\eta = -1$, оскільки $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\sigma_{cm}$. Граничну деформацію розраховують по формулі:

$$\varepsilon_p = \ln(h_0/h) = 2\ln(d/d_0), \quad (3.23)$$

де h_0, h - висота циліндричного зразка до і після осадки;

d_0, d - діаметр циліндричного зразка до і після осадки.

При зсуві $\eta = 0$, оскільки $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$.

Граничну деформацію розраховують по формулі:

$$\varepsilon_p = \operatorname{tg} \gamma / \sqrt{3}, \quad (3.24)$$

де γ - кут, який вимірюють між повздовжньою рисою нанесеною до лінії експериментальної залежності і дотичною проведеною до неї після дослідження в районі злому.

При розтягові $\eta = 1$, оскільки $\sigma_1 = -\sigma_{cm}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Граничну деформацію розраховують по формулі:

$$\varepsilon_p = 2 \ln(d_0/d_{uu}), \quad (3.25)$$

де d_0 - діаметр робочої частини зразка;

d_{uu} - діаметр шийки розірваного зразка.

При розтягові зразків із матеріалів, руйнуванню яких передують утворення шийки, показник η розраховують по формулі Давиденкова Н. Н. і Спірідонова Н. І. [87]:

$$\eta = 1 + (3d_{uu}/4R), \quad (3.26)$$

де d_{uu} - діаметр поперечного перерізу зразка в шийці;

R - поточний радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка.

Можливий також розрахунок показника напруженого стану по формулі, отриманій Бріджменом П.:

$$\eta = 1 + 3 \ln[1 + (d_{uu}/4R)], \quad (3.27)$$

Апроксимації діаграм пластичності, отримані в результаті випробувань зразків на стиск, кручення і розтяг, представлені в роботах [55, 6]. Огородніковим В. А. для апроксимації діаграм пластичності в роботах [6, 14, 15] були введені коефіцієнти чуттєвості показника напруженого стану до схеми напруженого стану. Згідно апроксимації Огороднікова В. А.:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_p(\eta = 0) \exp(-\lambda_i \eta), \quad (3.28)$$

де $\varepsilon_p(\eta = 0)$ - гранична деформація при зсуві (крученні).

λ_i - відповідно:

$$\lambda_1 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta=0)}{\varepsilon_p(\eta=1)}, \quad (3.29)$$

Коефіцієнт чуттєвості пластичності до зміни схеми напруженого стану в області показника $0 \leq \eta \leq 1$.

$$\lambda_2 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta=-1)}{\varepsilon_p(\eta=0)}, \quad (3.30)$$

Коефіцієнт чуттєвості пластичності до зміни схеми напруженого стану в області показника $-1 \leq \eta \leq 0$;

Як було вказано в роботах [6, 14, 15, 87] в області зміни $0 \leq \eta \leq 1$ спостерігається аномальне підвищення граничної деформації обумовлене її локалізацією. Тому розрахунок показника напруженого стану η і граничної деформації ε_p вимагають уточнень.

По даній методиці була побудована діаграма пластичності для матеріалу АМцМ [52], представлена на рис. 3.1.

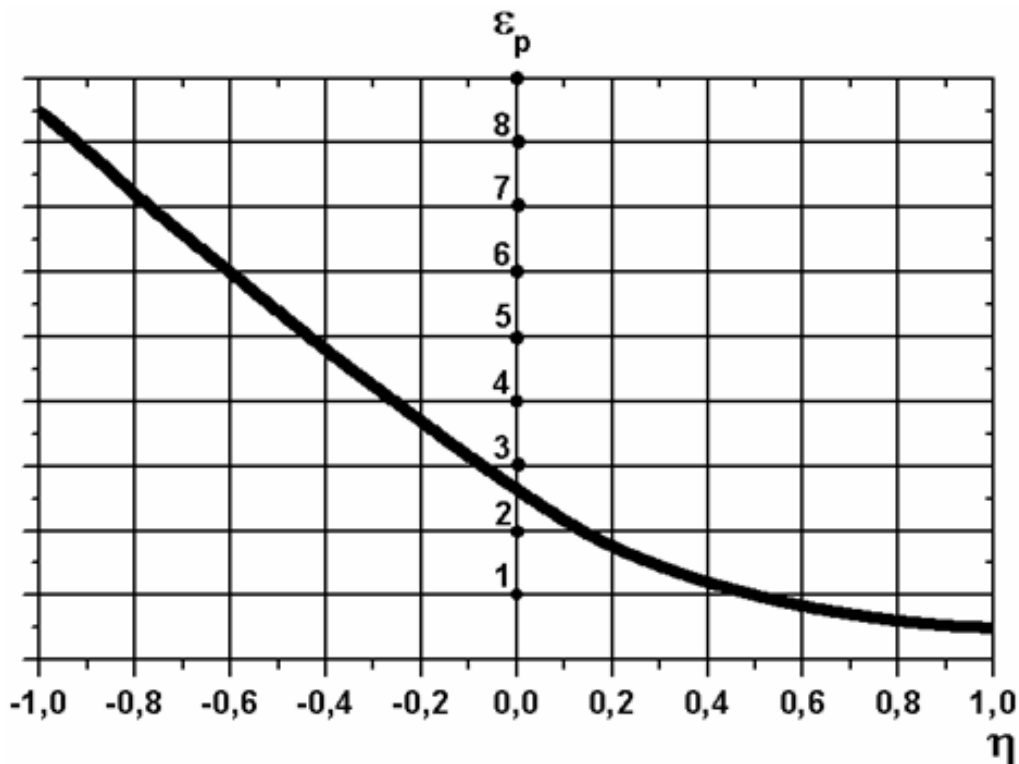


Рис. 3.1 Діаграма пластичності матеріалу АМцМ

3.3. Вибір методів експериментальних досліджень

Для вирішення поставлених завдань у ході експериментального дослідження необхідно забезпечити досить широке варіювання технологічних параметрів процесу поперечного видавлювання.

Параметри силових режимів процесів і величини цих параметрів, що виникають при видавлюванні, є функціями безлічі чинників, з яких найбільш важливими є геометричні співвідношення виробів і кінематичні умови перебігу металу.

У таблиці 3.1 наведені значення основних геометричних параметрів, що впливають на процес деформування.

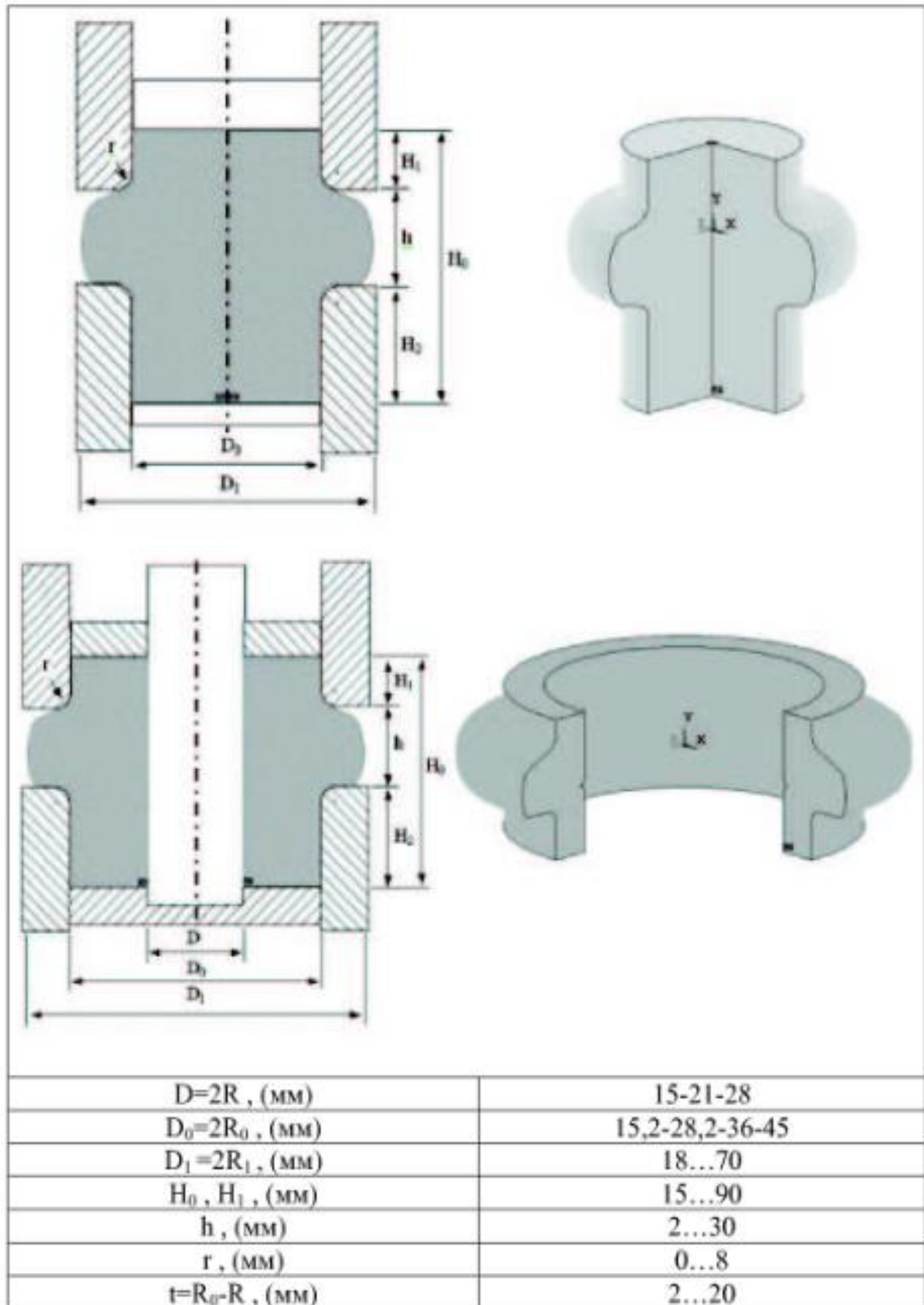
Істотним фактором, який впливає на енергосилові і якісні показники процесу, є кінематична схема деформування.

Для експериментального дослідження силового режиму і формозміни заготовок при дослідженні радіального видавлювання часто використовуються зразки з наступних матеріалів: АД1, АД31, АД33М, АМцМ, М1, М3, АМг6, Армко, Сталь 10, характеристики яких наведені в таблиці 3.2. Для даних дослідження приміняю наступні матеріали: АД1, АМцМ, М1, АМг6.

А також для обліку зміцнення матеріалу використовувалися криві справжніх напруг. Криві зміцнення (рис. 3.2) для матеріалів зазначених в таблиці 3.2 будували за результатами опаді 10 зразків з торцевими виточками, наповненими мастилом.

В якості технологічних мастил використовували: індустриальне масло - для свинцю; баранячий жир - для алюмінієвих сплавів; суміш воску з мінеральним маслом - для міді і фосфатування з подальшим омилюванням - для сталі.

Значення основних геометричних параметрів в процесі радіального видавлювання



Залежності істинних напружень текучості від ступеню деформації

Матеріал	Вид аппроксимирующей зависимости $\sigma_s(\varepsilon) = C\varepsilon^n$
АДІ	$\sigma_s(\varepsilon) = 141,9 \varepsilon^{0,26}$
АМцМ	$\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \varepsilon^{0,15}$
АДЗІ	$\sigma_s(\varepsilon) = 247\varepsilon^{0,14}$
Л70	$\sigma_s(\varepsilon) = 640 \varepsilon^{0,24}$
М1	$\sigma_s(\varepsilon) = 397,3 \varepsilon^{0,2}$
М3	$\sigma_s(\varepsilon) = 409,6 \varepsilon^{0,21}$
АМг6	$\sigma_s(\varepsilon) = 542 \varepsilon^{0,28}$
Армко	$\sigma_s(\varepsilon) = 631 \varepsilon^{0,22}$
Сталь 10	$\sigma_s(\varepsilon) = 787 \varepsilon^{0,22}$

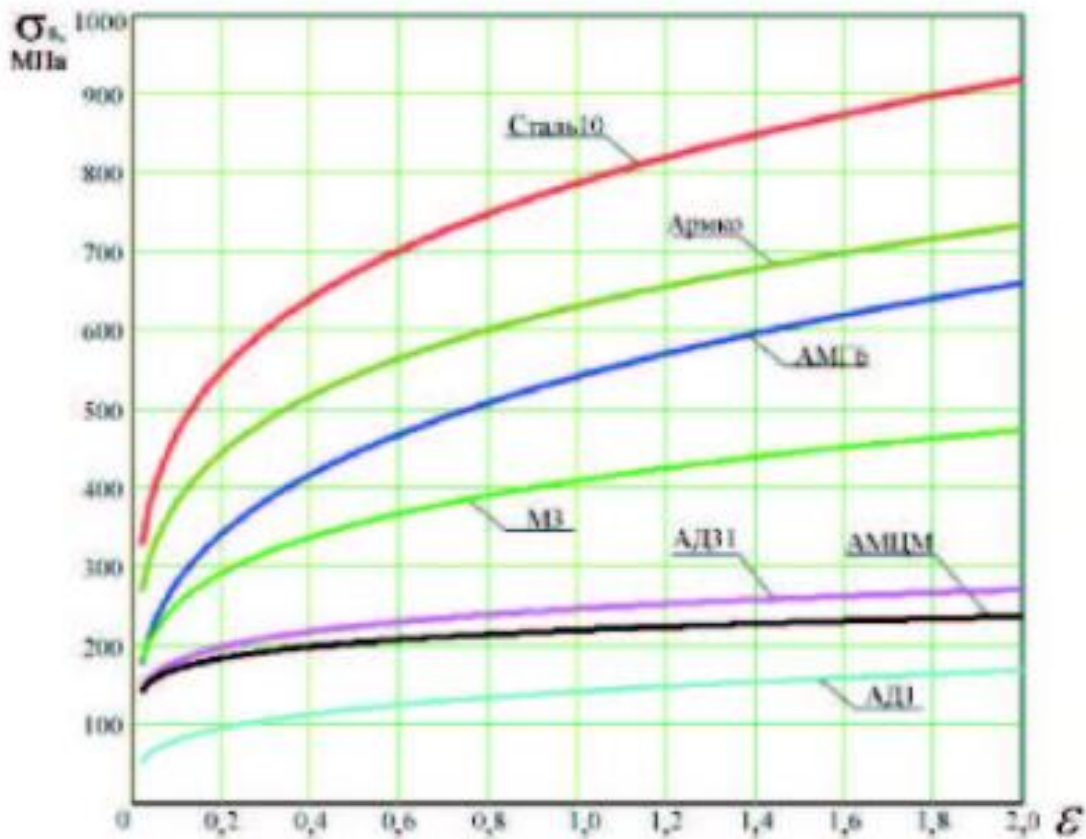


Рисунок 3.2 – Діаграми істинних напружень текучості матеріалів

Деформований стан заготовок, форму і межі вогнища пластичної деформації, характер перебігу металу вивчали за допомогою таких експериментальних методів, як метод координатних сіток і метод вимірювання твердості

Метод ділільних сіток

В даний час найбільш ефективно застосовується метод ділільних (координатних) сіток для вивчення напружено-деформованого стану як на поверхні, так і у внутрішніх шарах заготовок. У роботах експериментально отримані реальні картини перебігу.

При досить маленькій базі первісна квадратна осередок сітки приймає форму паралелограма (рис. 3.3).

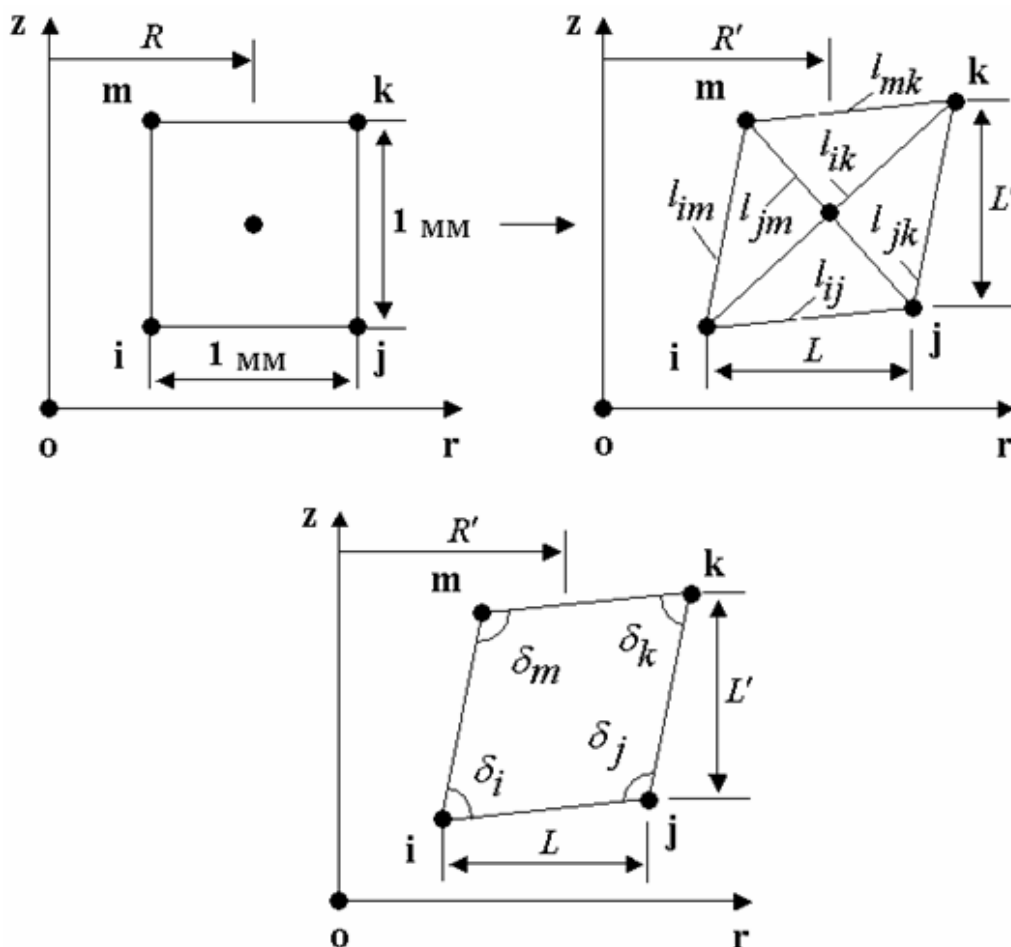


Рис. 3.3. Комірка ділільної сітки до і після деформування

У роботах представлений загальні формули головних логарифмічних деформацій і інтенсивності деформацій для випадку, коли початкова група з деформування має форму паралелограма, що особливо важливо при поетапному дослідженні процесів складного формоутворення

При позначеннях показаних на рис. 3.3 головні логарифмічні деформації запропоновано визначати наступним чином (табл. 3.3).

Метод ділільних сіток буде нами використаний для визначення деформованого стану та оцінки використаного ресурсу пластичності при радіальному видавлюванні деталей з фланцем.

Таблиця 3.3

Формули для розрахунку логарифмічних деформацій

Расчитываемые параметры	Расчётное выражение
1	2
Размеры искаженной ячейки	$R' = \frac{r_i + r_j + r_m + r_k}{4}, L = \frac{r_k - r_m + r_j - r_i}{2}$ $L' = \frac{z_m - z_i + z_k - z_j}{2}, l_{ij} = \sqrt{(z_j - z_i)^2 + (r_j - r_i)^2}$ $l_{mk} = \sqrt{(z_k - z_m)^2 + (r_k - r_m)^2}$ $l_{im} = \sqrt{(z_m - z_i)^2 + (r_m - r_i)^2}$ $l_{jk} = \sqrt{(z_k - z_j)^2 + (r_k - r_j)^2}$ $l_{jm} = \sqrt{(z_m - z_j)^2 + (r_m - r_j)^2}$ $l_{ik} = \sqrt{(z_k - z_i)^2 + (r_k - r_i)^2}$
Значение углов элементарной ячейки	$\delta_i = \arccos \frac{l_{ij}^2 + l_{im}^2 - l_{jm}^2}{2l_{ij}l_{im}}, \delta_j = \arccos \frac{l_{ij}^2 + l_{jk}^2 - l_{ik}^2}{2l_{ij}l_{jk}}$ $\delta_m = \arccos \frac{l_{mk}^2 + l_{im}^2 - l_{ik}^2}{2l_{mk}l_{im}}, \delta_k = \arccos \frac{l_{mk}^2 + l_{jk}^2 - l_{jm}^2}{2l_{mk}l_{jk}}$
Усредненная сдвиговая деформация	$\gamma_{rz} = \tan 0,5\alpha$ $\alpha = \sqrt{(1,57 - \delta_i)^2 + (1,57 - \delta_j)^2 + (1,57 - \delta_m)^2 + (1,57 - \delta_k)^2}$
Компоненты деформации	$\varepsilon_r = \ln L, \varepsilon_z = \ln L', \varepsilon'_\theta = \ln \frac{R'}{R}$
Окружная деформация из условия несжимаемости	$\varepsilon_\theta = -(\varepsilon_r + \varepsilon_z), n = \frac{\varepsilon'_\theta - \varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta} 100\%$
Интенсивность деформации	$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2 + 1,5\gamma_{rz}^2}$

Метод твердості

Однією з найбільш поширених характеристик, що визначають якість металів і сплавів і можливість їх застосування в різних конструкціях і при різних умовах роботи, є твердість. Випробування на твердість виробляються частіше, ніж визначення інших механічних характеристик металів: міцності, відносного подовження і ін.

Твердістю матеріалу називають здатність чинити опір механічному проникненню в його поверхневий шар іншого твердого тіла. Для визначення твердості в поверхню матеріалу з певною силою вдавлюють тіло (індентор), виконане у вигляді сталевий кульки, алмазного конуса, піраміди або голки. За розмірами одержуваного на поверхні відбитка судять про твердість матеріалу. Залежно від способу вимірювання твердості матеріалу, кількісно її характеризують числом твердості по Бринелю (HB), Роквеллу (HRC) або Віккерсу (HV).

Твердість по Віккерсу (HV) [126] розраховують за формулою:

$$HV = [(2P \sin \frac{\alpha}{2}) / d^2] = 1,854(P/d^2), \quad (3.31)$$

де P - навантаження;

α - кут між протилежними гранями вершини піраміди, рівний 136° ;

d - середнє арифметичне значення довжин двох діагоналей відбитку після зняття навантаження.

Для визначення твердості по Віккерсу беруть середнє арифметичне значення довжин двох діагоналей (рис. 3.4).

Твердість, як властивість матеріалу, при дослідженні пластичної деформації нас не цікавить, вона зіграє роль проміжного параметра, який відразу ж виключається за допомогою тарувального графіка (рис.3.5).

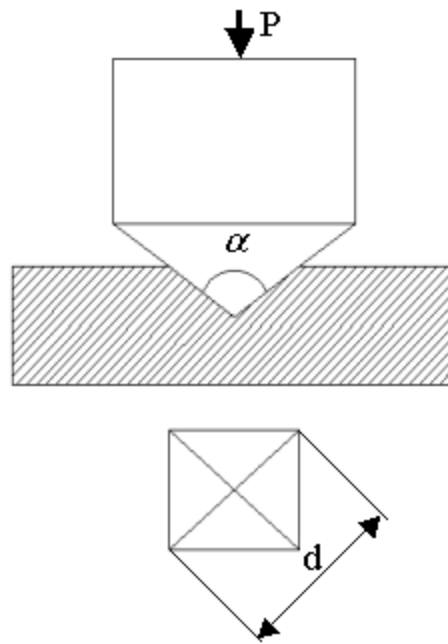


Рис. 3.4. Схема до розрахунку твердості по Віккерсу

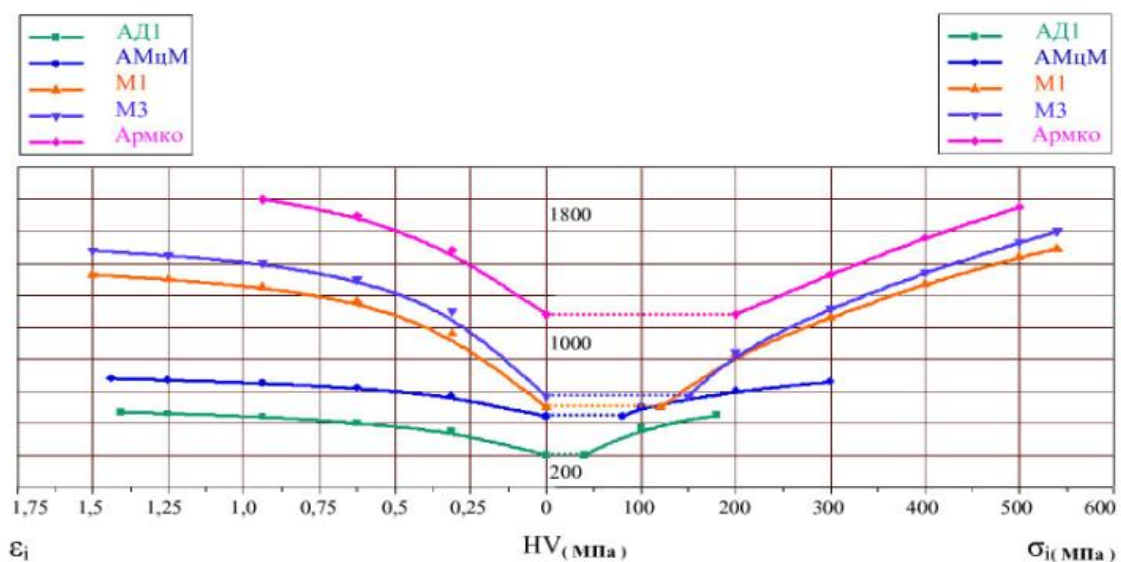


Рисунок 3.5 – Графіки “ ϵ_i -HV” для вказаних матеріалів

Напружений стан заготовок досліджували за допомогою комбінованого експериментально-аналітичного методу, що поєднує в собі метод вимірювання твердості з методом відновлення. Дель Г.Д. [8, 56] і Огородніков В.А. [6, 14, 15] показали, що визначення напружень по деформованому стану і розподілу твердості має низку переваг в порівнянні з відомими методами. Застосування методу відновлення виявляється надзвичайно ефективним при складному навантаженні (радіальному видавлюванні), коли необхідні дані слід визначати з

співвідношень теорії течії, а припущення про єдину кривої течії стає не виправданим.

У результаті аналізу літературних джерел і відповідно до результатів експериментальних досліджень, при комбінованому видавлюванні стрижневих деталей із фланцем на різних стадіях процесу виявлено наявності таких схем осередків деформації: об'єднаних, роз'єднаних і приєднаних осередків деформації.

Для теоретичного аналізу використаний енергетичний метод, заснований на балансі потужностей зовнішніх і внутрішніх сил на кінематичне можливих полях швидкостей. Даний метод досить оперативний і добре адаптований до сучасних ПЕОМ.

В основу експериментальних досліджень покладений метод тензометрії. Аналіз деформованого стану здійснювався за допомогою методу ділильних сіток. Планування експериментів, обробка дослідних даних і розробка емпіричних моделей здійснювалися на основі методів математичної статистики.

3.4. Теоретичні дослідження процесу гарячої пластичної деформації заготовки при впровадженні кільцевого конусного інструменту з подальшою осадкою в підкладному кільці

Для подальшого теоретичного дослідження формозміни металу було обрано програму комп'ютерного моделювання «Forge3».

Опис моделі процесу формозміни при моделюванні поставленої задачі: використовується закон тертя Амонтона; приймається теорія пластичного плину нестисливих середовищ Сен-Венана - Леві - Мізеса; задача вважається тривимірною. У програмі використовуються скінчені елементи у вигляді тетраєдрів з лінійною апроксимацією середнього напруження і частково-лінійною апроксимацією швидкості (по кутових вузлах елемента та вузла в центрі ваги елемента).

Як вихідні дані були обрані такі показники: температура нагрівання заготовки: $T=1200^{\circ}\text{C}$; температура інструменту: $T=50^{\circ}\text{C}$; розміри заготовки: $D_3=400\text{мм}$, $H_3=400\text{мм}$; швидкість опускання інструменту: $V=60\text{ мм/с}$; марка сталі заготовки: Ст45.

На рис. 3.6 представлено результати математичного моделювання першої стадії деформації зразка кільцевим конусним інструментом зі вказаною геометричною формою ($\alpha_{\text{вн.}} = 6^{\circ}$; $\alpha_{\text{зов.}} = 45^{\circ}$; $d_{\text{отв.}}/D_3 = 0,625$; $h_{\text{впроб.}}/H_3 = 0,666$), яке дає можливість оцінити температурні та деформаційні схеми розподілу в поперечному перерізі зразка.

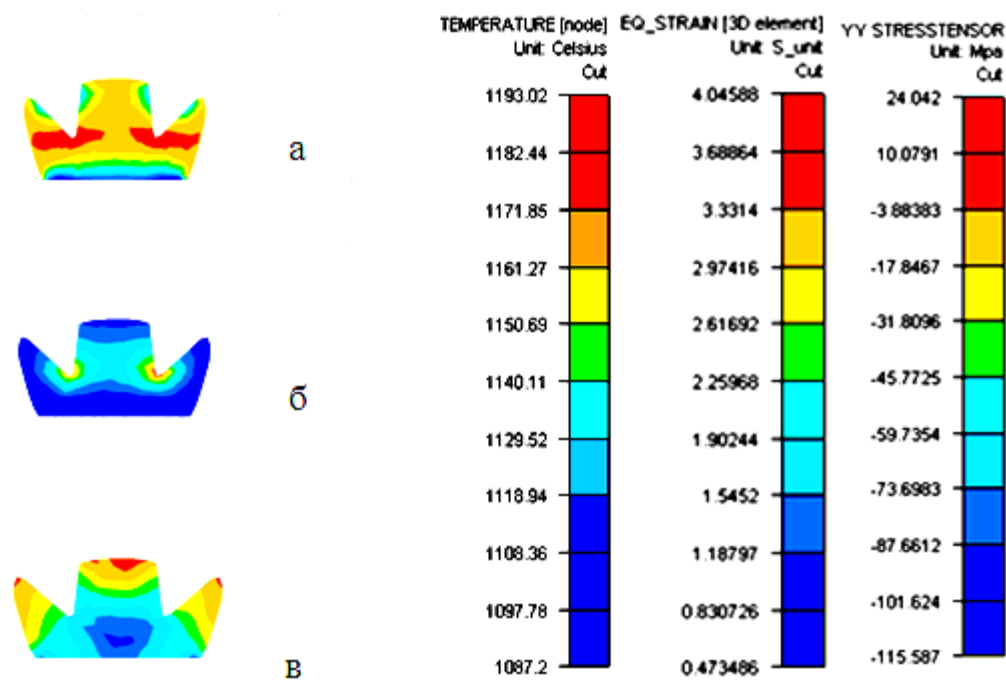


Рисунок 3.6 - Результати математичного моделювання після впровадження кільцевого конусного інструменту:

а - розподіл температури; б - розподіл деформації; в - розподіл напружень

При аналізі рис. 3.7 можна сказати, що візуально спостерігається дуже велика подібність поперечного перерізу зразків, отриманих у результаті математичного моделювання, з поперечним перерізом експериментально отриманих зразків. Це, в свою чергу, підтверджує правильність вибору граничних умов при моделюванні і так само підтверджує адекватність використовуваного програмного забезпечення.



Рисунок 3.7 - Порівняння геометрії отриманих зразків після 1-ої стадії:

а - вид зразка, отриманого математичним моделюванням;

б - експериментально отриманий зразок

При моделюванні другої стадії (представлене на рис. 3.8) граничні умови вводилися тільки для інструменту, це: температура інструменту, коефіцієнт тертя та умови теплообміну заготовки та інструменту.



Рисунок 3.8 - Порівняння геометрії отриманих зразків після 2-ої стадії:

а - вид зразка, отриманого математичним моделюванням; б - експериментально отриманий зразок

Що стосується заготовки, то всі її характеристики були перенесені після першої стадії за допомогою функції імпорту сітки. При використанні цієї функції заготовка переноситься з усіма змінами в результаті першого моделювання; це - перенесення сітки, значення температури, деформації, напружень і т.д.

На рис. 3.9 представлені результати математичного моделювання другої стадії технології, що полягає в осадці отриманої заготовки в підкладному кільці. Отримані дані дають так само можливість оцінити розподіл температури і деформації в поперечному перерізі зразка.

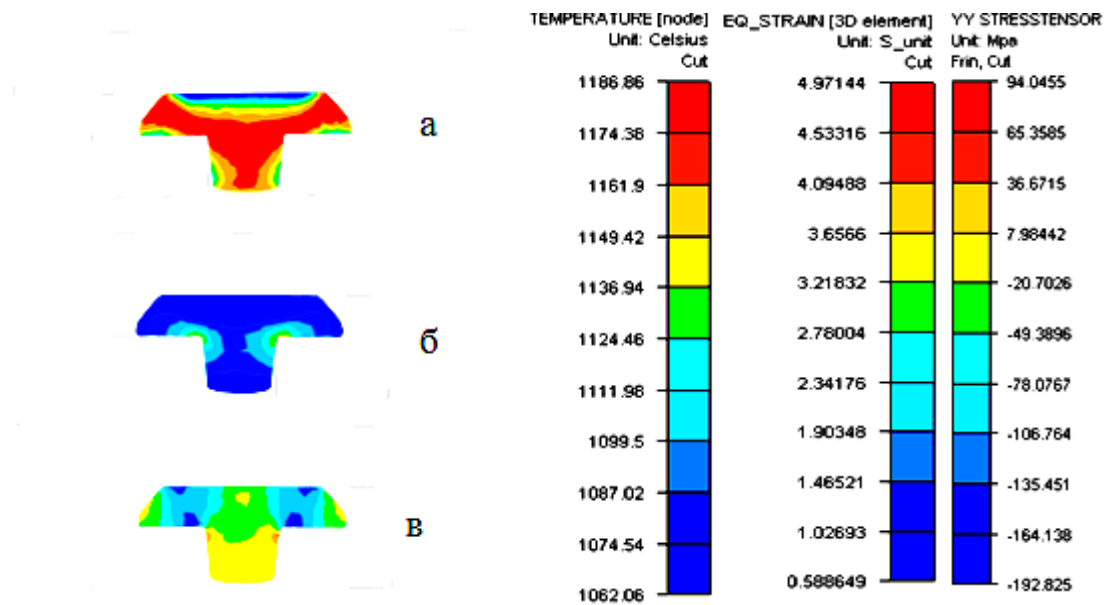


Рисунок 3.9 - Результати математичного моделювання осадки у підкладному кільці:

а - розподіл температури; б - розподіл деформації; в - розподіл напружень

При порівнянні результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень видно, що вони практично ідентичні (рис. 8). Це дозволяє стверджувати, що результати досліджень відповідають дійсності, а також підтверджує правильність вибору граничних умов при математичному моделюванні [89, 90].

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РАДІАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

Мета експериментального дослідження полягає у вивченні силового режиму радіального видавлювання, перевірки адекватності математичних моделей, розрахункових залежностей, отриманих в результаті теоретичного аналізу, визначенні формозміни і напружено - деформованого стану при радіальному видавлюванні.

4.1 Дослідження силового режиму процесу радіального видавлювання

У процесах холодного об'ємного штампування для всіх матеріалів, в тій чи іншій мірі, спостерігається ефект зміцнення, який в значній мірі впливає на зусилля деформування. Для обліку зміцнення деформованого матеріалу в процесі радіального видавлювання потрібні експериментальні дослідження середньої інтенсивності деформацій і опору деформації.

Для визначення наведеного тиску і середньої інтегральної оцінки ступеня деформації, при радіальному видавлюванні, необхідно провести серію дослідів з використанням методики статистичної обробки даних і планування експерименту з варіюванням як геометричних параметрів процесу, так і механічних властивостей матеріалів. На підставі теоретичних досліджень, робимо припущення, про те, що залежність наведеного тиску від геометричних параметрів процесу має нелінійну залежність.

При радіальному видавлюванні порожнистих і суцільних деталей сили деформування по ходу пунсона безперервно зростають. Типові діаграми «Зусилля P - Шлях S » наведені на рис. 4.1, 4.2.

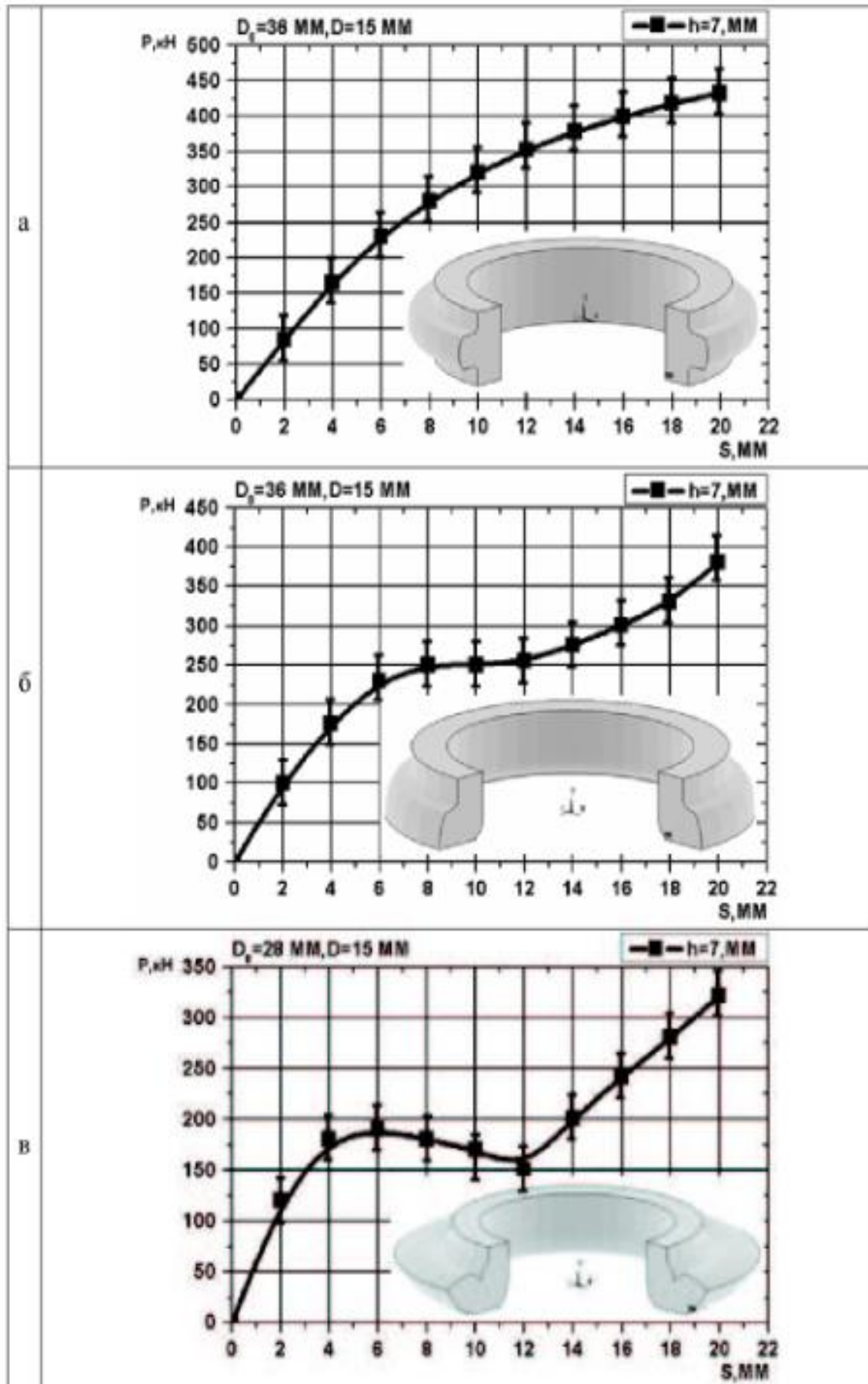


Рисунок 4.1 – Діаграми «зусилля-шлях» для схем радіального видавлювання порожнистих заготовок із матеріалу АМцМ

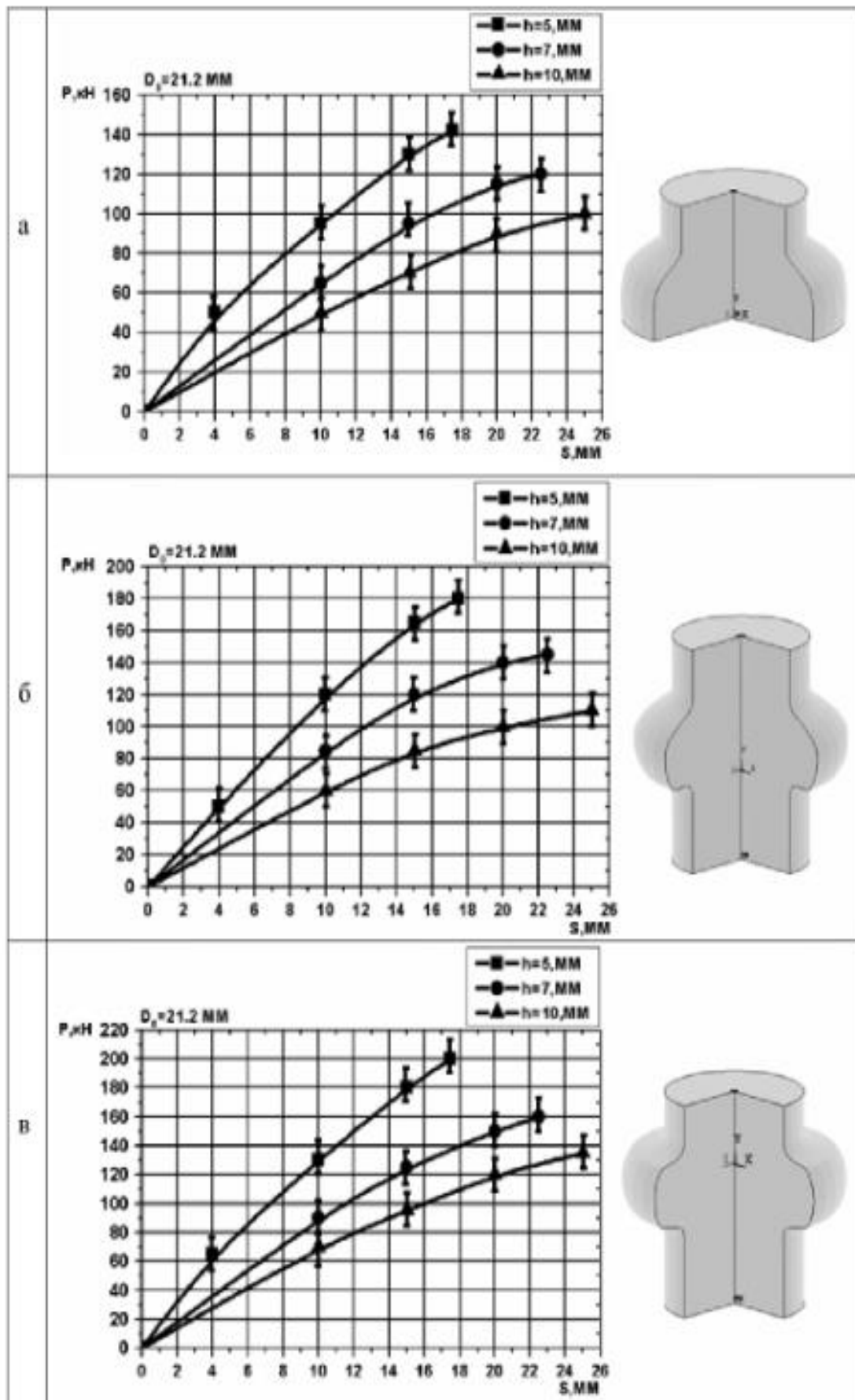


Рисунок 4.2 – Типові діаграми «зусилля-шлях» для схем радіального видавлювання суцільних заготовок із матеріалу АД1

Інтенсивне зростання зусиль характерне для початкової та заключної стадії. При зменшенні висоти кругової порожнини потрібні зусилля видавлювання помітно зростають, що пояснюється збільшенням ступеня деформації.

Характерною особливістю процесів формозміни порожнистих деталей, є наявність на кривій «Р - S» пологої початкової ділянки, що відповідає моменту роздачі отвору з торця, на якому формується фланець.

При видавлюванні фланців (потовщень), розташованих на торці або в середній по висоті частини порожнистої заготовки, характер зміни питомих зусиль перевіряли на процесі радіального видавлювання заготовки з односторонньою подачею з алюмінієвого сплаву АМцМ з зовнішнім діаметром $2R_0 = 36$ (рис. 4.1). При цьому діаграми «а, б» отримані для заготовок з внутрішнім діаметром $2R = 15$, а діаграма «в» з діаметром $2R_0 = 28$ (рис 4.1). Різниця, що спостерігається при видавлюванні фланців і потовщень (див. рис. 4.1) в діаграмі «Р - S», пояснюється незаповненням в початковій стадії процесу кутової зони фланця через роздачу отвору заготовки. З розвитком процесу утяжини надалі усуваються або знижуються через підпір з боку утвореного фланця, що призводить до зближення кривих. Крива β має западину, яка обумовлена значним просторовим виворотом заготовки при видавлюванні в радіальну порожнину, що має висоту ($h = 7$ мм), що перевищує товщину стінки вихідної трубчастої заготовки більш ніж в 1,5 ... 2 рази в умовах мінімального тертя на поверхні контакту торця заготовки з напівматрицею.

Істотний вплив на значення зусиль деформування надає схема видавлювання і форма одержуваних деталей. На рис. 4.2 представлені криві «Р - S», при формоутворенні фланців на кінці суцільної заготовки і при видавлюванні потовщень (розташованих в середній частині) з односторонньою (рис. 4.2 - а, б) і двосторонньою (рис. 4.2 - в) подачею металу в порожнину. При однакових геометричних параметрах найменші питомі зусилля потрібні для видавлювання фланців (зниження значення зусилля в порівнянні з

одностороннім деформуванням становить 20 ... 30%) на кінці суцільної заготовки. Видавлювання з двосторонньою подачею вимагає менших (на 15 ... 25%) значень питомих зусиль деформування, ніж при односторонній подачі. Ця перевага в полегшенні силового режиму є наслідком зниження нерівномірності деформацій і скорочення поверхні контакту металу з інструментом, зниження градієнта деформацій і градієнта осередку деформації та сприяє підвищенню стійкості штампового інструменту, що дуже важливо при холодному деформуванні.

Запис зусиль деформування по ходу переміщення пуансона тензометричним методом дозволяє встановити залежність силових параметрів від факторів, що впливають на будь-якій стадії процесів.

Розрахункові значення сил деформування перевищують експериментальні в середньому на 10 ... 15%, як показано на рис. 4.3, 4.4.

Дослідження зусиль виштовхування при поперечному видавлюванні показали, що при традиційно використовуваних мастилах величини цих зусиль незначні і не перевищують 10 ... 15% від значень зусиль видавлювання.

Найбільш важливим технологічним фактором, що впливає на зусилля і тиск радіального видавлювання, є висота порожнини або товщина фланця h . Чим тонше видавлюється фланець, тим вище потрібно зусилля, оскільки вище ступінь деформації металу.

При радіальному видавлюванні фланців в роз'ємних матрицях спостерігається такий негативний ефект як розкриття матриці. Цей ефект зменшує точність висотних розмірів видавлюваних фланців. Боротися з цим ефектом можна додаванням до матриць зусилля по величині більшого, ніж зусилля розкриття. Саме тому важливим є знання величини зусилля розкриття.

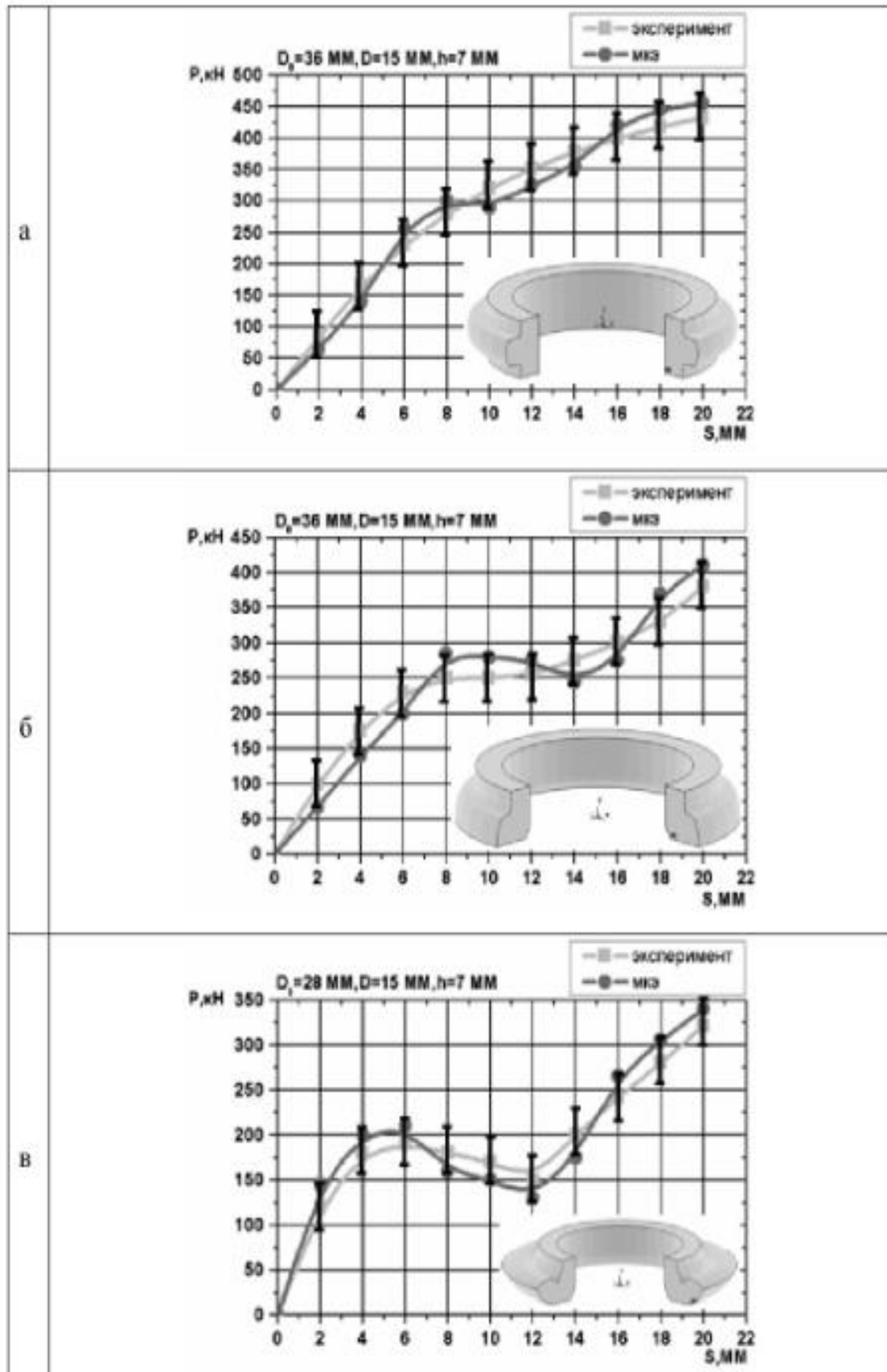


Рисунок 4.3 – Порівняння теоретичних і експериментальних значень питомих зусиль видавлювання для схем радіального видавлювання порожнистих заготовок з односторонньою подачею із матеріалу АМцМ

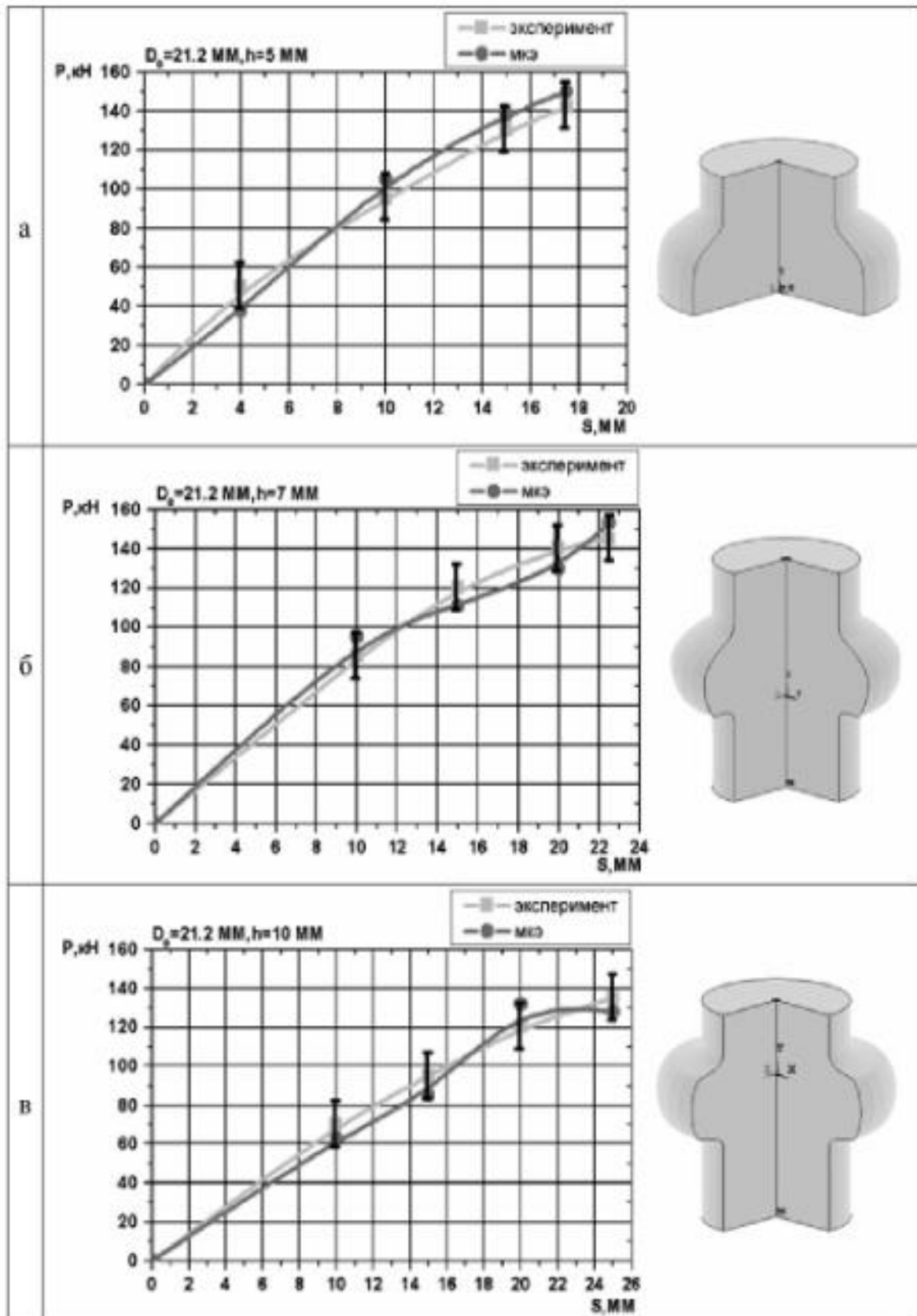


Рисунок 4.4 – Порівняння теоретичних і експериментальних значень питомих зусиль видавлювання для схем радіального видавлювання суцільних заготовок з односторонньою (а-б) і двохсторонньою (в) подачею металу із матеріалу АД1

Були проведені експериментальні дослідження по виявленню зусилля розкриття в процесі радіального видавлювання фланця на стрижні. Побудований графік залежності зусилля розкриття від ходу повзуна преса з нанесеним на нього експериментальними і теоретично отриманими значеннями зусиль рис.4.5.

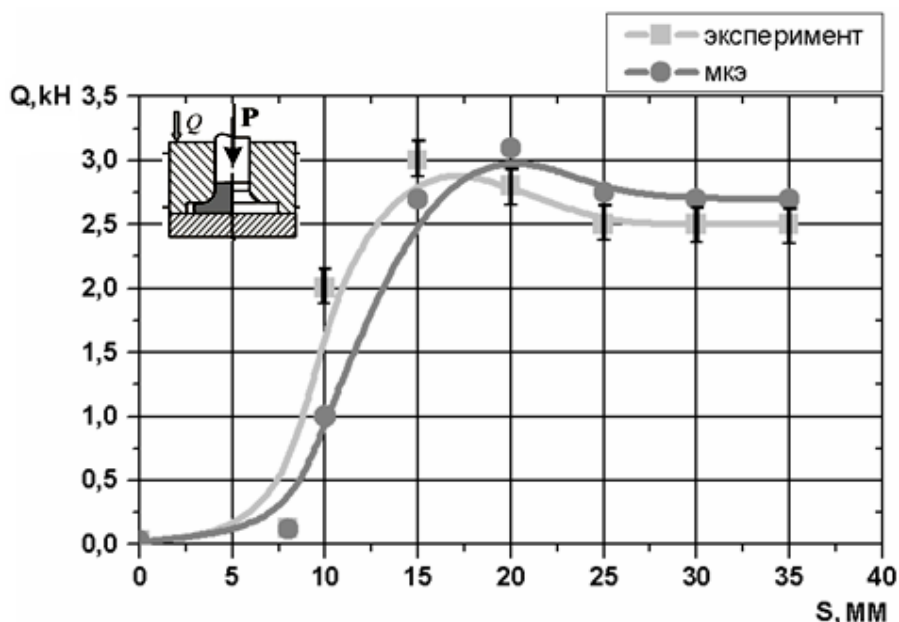


Рисунок 4.5 - Графік залежності зусилля розкриття від ходу повзуна преса,
(Матеріал: С1)

З графіка видно, що на початковому етапі видавлювання зусилля розкриття дорівнює нулю. Ця стадія характеризує початок видавлювання фланця. При зростанні діаметра видавленого фланця зусилля розкриття різко зростає.

Теоретично визначені значення зусилля розкриття повністю повторюють характер кривої зусилля-хід. Відхилення величин зусиль становить в межах 10 ... 15%.

4.2. Удосконалення технологічного процесу виготовлення дисків з уступами

При використанні кільцевого конусного інструменту можливо одержувати поковки, у яких відношення висоти уступу до висоти одержуваної поковки $h_{уст}/H_k$ перебуває в інтервалі 0,17-0,6, а відношення верхнього до нижнього діаметра полотна диска $D_{осн.в.}/D_{осн.н}$ перебуває в інтервалі 1,0-1,27. Основний вплив на значення верхнього діаметра полотна диска має зовнішній кут конусності кільцевого конусного інструменту. При цьому зовнішній кут конусності кільцевого конусного інструменту забезпечує формування об'єму металу для наступного одержання полотна диска, і чим більше зовнішній кут конусності, тим більшим є значення верхнього діаметра полотна диска.

Також важливу роль відіграє глибина впровадження кільцевого конусного інструменту на кінцеву форму отриманої заготовки. Глибина впровадження кільцевого конусного інструменту перебуває в інтервалі $1/3 - 2/3$ висоти заготовки, отже ступінь деформації лежить в інтервалі $\epsilon = 33,3 - 66,6\%$.

Переходи нового способу виробництва дисків з уступом при використанні технологічного кільцевого конусного інструменту представлено на рис. 4.6.

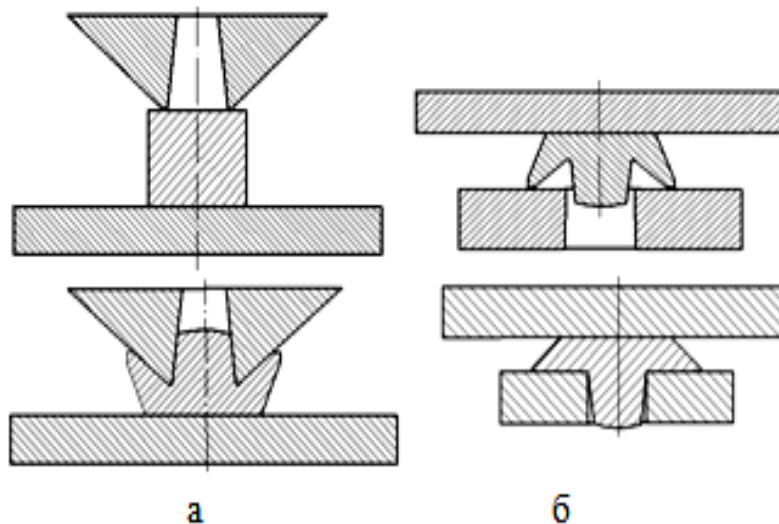


Рисунок 4.6 – Переходи нового способу виробництва дисків з уступом при використанні технологічного кільцевого конусного інструменту

На основі отриманих експериментальних та теоретичних досліджень були розроблені технологічні рекомендації для виготовлення таких деталей, як «диск з уступом» і «диск-шестерня конічна». На рис. 4.7 зображено креслення деталі «диск-шестерня конічна».

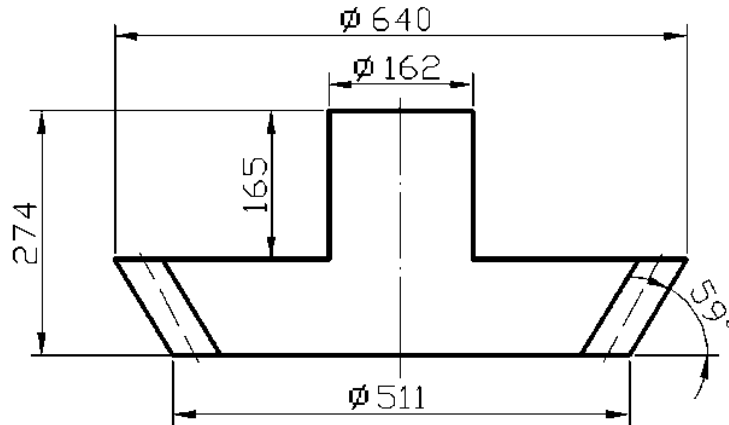


Рисунок 4.7 - Креслення готової деталі «диск-шестерня конічна»

Креслення заготовки «диск-шестерня конічна», отриманої при новому способі штампування, представлено на рис. 4.8.

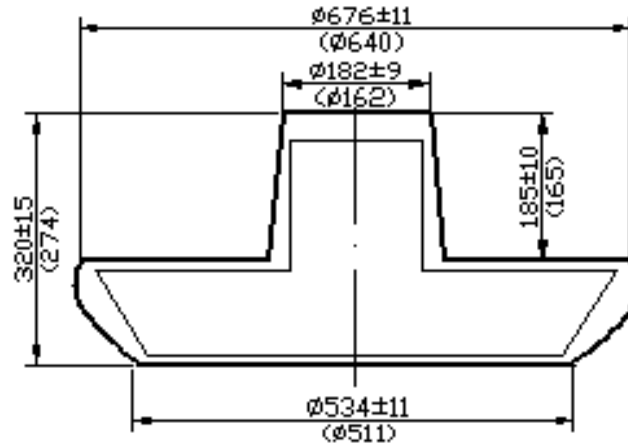


Рисунок 4.8 - Креслення одержуваної заготовки при використанні нового способу штампування

Як видно з рис. 4.8, при використанні нового способу штампування дисків з уступами з використанням технологічного кільцевого конусного інструменту, можливо одержати форму заготовки, максимально наближену до форми деталі. Це досягається за рахунок зовнішнього і внутрішнього кутів конусності кільцевого конусного інструменту.

Так, на рис. 4.9 наведені види заготовок, що одержані за існуючими технологіями виробництва даного типу виробів (штриховими лініями показано напуск, який видаляється механічною обробкою).

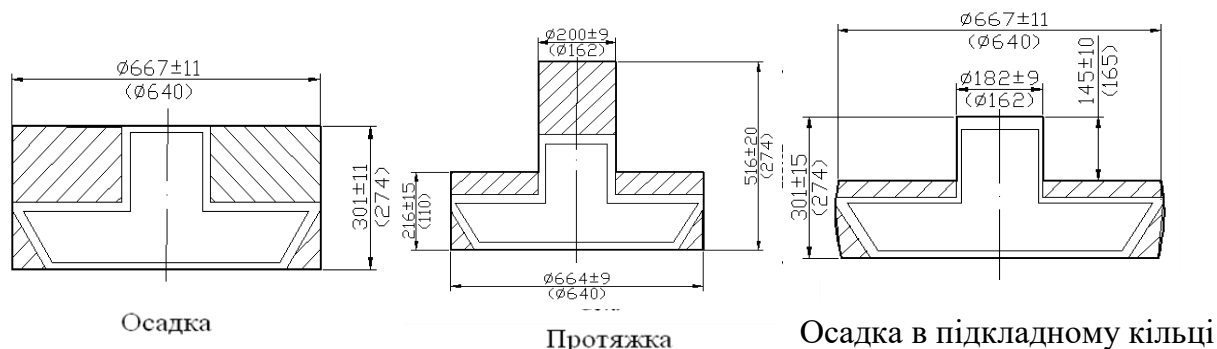


Рисунок 4.9 - Креслення заготовок, що одержані існуючими способами штампування

Однак новим способом штампування з використанням технологічного кільцевого конусного інструменту, можливо одержати заготовку без призначення ковальського напуску, що дозволить зменшити витрати металу і підвищити конкурентоспроможність продукції, що одержується.

На підставі цього було розраховано витрати металу за існуючою і розробленою технологіями. Результати розрахунків показали, що при розробленому способі штампування деталі «диск-шестерня конічна» витрати металу знизилися приблизно в 3...7 разів залежно від виду операцій [90, 91].

4.3. Використання кільцевого конусного інструменту при виробництві заготовок залізничних коліс

Використання кільцевого конусного інструменту не обмежується тільки технологічними процесами виготовлення деталей «диск з уступом» та «диск-шестерня конічна», але також знаходить своє застосування при виготовленні повнопрофільної заготовки залізничних коліс.

Основною проблемою, з якою стикаються при виробництві заготовок залізничних коліс, є невиконання обода колеса через неповне заповнення верхньої частини штампа (рис. 4.10, б). Це, в свою чергу, при подальшому розкочуванні може приводити до появи затиску в нижній частині ободу колеса.

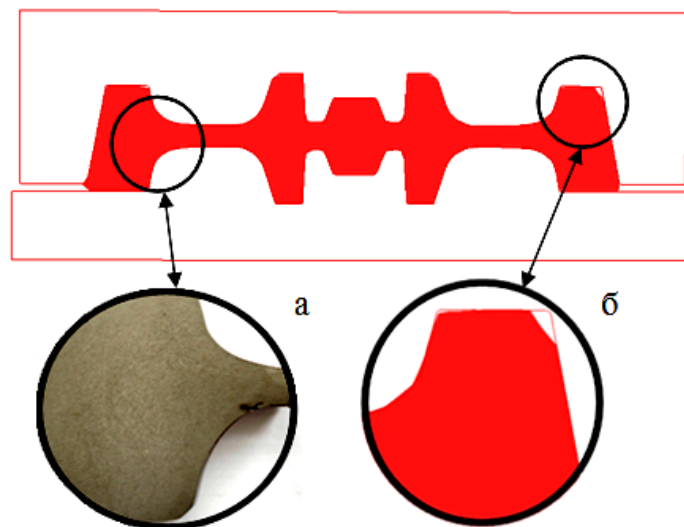


Рисунок 4.10 - Формозміна при штампуванні повнопрофільної заготовки залізничних коліс

На рис. 4.10, а представлено фото вирізаної частини залізничного колеса нижньої частини ободу з явно вираженим затиском (за даними ВАТ «ІНТЕРПАЙП – НТЗ»). Дані види дефектів багато в чому пов'язані з нерациональним заповненням штампа, а саме з неефективним перерозподілом металу при одержанні вихідної заготовки перед штампуванням. У зв'язку з цим було запропоновано використовувати новий інструмент. При розробці цього інструменту було використано знання плинності металу при одержанні поковок типу дисків з уступами. Знання плинності металу при впровадженні кільцевого конусного інструменту дозволило використовувати його елемент у верхній частині штампа при виробництві заготовки залізничних коліс. Основна особливість даного інструменту - це кути внутрішньої та зовнішньої конусності, які дають можливість сформувати після його впровадження об'єм металу для наступного формування виробу.

На рис. 4.11 представлений переріз кільцевого конусного інструменту складної форми для попереднього формування заготовки перед штампуванням залізничного колеса. Також на цьому рисунку представлено креслення кільцевого конусного інструменту (рис. 4.11, б).

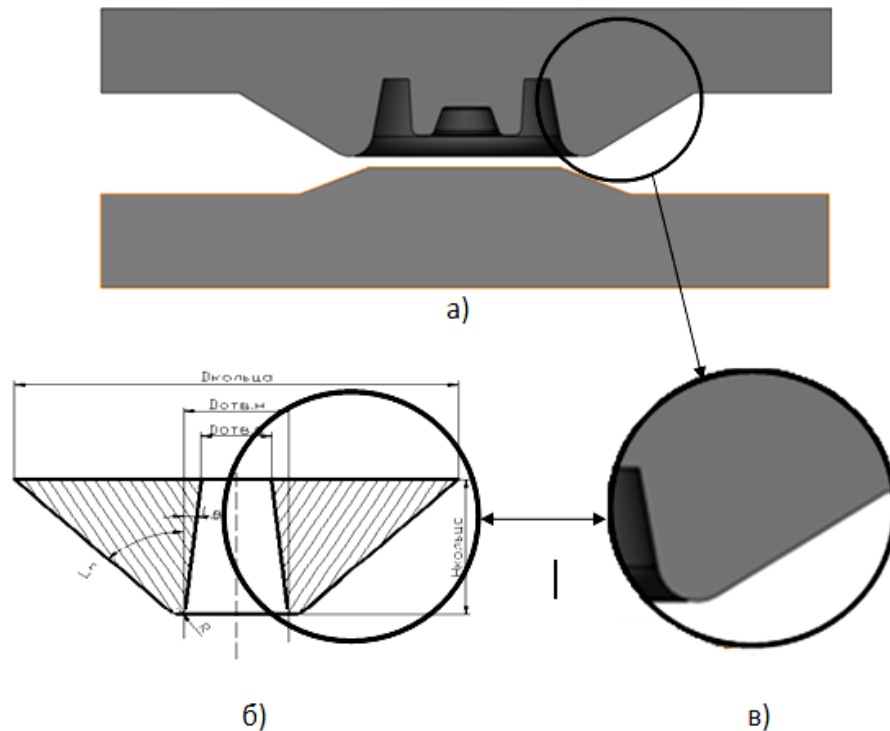


Рисунок 4.11 - Переріз кільцевого конусного інструменту складної форми:
 а - перетин спроектованого штампу; б - креслення кільцевому конусному інструменту; в - збільшений елемент інструмента, що відповідає кільцевому конусному інструменту

Моделювання формозміни заготовки при використанні нового штампа (рис. 4.11, а) було виконано на програмному забезпеченні «Forge3».

Для розрахунків використовувалися такі параметри:

а) розміри заготовки - діаметр: $D=323\text{мм}$, висота: $H=482\text{мм}$; б) температура нагрівання заготовки: $T=1250^\circ\text{C}$; в) температура інструменту: $T=350^\circ\text{C}$; г) сила преса: $P=50\text{МН}$; д) швидкість опускання інструменту: $V=60\text{ мм/с}$; е) коефіцієнт тертя 0,2; ж) матеріал заготовки: Ст55.

За існуючою технологією весь технологічний процес виробництва залізничних коліс виконується на 3-х пресах. Використання розробленого

інструменту (рис. 4.11, а) дозволило виключити попередню осадку на пресі силою 20МН, і деформація заготовки починається відразу на пресі силою 50МН. Після впровадження цього інструменту в центральній частині заготовки формується частина маточини. При цьому раціональний плин металу дозволяє полегшити одержання обода залізничного колеса. Моделювання проміжної і кінцевої стадії першого етапу впровадження кільцевого конусного інструменту складної форми представлено на рис. 4.12.

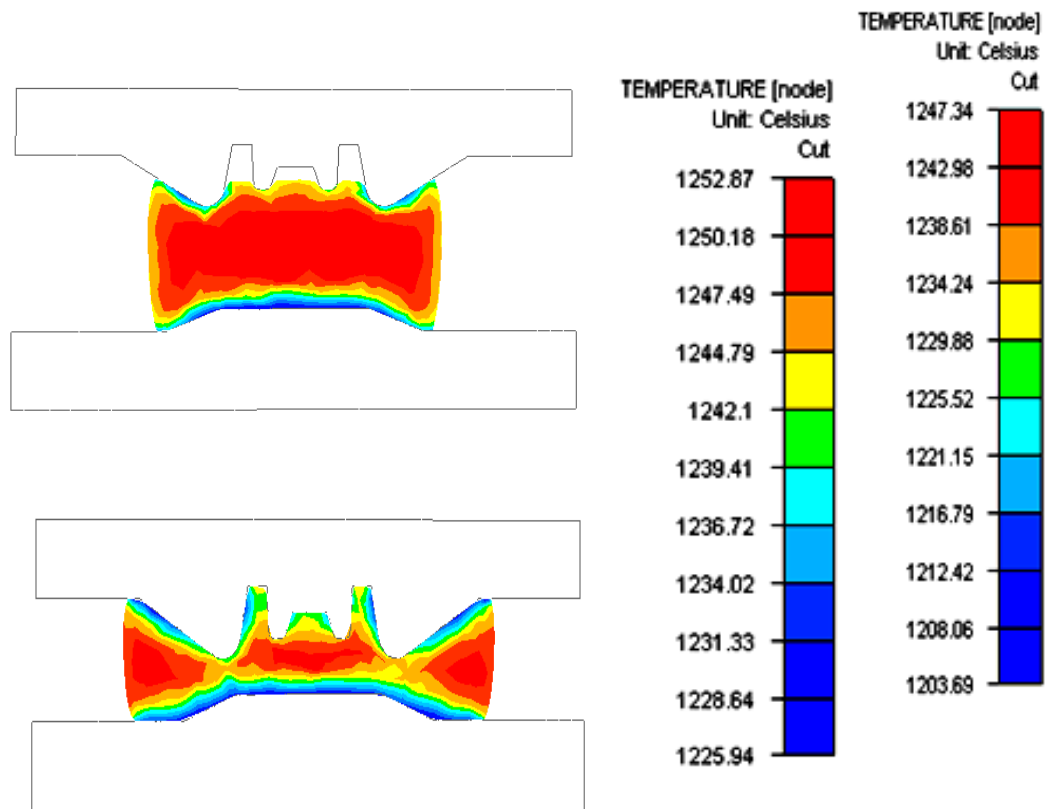


Рисунок 4.12 - Результат моделювання першого етапу із застосуванням кільцевого конусному інструмент

Після першого етапу на пресі силою 50МН отриману заготовку при переході на прес силою 100МН для остаточного штампування в чистовому штампі, кантують на 180° і укладають на нижній штамп. При цьому центрування відбувається за рахунок частково сформованої маточини після першого етапу. Далі виконують остаточне штампування залізничного колеса в чистовому штампі [91, 92].

ВИСНОВКИ

У роботі отримане нове рішення науково-технічної задачі, що полягає у вивченні закономірностей формозміни металу в залежності від форми і геометрії кільцевого конусного інструменту та розробці на основі отриманих даних удосконаленої технології виготовлення продукції ковальсько-штампувального виробництва, що забезпечує зменшення показників металоємкості.

Аналіз існуючих технологічних процесів кування дисків з уступами показав, що при їх виготовленні, коли діаметр диска та висота уступу значно перевищують висоту полотна диска, є підвищена витрата металу за рахунок призначення ковальського напуску. Аналіз літературних джерел показав, що робота, спрямована на дослідження формозміни металу при куванні дисків з уступами та удосконалювання існуючої технології шляхом наближення форми поковки до форми деталі, є актуальною.

За результатами проведених експериментальних та теоретичних досліджень вперше визначено характер вільної течії металу на зовнішній бічній поверхні поковки диска з уступом при використанні кільцевого конусного інструменту, що дозволяє враховувати формозміну металу при використанні такого інструменту та отримувати поковки диска з уступом з циліндричною та конічною бічною поверхнею для виробництва деталей типу «диск з уступом» і «диск-шестірня конічна».

Дані теоретичного дослідження формозміни металу при використанні кільцевого конусного інструменту дозволили вперше для кування дисків з уступами теоретично визначити залежності з розрахунку напружено-деформованого та теплового стану металу в функції від геометрії поперечного перерізу заготовки та інструменту. Знання цих залежностей дозволило виготовляти поковки дисків з уступами, які мають співвідношення діаметра диска до діаметра уступу в інтервалі 2,7...5,0 та висоти уступу до висоти диску в інтервалі 1,0...1,55, які раніше виготовляли з призначенням ковальського напуску, за рахунок наближення форми поковки до форми кінцевого виробу.

На основі експериментальних досліджень вперше отримано залежності параметрів формозміни дископодібних заготовок від форми кільцевого конусного інструменту. Отримані експериментальні залежності дозволяють перевірити адекватність теоретичних розрахунків, а також наблизити форму поковки до форми кінцевого виробу при виробництві поковок дисків з уступом при зменшенні витратного коефіцієнта металу та розробити технологічні рекомендації для цього процесу з використання кільцевого конусного інструменту з зовнішнім кутом конусності 15° та 45° , внутрішнім кутом конусності 2° і 6° та співвідношенням діаметра центрального отвору кільцевого конусного інструменту до діаметра заготовки $0,375 - 0,625$.

Проведені теоретичні дослідження закономірностей течії металу при деформуванні заготовок залізничних коліс перед остаточним штампуванням з використанням кільцевого конусного інструменту складної форми. Вони враховують комплексний вплив ділянок кільцевого конусного інструменту зі складною формою на течію металу, що запобігає появі характерного дефекту «затиск» при наступному штампуванні заготовок залізничних коліс та підвищити їх якість, а також дозволяє зменшити циклічність технологічного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. М. Данченко и [др.]. – Системные технологии – Днепропетровск. – 2005. – 448 с.
2. Винник А. В. Новые библиотеки КОМПАС-3D – быстрота и качество проектирования технологической оснастки / А. В. Винник. – Оборуд. и инструм. для профессионалов. - 2005. - №2. - С. 70-71.
3. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. – Учебник для вузов – 9-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
4. Смирнов – Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов – Аляев. – Л. : Машиностроение. – 1968. – 271 с.
5. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия. – 1970. – 229 с.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища шк. – 1983. – 157 с.
7. Калпин Ю. Г. Оценка деформационной способности металла в процессах холодной объемной штамповки / Ю. Г. Калпин., Ю. К. Филипов., Н. Н. Беззубов. – ВНИИТЭМР. – 1988. – серия 3, выпуск 10. – С. 1–7.
8. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель. – Физика и техника высоких давлений. – 1983. – №11. – С. 28–32.
9. Михалевич В. А. Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией / В. А. Михалевич. – Изв. АН СССР. Металлы. – 1993.- №5 – С. 68–72.
10. Огородніков В. А. Використаний ресурс пластичності металу в процесі видавлювання внутрішньої різи / В. А. Огородніков, О. В. Нагайчук, М. В. Любін. – Вісник ВПІ. – 1998. №1 – С. 68–72.
11. Михалевич В. М. Прогнозування граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні / В. М. Михалевич, В. А.

- Матвійчук, Ю. В. Добранюк, Є. А. Трач // Обработка металлов давлением. – 2012. - № 1 – С. 24–30
12. Кузнецов Г. В. Комбинированное выдавливание деталей с фланцами / Г. В. Кузнецов, В. М. Мирошниченко, Ю. И. Канзберг. – Кузнечно-штамповочное производство, 1974 №5 – С. 21–23.
 13. Гусинский В. И. О возможностях процессов холодного прессования (Разработка и исследование технологических процессов ОМД) / В. И. Гусинский. – М. Машиностроение, 1968 – С. 45–56
 14. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
 15. Огородников В. А. Моделирование напряженного состояния в процессах объемного формоизменения на основании гипотезы о подобии путей деформирования / В. А. Огородников. – Кузнечено-штамповочное производство, 1991. – №11 – С. 2–4.
 16. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, и др. – М. Металлургия, 1975. – 272 с.
 17. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища шк. – 1987. – 144 с.
 18. Евстратов В. А. Совершенствование конструкций матриц для выдавливания узлов их крепления в штампах / В. А. Евстратов, В. И. Кузьменко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 12. – С. 15–16.
 19. Гриник І. В. Стан проектування і виготовлення в Україні сільськогосподарських машин сучасного технічного рівня / І. В. Гриник, В. В. Адамчук, Г. М. Калетнік, В. М. Булгаков // Механізація і електрифікація сільського господарства. – 2014. - №99 (1). – С. 34-39

20. Головач І. В. Математическая модель однобарабанной подъемной установки для производства гидропонной продукции / І. В. Головач, Г. М. Калетнік, І. Є. Кравченко, О. В. Цуркан, В. М. Пришляк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2011. - №9. – С.151-155
21. Булгаков В. М. Динаміка важільних механізмів сільськогосподарських машин / В. М. Булгаков, Г. М. Калетнік, І. Є. Кравченко, В. М. Пришляк // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2011. - №41 (1). – С. 128-132
22. А. с. 745587 СССР, МКИ В 21 J 5/08. Устройство для утолщения концов труб / А. А. Родионов, И. В. Ганжов (СССР). – № 2602119 / 25–27 ; заявл. 11.04.78 ; опубл. 1980, Бюл. № 25.
23. А. с. 1402403 СССР, МКИ В 21 J 5/08. Способ получения цилиндрического утолщения на трубчатой заготовке и устройство для его осуществления / А. Ю. Аверкиев, Ю. А. Алюшин, С. А. Шульга (СССР). – № 3929858 / 31–27 ; заявл. 15.06.88 ; опубл. 1988, Бюл. № 22.
24. А. с. 1269349 СССР, МКИ В 21 J 5/00, 5/12. Способ штамповки полых изделий и устройство для его осуществления / Л. В. Обрушников (СССР). – № 3768857 / 25–27 ; заявл. 19.07.84 ; опубл. 1985, Бюл. № 2
25. Шibaков В. Г. Технологические возможности установки для управляемого поперечного выдавливания / В. Г. Шibaков, С. П. Гончаров // КШП-ОМД. – 2002. – № 2. – С. 28–30.
26. Артеc А. Э. Алюминиевые сплавы в производстве деталей механизмов и машин (Штампованные поковки) : методические указания / А. Э. Артеc. – М. : МГТУ. – 2004. – 56 с.
27. Артеc А. Э. Холодная объемная штамповка в мелкосерийном и серийном производстве / А. Э. Артеc. – М. : НИИМАШ. – 1982. – 58 с.
28. Пат. 1088649 Япония, МПК⁷ В 30 В 15/24 Double action hydraulic press / Kennet R. (Япония); Aida Engineering Co. – № 28122299 ; заявл. 02.10.00 ;

опубл. 04.04.01.

29. Данилин В. Н. Современное прессовое оборудование для осуществления прессования с активным действием сил трения / В. Н. Данилин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 9. – С. 554–559.
30. Овчинников А. Г. Прессы для холодной объёмной штамповки выдавливанием с активными силами трения / А. Г. Овчинников, А. М. Дмитриев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1995. – № 12. – С. 7–10.
31. *Ковка и штамповка : справочник в 4 т. ; под ред. Е.И. Семенова и [др.]*. – М. : Машиностроение, 1987. – Т. 3 : Холодная объёмная штамповка ; под ред. Г. А. Навроцкого. – 384 с.
32. А.с. №1038050 В21 J 13/2. Штамп для радиального выдавливания / И. С. Алиев, К. Д. Махмудов. – №3435062/25-27; заявл. 07.05.82; опубл. в Б.И. – 1983. – №32. – С. 38.
33. А.с. №795693 В21 J 5/00. Способ изготовления изделий радиальным выдавливанием / И. С. Алиев. – №2336296/25-27; заявл. 18.03.76; опубл. в Б.И. – 1981. – №2. – С. 29.
34. Метод компьютерного проектирования калибровок для штамповки заготовок колес широкого сортамента / А.В. Яковченко, Р.А. Гольшков, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – № 7(113). – Ч. 1. – С. 49–59.
35. Комп'ютерне моделювання холодного видавлювання фланців з заготовок у вигляді тора / В.Л. Калюжний, О.В. Калюжний, С.Ф. Сабол, В.М. Куценко // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : Тематич. зб. наук. Пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 79–82.
36. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала. Сообщение / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // *Вестник ДГМА*. – Краматорск : ДГМА, 2005. –

- № 2. – С. 24–29.
37. Алиева Л.И. Исследование процессов радиального выдавливания методом конечных элементов / Л.И. Алиева, П. Абхари, Я.Г. Жбанков // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. Краматорск: ДГМА, 2009 – № 1 (20). – С. 19–24.
38. Тарасенко В.М. Використання методу граничних елементів в математичному моделюванні процесів обробки металів тиском / В. М. Тарасенко, В.Л. Калюжний // Технологические системы. – 2005.- №5-6 (31-32). – С. 77-79.
39. Алиев И. С. Исследование деформированного состояния при радиальном выдавливании / И. С. Алиев, В. С. Мамутов, К. Крюгер // Обработка металлов давлением. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1981.
40. Дмитриев А. М. Прогнозирование утяжин при штамповке / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справ. Инж. Ж. – 2004. – № 11. – С. 29–32.
41. Абхари П. Определение величины утяжины в процессе радиального выдавливания / П. Абхари // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ, 2009. – 4 с.
42. Матвійчук В. А. Розробка процесів штампування порожнистих виробів методами видавлювання та обкочування / В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Л. І. Алієва // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні. – 2003. – С. 359-363
43. Теорияковки и штамповки / Е.П. Унксов и [др.]. ; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1999. – 598 с.
44. Матвійчук В. А. Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою круг–овал / В. А.

- Матвійчук, І. А. Бубновська // Обработка материалов давлением. – 2015. - №1. – С. 35-39
- 45.Матвійчук В. А. Дослідження пластичності металів при немонотонному деформуванні / В. А. Матвійчук // Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування.-Луцьк: ЛДТУ. – 2007. – С. 87-92
- 46.Михалевич В. М. Тензорно-лінійна модель з врахуванням «пам'яті напрямів» при двохступеновому деформуванні / В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, В. О. Краєвський, К. Є. Козлов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематичний збірник наукових праць. – 2002. – С. 13-15
- 47.Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
- 48.Михалевич В. М. Моделі підсумовування розсіяних пошкоджень в процесах пластичного деформування / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, В. А. Матвійчук, Є. А. Трач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- 2014. - № 43 – С. 98-103
- 49.Алюшин Ю. А. Энергетические основы механики : учебное пособие для вузов / Ю. А. Алюшин. – М.: Машиностроение, 1999. – 192 с.
- 50.Капорович В.Г. Получение осесимметричных металлоизделий методом взаимного деформирования трубчатых заготовок / В.Г. Капорович, М.А. Афанасьева // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – №2. – С. 8-9.
- 51.Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки / Е. М. Макушок, А. С. Матусевич, В. П. Северденко, В. М. Сегал. – М.: Наука и техника, 1968. – 408 с.
- 52.Михалевич В. М. Узагальнення експериментально-аналітичної методики аналізу процесу осадження / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, В. А.

- Матвійчук, Є. А. Трач // Обработка металлов давлением. – 2014. - № 1. – С. 41–47
53. Овчинников Г. А. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение, 1983. – 200 с.
54. Матвійчук В. А. О повышении пластичности металлов в случаях появления шейки при растяжении / В. А. Матвійчук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. - №9. – С. 18-22
55. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.
56. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
57. Алиев И. С. Методические указания к курсовой работе по «Теории процессовковки и штамповки» / И. С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2002. – 24 с.
58. Чудаков П. Д. Нестационарное пластическое течение упрочняющегося материала / П. Д. Чудаков // Исследование в области пластичности и ОМД. – Тула: ТПИ, 1974. – С. 34-41.
59. Чучин О. В. Кинематически возможные поля скоростей при выдавливании в разъемных матрицах / О. В. Чучин, В. Г. Бойко, Р. С. Борисов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – С. 52-56.
60. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / И. С. Алиев, В. М. Авдеев, Л. В. Аксенов [Под ред. К. Н. Богоявленского, В. В. Риса, А. М. Шелестеева]. – Л.: Политехника, 1991. – 351 с.
61. Додин Ю. С. Прессование алюминиевых баллонов из квадратных заготовок / Ю. С. Додин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989.

– № 9. – С. 3–5.

62. Johnson W. Estimation of Upper-Bound Loads for Extrusion and Colding operations / W. Johnson. – Proc. Inst. Mech. Engr. – 1959. – С. 61–72.
63. Marcal P. V. Elastic-plastic analysis of two-dimensional stress systems; the finite element method / P. V. Marcal, I. P. King. – Int. J. Mech. Sci., 9(1967). – С. 143–155.
64. Yamada J. Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite - element method / J. Yamada, N. Yoshimura, T. Sacurai. – J. Mech. Sci., 10(1968). – С. 343–354.
65. Исследование технологического процесса выдавливания полых конических деталей / И.С. Алиев, Ю.А. Кащенко, В.П. Ерёмин [и др.] // Прогрессивные технология, оборудование и оснастка для интенсификации процессов обработки давлением: Сборник научных трудов [редкол.: Л.Н. Соколов (отв. ред.) и др.]. – К.: УМК ВО, 1991. – С. 22-31.
66. Марков О.Е. Моделирование процессаковки валов из слитков / О. Е Марков, П. Абхари // Зб. тез доповідей ІХ Всеукраїнської наук.-практич. конференції. – Сєвєродонецьк, 2006. – С.15-16.
67. Совершенствование технологииковки осесимметричных поковок / О Е Марков, Л. Н Соколов., С. В. Янчук, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – ДДМА, Краматорськ, 2006. – С.295-298.
68. Марков О.Е. Компьютерное моделирование процессаковки крупных поковок / О. Е Марков, П. Абхари // Первая международная научно-техническая конференция молодых ученых специалистов ОАО «Энергомашспецсталь – 2007» . – С.57-58.
69. Яковченко А.В. Моделирование сопротивления металла деформации в зависимости от времени / А. В. Яковченко, Хасан Собхи, С. А. Снитко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 10 (92 2005). Науковий журнал. Луганськ 2005. – С. 247 – 254.

- 70.Иванов К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах : учебное пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : ПИМаш, 2000. – 224 с.
- 71.Биба Н. В. Применение программы QFORM 2D/3D для разработки малоотходной технологии штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов // Сучасні проблеми металургії : наукові вісті. – Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології. – 2002. – С. 221–226.
- 72.Петров П. А.. Моделирование выдавливания осесимметричной детали с помощью системы QFORM 2D/3D / П. А. Петров, Д. А. Гневашев, Ю. К. Филиппов //Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 12. – С. 26–27.
- 73.Исследование технологических возможностей поперечного выдавливания методом конечных элементов / К. М. Иванов, А. В. Лясников, Ю. И. Гуменюк, С. А. Матвеев // Металлообработка. – 2001. – № 2. – С. 24–27.
- 74.Матвеев С. А. Возможности конечно-элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением / С. А. Матвеев, В. С. Мамутов, К. М. Иванов // Металлообработка. – 2003. – № 1. – С. 23–28.
- 75.Исмагилов И.М. Моделирование процесса обратного выдавливания с подпором жидкости и активными силами трения по матрице методом конечных элементов / И.М. Исмагилов, А.В. Вахрушев // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – №8. – С. 92–94.
- 76.Анализ процессов комбинированного выдавливания стержневых деталей / И. С. Алиев, Е. М. Солодун, К. Крюгер, Ф. Йеше // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : СУДУ, 2000. – С. 8–13.
- 77.Гуменюк Ю. И. Применение перестроения сетки при конечно-элементном моделировании процесса холодного продольного выдавливания / Ю. И. Гуменюк, С. В. Даниленко, Д. В. Усманов //

- Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 235–240.
78. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.
79. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В. В. Рыбин. – М. : Металлургия, 1986. – 224 с.
80. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов / В. А. Скуднов. – М. : Металлургия, 1989. – 176 с.
81. Колмогоров В. Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов / В. Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. – № 2. – С. 4–16.
82. Александров С. Е. Экспериментальная оценка точности одного критерия разрушения / С. Е. Александров, Н. Н. Александрова // Металлы. 2000. – № 4. – С. 89–91.
83. Арышенский Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
84. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М.: МГУ, 1990. – 310 с.
85. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1977. – 462 с.
86. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с.
87. Кузнецов Д. П. Напряженно-деформированное состояние заготовки при холодном поперечном выдавливании / Д. П. Кузнецов, Е. Т. Савушкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – №3. – С. 5-8.

88. Ашкелянец А.В. Экспериментальное исследование формоизменения металла при внедрении «врезного кольца» / А.В. Ашкелянец // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. – 2009. - №2(21). – С. 206-210.
89. Данченко В.Н. Оптимизация технологической схемы двухпроходной горячей штамповки железнодорожных колес / В.Н. Данченко, А.В. Шрамко, А.В. Ашкелянец, Х. Дыя // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД - 2010. - №4. – С. 27-30.
90. Пройдак Ю.С. Анализ течения металла и причин образования поверхностных дефектов при многопереходной штамповке полнопрофильных заготовок железнодорожных колес / Ю.С. Пройдак, Х. Дыя, В.Н. Данченко, А.В. Шрамко, А.В. Ашкелянец // Metallurgy 2010 “New technologies and achievements”. – Czestochowa, 2010. – Nr. 5. - P. 8-21.
91. Ашкелянец А.В. Анализ экспериментального исследования влияния внутреннего угла конусности на высоту уступа при внедрении «врезного кольца» / А.В. Ашкелянец, В.Л. Чухлеб // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. -2010. - №2(23). – С. 99-102.
92. Патент 90962 Україна, МПК (2009) B21K 1/28. Спосіб кування дисків з уступами / В.Л. Чухліб, А.В. Ашкелянець. - №а200814963; Заяв. 25.12.08. Опубл. 10.06.2010. Бюл. №11. – 4 с.