

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Кваліфікаційна робота / проект

Перший (бакалаврський)

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз проблем формозмінення при об'ємному штампуванні у відкритих і закритих штампах та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з відпаленої сталі 20Х

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1361-омт-с
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)

освітньої програми Обробка металів тиском
(код і назва освітньої програми)

Я. В. Бондаренко

(ініціали та прізвище)

Керівник

доц. каф. МТЕТБ, с.н.с., к.т.н. В.М. Проценко

Рецензент

доц. каф. МТЕТБ, доц., к.т.н. Д.О. Кругляк

Запоріжжя – 2024 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально – науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 136 «Металургія»
(код та назва)
Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 12 ” 02 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Бондаренку Якову Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Аналіз проблем формозмінення при об'ємному штампуванні у відкритих і закритих штампах та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з відпаленої сталі 20Х**

керівник роботи (проекту) Проценко Віктор Максимович, к.т.н., с.н.с.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “26” 12. 23 р. № 2215-с

2. Строк подання студентом роботи 24 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали переддипломної практики, курсові проекти, технічна документація КЦ і КПЦ ПрАТ «Дніпроспецсталь», літературні джерела, інтернет-ресурси

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

Мета кваліфікаційної роботи – аналіз теоретичних та експериментальних досліджень формозмінення при об'ємному штампуванні та видавлюванні

циліндричних заготовок типу «стакан» з урахуванням деформаційної анізотропії, зміцнення, швидкості деформації і температурного ефекту, прогнозування утворення утяжин, застійних зон і руйнування заготовки.

Виконати аналіз проблем формозмінення при об'ємному штампуванні у відкритих і закритих штампах та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з відпаленої сталі 20Х. Розробити принципи і послідовність прогнозування руйнування заготовки, що дозволить розраховувати переходи, які забезпечують досягнення необхідної формозміни заготовки без утворення тріщин. Виконати розрахунок параметрів витяжки порожнистого циліндра.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графіки залежностей, схеми розміщення волокон в структурі заготовки, епюри розподілу накопичених деформацій, схеми до розрахунку параметрів технології витяжки порожнистого циліндра тощо.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Вступ, реферат, 1–4, висновки, перелік літератури	Проценко В.М., доц. каф. МТЕТБ	

7. Дата видачі завдання 12.02.2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, розділ 1.	12.02.24 – 13.03.24	
2.	Розділи 2 - 3	16.03.24 – 17.04.24	
3.	Охорона праці (розділ 4), висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	20.04.24 – 24.05.24	


Студент

_____ (підпис)

Бондаренко Я.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


_____ (підпис)

Проценко В.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер

_____ (підпис)

Бєлоконь Ю.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Реферат

Пояснювальна записка бакалаврської роботи містить: 83 с., 35 рис., 3 табл.; використано літературних джерела 22.

Об'єкт дослідження – ковальсько-штампувальне виробництво, зокрема ПрАТ «Дніпроспецсталь», видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з відпаленої сталі 20Х.

Метою бакалаврської роботи є аналіз теоретичних та експериментальних досліджень формозмінення при об'ємному штампуванні та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з урахуванням деформаційної анізотропії, зміцнення, швидкості деформації і температурного ефекту, прогнозування утворення утяжин, застійних зон і руйнування заготовки.

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків у програмних комплексах Mathcad Prime 9, Excel. Розрахунки і комп'ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical 2020.

Отримані результати і їх новизна – виконано аналіз проблем формозмінення при об'ємному штампуванні у відкритих і закритих штампах та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан». Розглянуто схеми утворення застійної зони і зони утрудненої деформації під торцем пуансону і їх вплив на показники процесу. Наведено алгоритм визначення можливості утворення застійної зони та її розмірів. Наведено розрахункову модель, що дозволяє описати процес утворення утяжини при видавлюванні стакана. Розглянуто принципи і послідовність прогнозування руйнування заготовки, що дозволяє розраховувати переходи, які забезпечують формозміну заготовки без утворення тріщин.

Отримані результати рекомендуються для впровадження у ковальському і ковальсько-пресовому цехах ПрАТ «Дніпроспецсталь» з метою, підвищення якості продукції, зменшення енерговитрат і втрат металу.

ФОРМОЗМІНЕННЯ, ШТАМПУВАННЯ, ВИДАВЛЮВАННЯ, КОВКА, ШТАМП, СТАКАН, АНІЗОТРОПІЯ, ПЕРЕХОДИ, ЗУСИЛЛЯ ВИТЯЖКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЕРАЦІЙ КУВАННЯ, ПРЕСУВАННЯ ТА ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ	9
1.1 Загальні відомості	9
1.2 Устаткування для кування та штампування	12
1.3 Деформації, робота та зусилля при різних операціях кування та штампування	16
1.4 Нагрів та охолодження штампів при гарячому штампуванні ..	20
1.5 Пресування: схеми процесу, продукція, інструмент	24
1.6 Деформації, робота та зусилля деформування при пресуванні.	27
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ФОРМОЗМІНЕННЯ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ ШТАМПУВАННІ У ВІДКРИТИХ І ЗАКРИТИХ ШТАМПАХ ТА ВИДАВЛЮВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК ТИПУ «СТАКАН» З ВІДПАЛЕНОЇ СТАЛІ 20Х	30
2.1 Анізотропія матеріалу, що видавлюється	30
2.2 Застійна зона під торцем пуансону	34
2.3 Утяжина на зовнішній кромці дна виробу	37
2.4 Макроструктура виробу, що видавлюється	38
2.5 Руйнування	51
3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИТЯЖКИ ПОРОЖНИСТОГО ЦИЛІНДРА	60
3.1 Основи виконання технологічних розрахунків	60
3.2 Розрахунок параметрів технології витяжки порожнистого циліндра	65
3.3 Розрахунок силових умов витяжки порожнистого циліндра ...	68
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	72
4.1 Загальні вимоги безпеки	72
4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи	73

4.3 Вимоги безпеки під час роботи	75
4.4 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях	77
4.5 Вимоги безпеки при закінченні роботи	78
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ВСТУП

Основною задачею технології металообробного виробництва є виготовлення деталей з найменшими трудозатратами, з найбільшими продуктивністю і коефіцієнтом використання металу (КВМ), причому їх якість повинна задовольняти умовам експлуатації. Для вирішення цієї задачі передбачено рід виробництв, у тому числі ковальсько-штампувальне виробництво. Як правило, деталі із заданими кресленням розмірами і необхідною шорсткістю поверхні отримують обробкою різанням. Однак, для забезпечення необхідних механічних характеристик, зниження трудозатрат, підвищення КВМ і продуктивності важливе значення має ковальсько-штампувальне виробництво, і зокрема холодна штамповка видавлюванням.

Перевагами холодної штамповки видавлюванням, завдяки яким її можна віднести до прогресивних технологій, є наступні:

- можливість отримання поковок, за формою і розмірами які наближаються до готових машинобудівних деталей, що дозволяє звести до мінімуму наступні операції різання;
- висока точність розмірів (10 – 12 квалітет у поперечному напрямку) і якість поверхні (шорсткість) поковок дозволяють у деяких випадках повністю виключити наступну операцію різання;
- зміцнення, що відбувається завдяки холодному деформуванню, дозволяє замінити низьколеговані і середньовуглецеві сталі на низьковуглецеві сталі;
- КВМ може бути доведений до 98 %;
- висока продуктивність праці при низьких трудозатратах;
- можливість застосування в умовах масового, багатосерійного і дрібносерійного виробництв;
- можливість скорочення числа переходів і операцій у порівнянні з холодною штамповкою з листових матеріалів.

Процес холодного видавлювання оснований на використанні пластичних властивостей металу і представляє собою формозмінення заготовки шляхом всебічного стискання з витіканням його зовні у незамкнутій об'єм штамп.

Холодна штамповка деталей видавлюванням в багатьох випадках замінює процеси глибокої витяжки і протяжки. На відміну від них вона має ту перевагу, що деталь може бути виготовлена за одну операцію і зі значно меншою кількістю відходів матеріалу, що обумовлює актуальність роботи.

Габарити виробів, що отримуються холодним видавлюванням визначаються потужністю пресового обладнання. У цей час можливо виготовлення деталей цим методом від 3 до 100 мм у діаметрі і з товщиною стінок від 0,05 до 10 мм. Деталі з більшими розмірами можуть бути отримані методом глибокої витяжки.

Вибір способу виготовлення деталей залежить від відношення їх діаметра до висоти. Якщо це відношення перевищує 1:3, то вигідніше застосувати холодне видавлювання, оскільки при глибокій витяжці необхідно було б використовувати декілька операцій.

Однак при виборі методу виготовлення деталі необхідно мати на увазі, що холодне видавлювання на відміну від витяжки потребує більш потужних пресів і пов'язано з більш інтенсивним зносом інструменту.

Процес холодного видавлювання може бути застосований не тільки в умовах масового і багатосерійного виробництва, але і для дрібносерійного виробництва. Розміри деталей за діаметром визначаються головним чином потужністю обладнання; довжина виробу визначається міцністю пуансона.

Метою бакалаврської роботи є аналіз теоретичних та експериментальних досліджень формозмінення при об'ємному штампуванні та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з урахуванням деформаційної анізотропії, зміцнення, швидкості деформації і температурного ефекту, прогнозування утворення утяжин, застійних зон і руйнування заготовки.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЕРАЦІЙ КУВАННЯ, ПРЕСУВАННЯ ТА ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

1.1 Загальні відомості

Кування – спосіб обробки металів тиском, що здійснюється за допомогою кувальського інструменту або штампів, при якому інструмент надає багаторазовий, переривчастий вплив на нагріту заготовку, в результаті чого вона, деформуючись, поступово набуває заданих форм і розмірів.

Кування зазвичай застосовують у дрібносерійному або одиничному виробництві, а також для виготовлення великих поковок.

Кування може бути вільним або в підкладних штампах, ручним або машинним, що здійснюється на пароповітряних молотах або на гідравлічних кувальних пресах.

Основні операції кування: осадка, висадка, протяжка, прошивка, відрубка, гнучка та ін.

Осадкою називають таку технологічну операцію обробки тиском, при якій зменшується висота вихідної заготовки при одночасному збільшенні площі її поперечного перерізу (рис. 1.1).

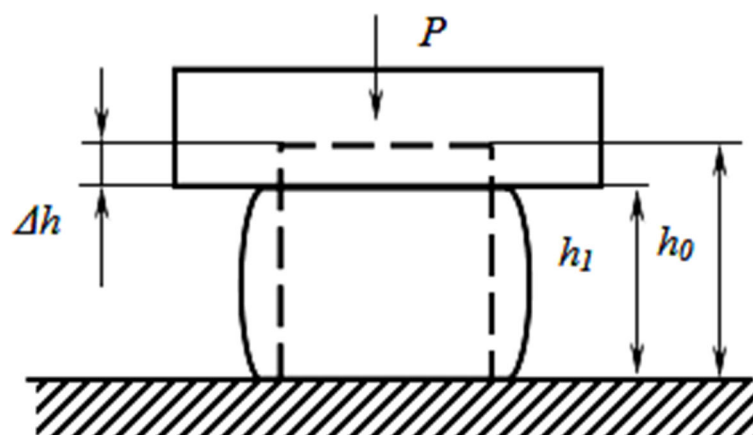


Рисунок 1.1 – Операція осадки циліндричного зразка

Для стійкості при осадці циліндричних заготовок висота заготовки повинна бути не більше двох з половиною її діаметрів:

Висаджування є різновидом осадки. При цьому метал осаджують лише на частині довжини заготовки (рис. 1.2 а).

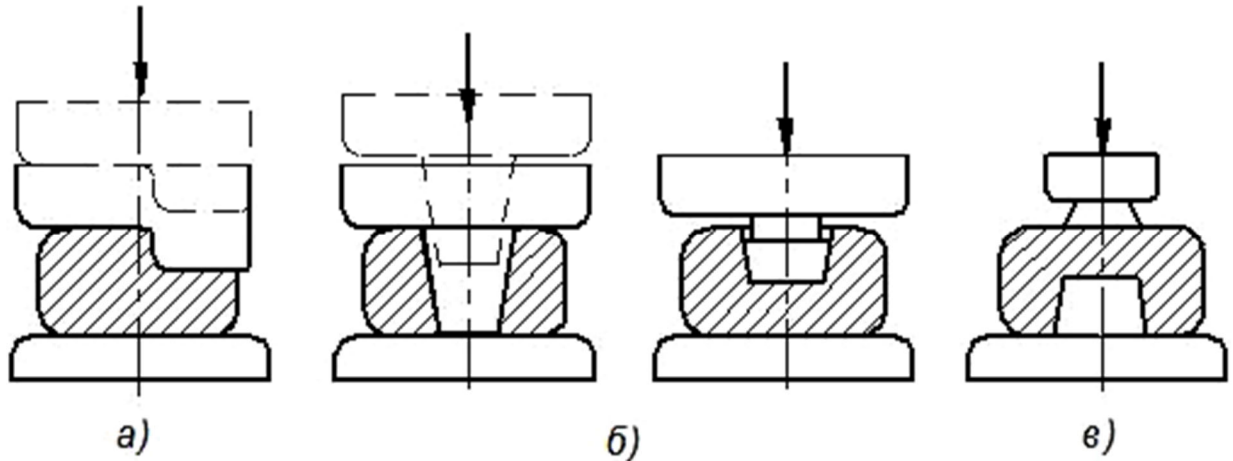


Рисунок 1.2 – Схеми операцій висадки (а) односторонньої (б) та двосторонньої прошивки (в)

Прошивка – операція отримання порожнин за рахунок витіснення металу (рис. 1.2 б). Інструментом для прошивки є прошивні.

Гаряче об'ємне штампування – це вид обробки металів тиском, при якому формоутворення поковки з нагрітої заготовки здійснюють за допомогою спеціального інструменту – штампу.

При штампуванні течія металу обмежується поверхнями порожнин або виступів в окремих частинах штампу. В кінцевий момент штампування метал займає всю замкнуту порожнину штампу (струмок) відповідно до конфігурації поковки. Завдяки цьому гарячим об'ємним штампуванням можна отримувати поковки складної конфігурації з мінімальними напусками (або без них) і з меншими допусками, ніж при куванні (рис. 1.3).

За наявності або відсутності задирка розрізняють штампи відкриті та закриті. Залежно від температури нагріву заготовок – для холодного та гарячого штампування, за видом операцій: формувальні, висадкові, прошивні і т. д., за застосовуваним обладнанням – молотові та пресові. Основні деталі

штампу – пуансон та матриця. Штампи молотові та для кривошипних гарячештампвальних пресів складаються з верхньої та нижньої частин, на дотичних частинах яких є струмки для послідовного формоутворення виробу. Виготовляють штампи з вуглецевих та легованих, головним чином хромом, штампових сталей.

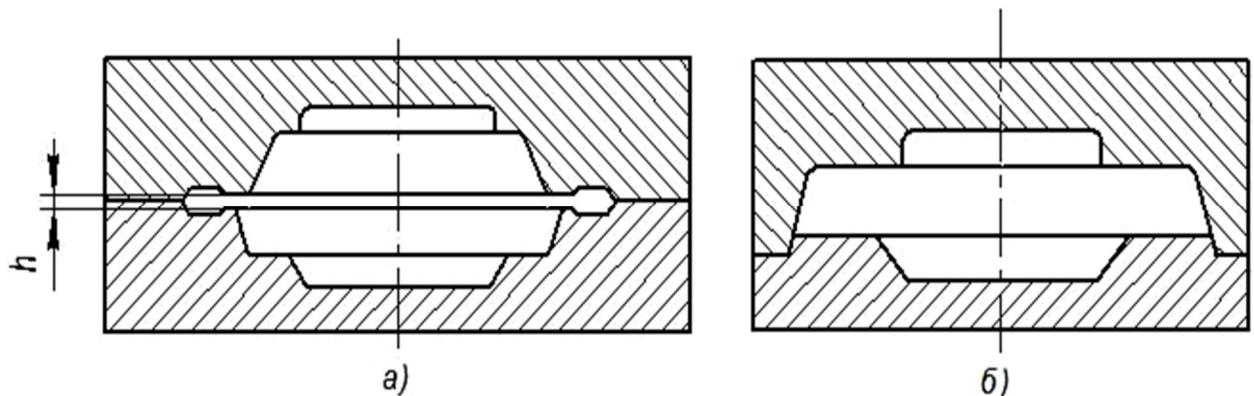


Рисунок 1.3 – Схема штампування у відкритих (а) та закритих (б) штампах

Штампування у відкритих штампах характеризується зазором між рухомою та нерухомою частинами штампу. У зазор впливає задир (облой). У міру зменшення зазору метал, що знаходиться в цьому зазорі між частинами штампу, інтенсивно охолоджується, збільшується межа плинності металу і зростає опір переміщенню задирки. Завдяки цьому заповнюється вся порожнина штампу і лише надлишки металу витісняються в задирок. Задирок згодом обрізається в спеціальних (обрізних) штампах.

При штампуванні в закритих штампах зазор між рухомою і нерухомою частинами штампу достатній для відносного переміщення частин штампу, але не для утворення задирки. Тому необхідно суворо дотримуватися рівності обсягів заготовки металу та поковки. До штампування в закритих штампах можна віднести і штампування видавлюванням.

Гаряче об'ємне штампування застосовується у великосерійному чи масовому виробництвах. Воно дозволяє отримувати поковки складної конфігурації з мінімальними напусками та меншими допусками.

У той же час штамп – дорогий інструмент, призначений для виготовлення лише однієї конкретної поковки.

Зусилля при штампуванні більше, ніж для кування однакових поковок. Тому маса поковок, що виготовляються об'ємним штампуванням, рідко перевищує 20–30 кг. Продуктивність штампування значно вища, ніж кування.

1.2 Устаткування для кування та штампування

Кування і штампування виконують на кувальних і штампувальних молотах і пресах.

Кувальний молот – машина для обробки металевих заготовок ударами частин, що падають. За родом приводу молоти бувають пароповітряні (рис. 1.4 а), пневматичні (рис. 1.4 б), механічні, гідравлічні.

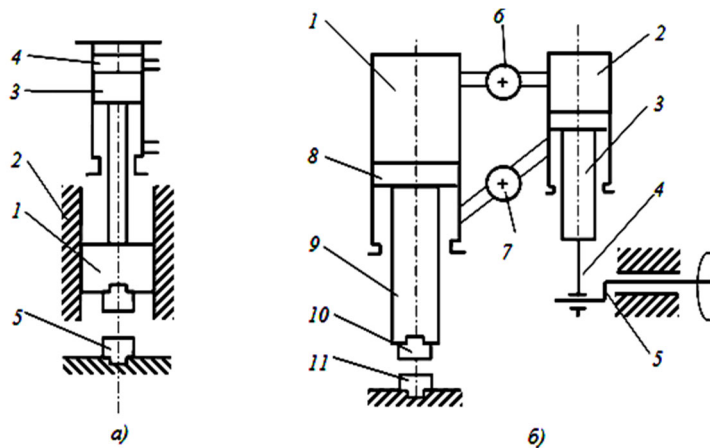


Рисунок 1.4 – Принципові схеми пароповітряного (а) молота: 1 – баба, 2 – напрямні, 3 – поршень, 4 – циліндр для подачі пари, 5 – нижній бойок; та пневматичного (б) молота: 1 – робочий циліндр, 2 – компресорний циліндр, 3, 8 – поршні, 4 – шатун, 5 – кривошип, 6, 7 – золотники, 9 – шток, 10 – верхній бойок, 11 – нижній бойок

Пароповітряні молоти приводять у дію парою або стисненим повітрям тиском 0,7-0,9 МПа. Переміщення баби 1 щодо напрямних 2 відбувається при русі поршня 3 під дією стисненої пари або повітря. При подачі пари (або повітря) у верхню порожнину циліндра 4 падаючі частини переміщуються вниз і завдають удару по заготовці, покладеної на нижній бойок 5. При подачі пари (або стисненого повітря) в нижню порожнину циліндра падаючі частини піднімаються у верхнє положення .

Пневматичний молот має два циліндри: робочий 1 і компресорний 2. Поршень 3 компресорного циліндра переміщається шатуном 4 від кривошипа 5. При цьому повітря по черзі стискається до 0,2-0,3 МПа у верхній або нижній порожнинах циліндра і при натисканні на педаль або рукоятку, які відкривають золотники 6 і 7, надходить у робочий циліндр 1. Тут він діє на поршень 8. Поршень разом з масивним штоком 9, що одночасно є бабою молота, в якій кріпиться верхній бойок 10. При переміщенні частин, що падають, вниз верхній бойок ударяє по заготовці, покладеної на нерухомий нижній бойок 11.

Основа кувального молота (шабот) має масу, що значно (приблизно в 8-15 разів) перевищує масу падаючих частин. Шаботи штамповочних молотів ще масивніші - в 20-30 разів більше маси падаючих частин. Це забезпечує високий ККД удару ($\eta = 0,8 - 0,9$) та високу точність зіткнення частин штампу. Крім того, для цієї ж мети вони мають посилені регульовані напрямні для руху баби.

За способом роботи розрізняють молоти простої та подвійної дії. У перших падаюча частина (баба) падає вільно, під впливом власної ваги, а в інших – додатково розганяється. Швидкості баби високошвидкісних молотів досягають до 25 м/с замість 3-6 м/с у звичайних молотів. Пароповітряні кувальні молоти будують з масою частин, що падають 500 - 5000 кг, а штампувальні – 500 - 30000 кг. На кувальних молотах виготовляють поковки від 20 до 2000 кг, як правило, з прокатаних заготовок або зі злитків. Максимальна маса штампованих поковок – 1000 кг.

У безшаботних пароповітряних молотів шабот замінений нижньою рухомою бабою, з'єднаною з верхньою бабою механічним або гідравлічним зв'язком. Необхідний молот вибирають на підставі розрахунку або за довідковими таблицями.

Кривошипні штампувальні преси мають постійний хід, що дорівнює подвоєному радіусу кривошипу (рис. 1.5). Штампування на кривошипних пресах характеризується високою продуктивністю та точністю по висоті заготовок.

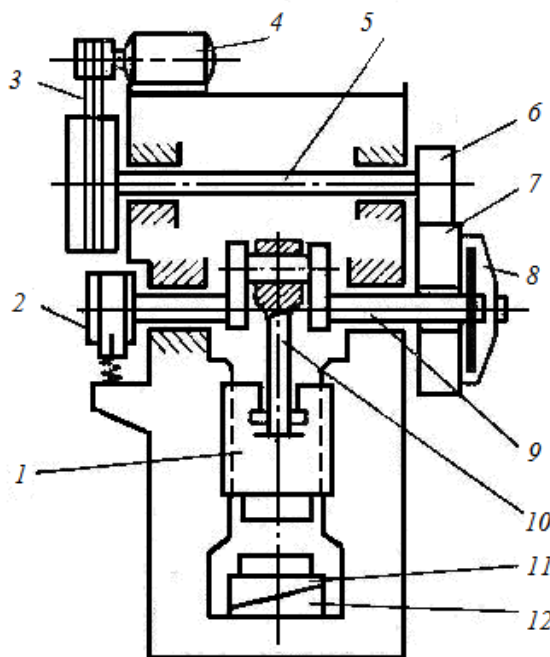


Рисунок 1.5 – Кінематична схема кривошипного гарячештампувального преса: 1 – повзун; 2 – гальмо; 3 – шків з маховиком, з'єднані клинопасовою передачею; 4 – двигун; 5 – проміжний вал; 6 – шестерня, що знаходиться в зачепленні із зубчастим колесом 7; 8 – багатодискова фрикційна муфта; 9 – колінчастий вал; 10 – шатун; 11 – штамп; 12 – стіл штампового преса

Заготовка витягується із штампку при зворотному ході його верхньої частини за допомогою виштовхувачів. Завдяки цьому зручно штампувати у закритих штампках видавлюванням та прошивкою.

Кривошипні преси штампування зусиллям 6,3 – 100 МН успішно замінюють штампувальні молоти з масою падаючих частин 630 – 10000 кг. Проте вартість кривошипного гарячештампувального преса в 3 – 4 рази вища за вартість еквівалентного за технологічними можливостями молота.

Горизонтально-кувальні машини (ГКМ) мають штампи, що складаються з трьох частин: нерухомої 8 і рухомий матриць 1, що розмикаються у двох взаємно перпендикулярних площинах, і пуансона (рис. 1.6).

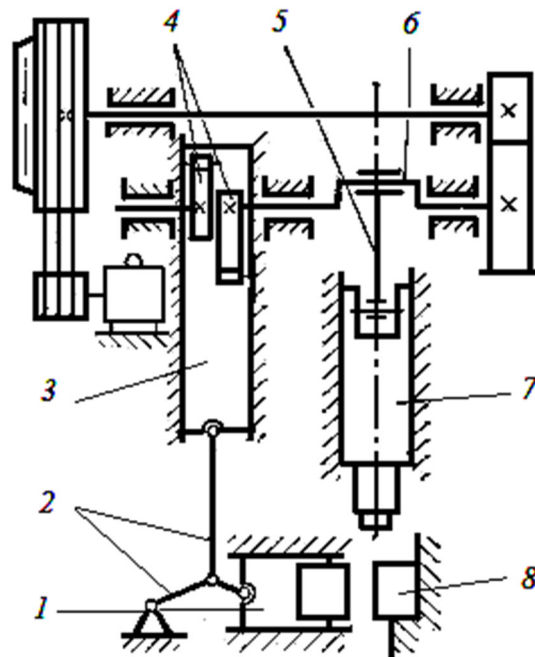


Рисунок 1.6 – Кінематична схема горизонтально-кувальної машини:

1 – рухлива матриця, 2 – система важелів, 3 – бічний повзун, 4 – кулачки, 5 – шатун, 6 – кривошипний вал, 7 – повзун, 8 – нерухома матриця

Пруток з нагрітою ділянкою, зверненою до пуансона, закладають у нерухому матрицю 8. Положення прутка визначається упором. При включенні ГКМ рухома матриця 1 притискає пруток до нерухомої матриці 8, упор відводиться убік, а пуансон ударяє на частину прутка, що виступає, деформуючи її.

Головний повзун 7, несучий пуансон, приводиться до руху від кривошипного валу 6 за допомогою шатуна 5. Рухлива матриця 1 приводиться до руху від бічного повзуна 3 системою важелів 2. Бічний повзун приводиться до руху кулачками 4, що сидять на кінці кривошипного валу 6.

ГКМ зазвичай будують із зусиллям до 30 МН. Основними операціями, що виконуються на ГКМ, є висадка, прошивка та пробивка.

Штампуння на ГКМ можна виконувати за кілька проходів у окремих струмках, осі яких розташовані горизонтально одна над іншою. Кожен перехід виконується за робочий хід машини.

Схема гідравлічного преса для кування показана рис. 1.7.

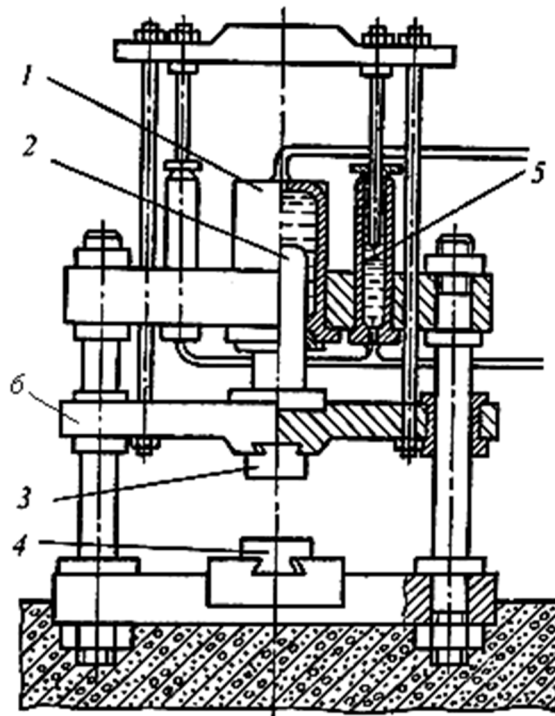


Рисунок 1.7 – Принципова схема гідравлічного пресу

1 – робочий циліндр, 2 – плунжер, 3 – верхній бойок, 4 – нижній бойок,
5 – зворотний циліндр, 6 – рухома поперечка

Ці машини статичної дії, тривалість деформації становить від одиниць до десятків секунд. Щоб подолати опір з боку заготовки при її деформуванні, робочі циліндри гідравлічних пресів подають рідину високого тиску (до 32

МПа і більше). Швидкість переміщення рухомої поперечини рідко перевищує 30 см/с, тому кінетична енергія поступального руху рухомих частин преса дуже мала порівняно з потенційною енергією, що накопичується рідиною, і нею зазвичай нехтують.

Рухома поперечка повертається у вихідне положення під тиском рідини, що подається в поворотні циліндри 5. Описаний принцип дії гідравлічного преса залишається незмінним незважаючи на різноманітність технологічного призначення, конструктивних форм і типів приводу. Зусилля сучасних гідравлічних пресів штампування досягає 750 МН.

1.3 Деформації, робота та зусилля при різних операціях кування та штампування

Розглянемо осадку циліндричного зразка між двома плоскими поверхнями, перпендикулярними осі циліндра, що осаджується (див. рис. 1.1).

В ідеальному випадку за відсутності тертя на торцях циліндричного зразка деформації будуть однорідними по всьому об'єму. При цьому вихідний циліндр в результаті осадки перетворюється також на циліндр меншої висоти, але більшого діаметра. Однак насправді через тертя на торцях циліндричного зразка деформації будуть неоднорідними. Зразок після осадки набуває форми бочки.

Осадку здійснюють на пресах або молотах як одну з операцій (або переходів) технологічного процесу обробки тиском.

Визначимо збільшення роботи деформування при осаджуванні:

$$dA = Pdh = pFdh = p \frac{V}{h} dh, \quad (1.1)$$

де V – об'єм; F – площа поперечного перетину заготовки, що деформується; p – тиск.

Відповідно робота деформації:

$$A = \left| \int_{h_0}^h pV \frac{dh}{h} \right| = V p_{cp} \int_h^{h_0} \frac{dh}{h} = V p_{cp} \ln \frac{h_0}{h} = V p_{cp} \varepsilon_{Z,u}. \quad (1.2)$$

Середнє зусилля деформування при осадженні

$$P_{cp} = \frac{A}{h_0 - h_1} = p_{cp} F \frac{\varepsilon_{Zu}}{\varepsilon_Z} = p_{cp} F \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_Z}. \quad (1.3)$$

Замінивши справжню лінійну деформацію інтенсивністю деформацій, можна застосовувати цю формулу для оцінки зусилля і при виникненні бочкоподібності, тобто з появою зсувних компонентів деформації. Щоб уникнути появи тріщин, інших дефектів, величину деформації ε_{Zu} (або ε_i) за 1 удар молота необхідно обмежувати, наприклад, $\varepsilon_{Zu} = 0,03$.

Прошивка являє собою операцію при куванні або штампуванні поковок, що здійснюється для отримання глибокої порожнини або наскрізного отвору в тілі поковки шляхом вдавлення прошивня в неї (рис. 1.8).

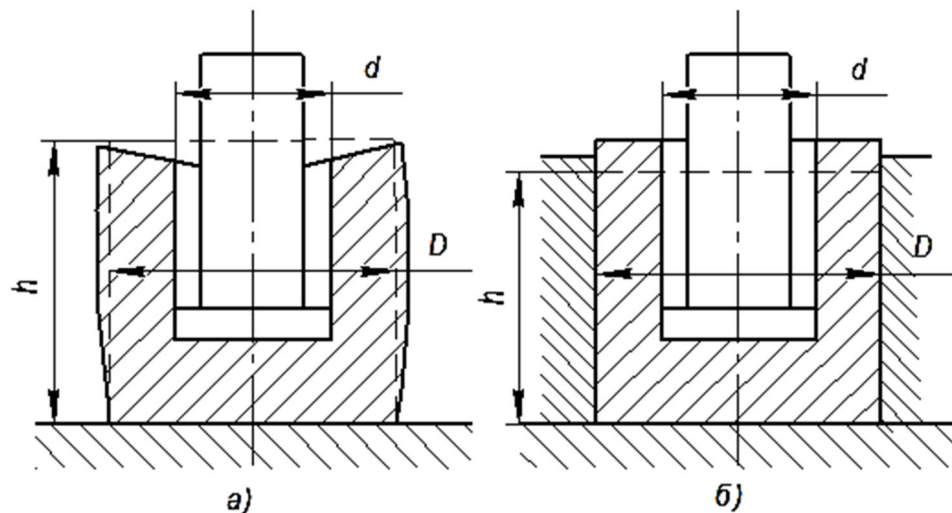


Рисунок 1.8 – Схеми прошивки: а) відкрита; б) закрита

Прошивка поділяється на відкриту та закриту. При відкритій прошивці бічні поверхні заготовки вільні від навантаження. При цьому вихідна висота заготовки зменшується (заготовка осідає), а діаметр нерівномірно збільшується. Форма заготовки при відкритій прошивці спотворюється

(набуває бочкоподібності) тим більше, чим менше відношення D/d вихідного діаметра циліндричної заготовки до діаметра прошивня.

При закритій прошивці діаметр заготовки дорівнює діаметру матриці, а висота заготовки збільшується, причому тим більше, чим менше відношення D/d . Висота заготовки може бути обчислена з умови сталості об'єму.

При прошивці деформуюче зусилля визначають за питомим тиском і площею поперечного перетину прошивня.

Питомий тиск під прошивнем залежить від схеми прошивки (відкритої або закритої) і від відношення D/d вихідного діаметра циліндричної заготовки до діаметра прошивня:

$$p = \begin{cases} \sigma_T \left(1,5 + 1,1 \ln \frac{D}{d} \right) & \text{при відкритій прошивці} \\ \sigma_T \left[2 + \left(1 + \frac{D^2}{d^2} \right) \ln \frac{D^2/d^2}{D^2/d^2 - 1} \right] & \text{при закритій прошивці} \end{cases} \quad (1.4)$$

При розрахунку деформуючого зусилля необхідно враховувати не тільки тиск металу на прошивень, а й тертя металу про бічні поверхні матриці та прошивня.

При штампуванні на пресах час контакту пуансона із заготовкою більший, ніж на молотах. Це призводить до охолодження заготовки і гіршого заповнення порожнини штампу. Тому площину роз'єму вибирають поблизу торця поковки.

Оскільки в кожному струмку штампа деформація повністю здійснюється за один хід преса, при штампуванні на пресах виникають великі зусилля. Розрахунок зусилля при штампуванні на пресах дуже важливий, так як за недостатнього зусилля преса можлива його поломка.

1.4 Нагрів та охолодження штампів при гарячому штампуванні

Штампові інструменти для гарячого деформування за умов роботи можна розділити на три групи: для пресів, для штампувальних молотів і для високошвидкісного деформування на швидкісних молотах та гідрогвинтових пресах. Час деформування заготовок для всіх способів гарячої обробки тиском відносно невеликий, причому для різних способів обробки тиском він може істотно відрізнятися.

У зв'язку з характером роботи штампу його нагрівання та охолодження здійснюється циклічно. До основних температурних факторів, що впливають на працездатність штампу, відносяться: рівень температури поверхні штампу, коливання температури поверхні штампу, розподіл температури по глибині штампу.

Збільшення контактної температури поверхні штампу обмежується зменшенням характеристик міцності штампових сталей. Так, наприклад, умовна межа міцності штампових сталей помірної теплостійкості при температурі 600–700°C становить близько 350 – 250 МПа за досить високої ударної в'язкості $\dot{a}_1 = 800$ кДж/м². Цих механічних властивостей достатньо для деформування сталевих заготовок, нагрітих до температури 1000-1100°C і таких, що мають межу плинності менше 50 МПа.

Нехай початкова температура штампу $\theta = 200^\circ\text{C}$, а початкова температура заготовки $\theta_3 = 1000^\circ\text{C}$. При короткочасному торканні штампу з нагрітою заготовкою контактна температура дорівнює напівсумі початкових температур заготовки та штампу (рис. 12.11):

$$\theta_k = \frac{\theta_3 + \theta_0}{2} \approx 600^\circ\text{C}$$

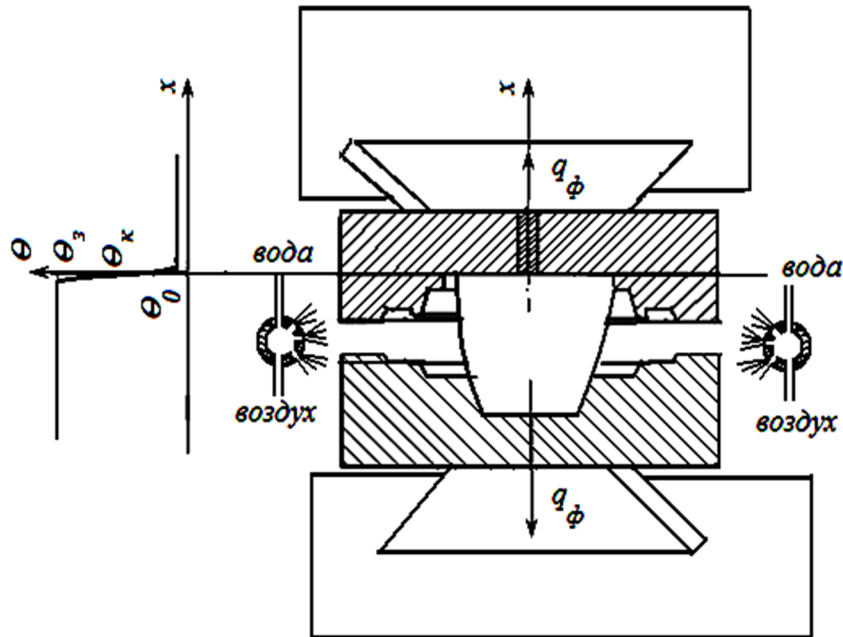


Рисунок 1.9 – Схема визначення контактної температури та теплових потоків у штамп при гарячому штампуванні

Розподіл температури в глибині штамп може бути обчислено за відомим рішенням про температуру стрижня, торець якого підтримується при постійній температурі:

$$\theta(x, \tau) = \theta_k - \theta_k \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{\omega\tau}}} \frac{x}{\sqrt{\omega\tau}} \exp(-u^2) du. \quad (1.5)$$

Середня температура поверхневого шару товщиною близько 1 мм нижче, ніж контактна температура (порядку 300–500°C). Тому контактні температури, які короткочасно виникають на поверхні штамп, можуть бути навіть дещо вищими, ніж 600°C (а саме: до 700–750°C).

Теплообмін штамп з гарячою заготовкою має багато спільного з теплообміном при гарячій прокатці.

Щільність теплового потоку на торці стрижня, виділеного в штампі, перпендикулярно поверхні контакту із заготовкою згідно з відомим рішенням про нагрівання стрижня з постійною температурою на торці дорівнює:

$$q_{\phi} = \sqrt{\lambda C_V} \frac{\theta_3 - \theta_0}{\sqrt{\pi \tau}}. \quad (1.6)$$

Час силового контакту заготовки зі штампом змінюється в досить широких межах. Обчислимо середню щільність теплового потоку на ділянці контакту штампу із заготовкою при $\lambda = 40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\theta_3 - \theta_0 = 800^\circ\text{C}$ $C_V = 5 \text{ МДж/(м}^3\cdot\text{К)}$ (рис. 1.10):

$$q_{cp} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} \sqrt{\lambda C_V} \frac{\theta_3 - \theta_0}{\sqrt{\pi \tau}} d\tau = \sqrt{\lambda C_V} \frac{2(\theta_3 - \theta_0)}{\sqrt{\pi \tau_1}}. \quad (1.7)$$

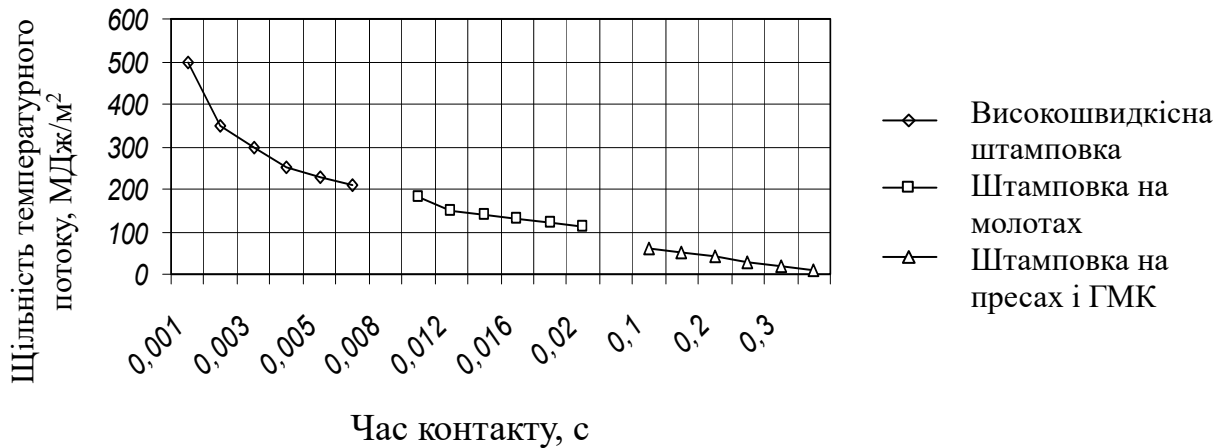


Рисунок 1.10 – Вплив часу контакту на середню густану теплового потоку

Якісну картину вирівнювання температури в штампі при різних значеннях часу контакту штампу з заготовкою можна отримати шляхом суперпозиції рішень для джерела тепла і стоку з відомими постійними щільностями. Стік припиняє дію джерела тепла і цим обмежує час його дії. Температура в стрижні від джерела і стоку в період часу, що відповідає вирівнюванню температури, описується виразом

$$\theta(\tau) = \theta_K \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_1}} - \sqrt{\frac{\tau}{\tau_1} - 1} \right). \quad (1.8)$$

Контактні температури при штампуванні з різними швидкостями в початковий час при рівних початкових температурах заготовки і штампу однакові. Однак при цьому розподіл температури в штампі істотно відрізнятиметься. При швидкісному штампуванні має місце найбільш нерівномірний розподіл температури по глибині штампу, тобто штамп у цьому випадку менш нагрітий по глибині. Це означає, що при відведенні штампу від заготовки теплота, зосереджена поблизу контактної поверхні штампу, буде вирівнюватися - відводиться в глиб штампу з найбільшою швидкістю, внаслідок чого середня за часом температура поверхневих шарів штампу знижуватиметься найбільшою мірою.

При високошвидкісному штампуванні на молотах та гідрогвинтових пресах час деформування знаходиться в межах (0,001-0,006 с). При цьому середня густина теплового потоку досягає значень 200-500 МДж/м².

Час деформування при штампуванні на молотах зазвичай знаходиться в межах 0,012-0,014 с. При цьому середня щільність теплових потоків, що надходять до штампу, знаходиться в межах 110–160 МДж/м².

Пресові інструменти працюють за умов найповільнішого деформування. Час деформування при роботі на пресах знаходиться в межах від 0,1 до 0,4 с, а середня щільність теплових потоків змінюється від 20 до 50 МДж/м².

Таким чином, пресові штампи необхідно більш ефективно і ретельно охолоджувати в перервах між штампуванням деталей, ніж молотові штампи. Для запобігання надмірному підвищенню температури штампів їх у процесі роботи безперервно охолоджують, розбризкуючи краплі води за допомогою стисненого повітря на поверхні штампів (див. рис. 1.9). Охолодження струменем води або емульсії не допускається, так як в умовах коливань контактної температури воно викликає інтенсивне розтріскування поверхні штампу. Крім того, поверхні штампів періодично (після кожного штампування) змочують мазутом або сольовим розчином, а також посипають тонким шаром тирси. Після вигорання нанесених речовин на поверхні штампів

утворюються плівки, що перешкоджають ідеальному контакту та теплообміну штампів з нагрітою заготовкою. Це особливо важливо для нижньої половини штампів, з якою заготовка знаходиться в контакті більше часу, ніж з верхньою.

При штампуванні складних деталей, що характеризуються великою питомою роботою і великим тепловиділенням в процесі їх деформування (наприклад, деталей типу колінчастих валів), щоб уникнути перегріву штампів дещо зменшують температуру нагрівання заготовок.

Для зменшення перегріву штампів нерідко змушені обмежувати продуктивність штампування, даючи час на вирівнювання температури і на відведення тепла в масивні частини ковальсько-пресового обладнання.

Коливання температури поверхні штампів становлять велику небезпеку у зв'язку з температурними напруженнями, що виникають при цьому, і деформаціями, що призводять до виникнення тріщин на поверхні штампів. Для зменшення амплітуди коливань температури та теплових потоків, що надходять у штамп із заготовки, штамп перед початком роботи попередньо нагрівають до температури 200–250°C.

У зв'язку з характером роботи ковальсько-пресового обладнання температура контактних поверхонь штампів циклічно змінюється. Коливання температури викликають у матеріалі штампів термічні напруження. З часом роботи штампів на його робочих поверхнях можуть виникати і розвиватися термічні тріщини, що є причиною спотворення профілю або руйнування струмків штампів.

1.5 Пресування: схеми процесу, продукція, інструмент

Пресування – це процес надання металу форми шляхом видавлювання його із замкнутого об'єму (контейнера) через канал, утворений пресовим інструментом. Цю операцію називають видавлюванням.

До найбільш поширених різновидів пресування відносяться пресування з прямим видавлюванням і пресування зі зворотним видавлюванням.

Пресування з прямим видавлюванням (пряме пресування), рис. 1.11, застосовують для отримання суцільних або порожнистих профілів.

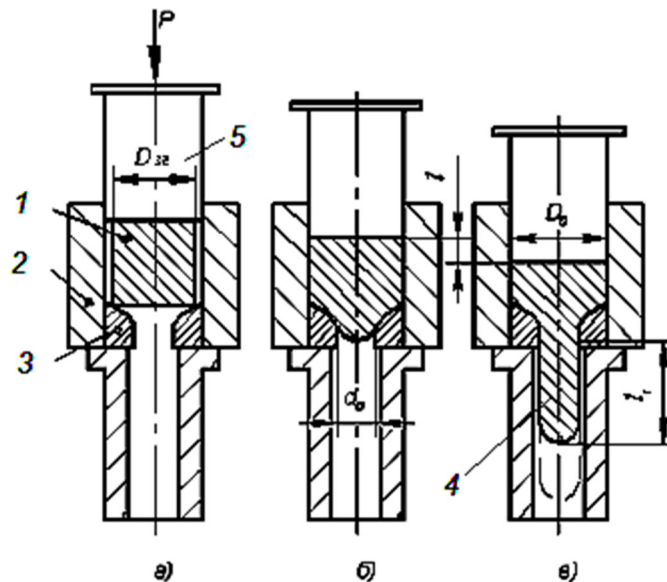


Рисунок 1.11 – Схема пресування з прямим видавлюванням:

1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – матриця, 4 – виріб, 5 – пуансон

Метал заготовки 1, закладеної в контейнер преса 2, під впливом сил, створюваних пуансоном, який рухається в напрямку стрілки, затікає в канал матриці 3. В результаті створюється заданий прес-виріб 4, що видавлюється і переміщується в процесі пресування відносно контейнера в напрямку, що прямо збігається з рухом пуансона. При прямому пресуванні потрібно прикладати значно більше зусилля, оскільки деяка його частина витрачається на подолання тертя при переміщенні металу заготовки всередині контейнера. Прес-залишок становить 18–20 % від маси заготовки (у деяких випадках до 30–40 %), але процес характеризується високою якістю поверхні та простою схемою пресування.

Пресування зі зворотним витіканням (зворотне пресування) застосовується також при пресуванні суцільних або порожнистих профілів. У конструктивному виконанні, відповідному схемою рис. 1.12, випресований

метал заготовки 2 рухається в напрямку, зворотному напрямку руху пуансона 3 щодо контейнера 1. Важлива особливість цього способу пресування – відсутність переміщення заготовки щодо контейнера. Зворотне пресування потребує менших зусиль, прес-залишок становить 5 – 6%. Однак менша деформація призводить до того, що пресований пруток зберігає сліди структури литого металу.

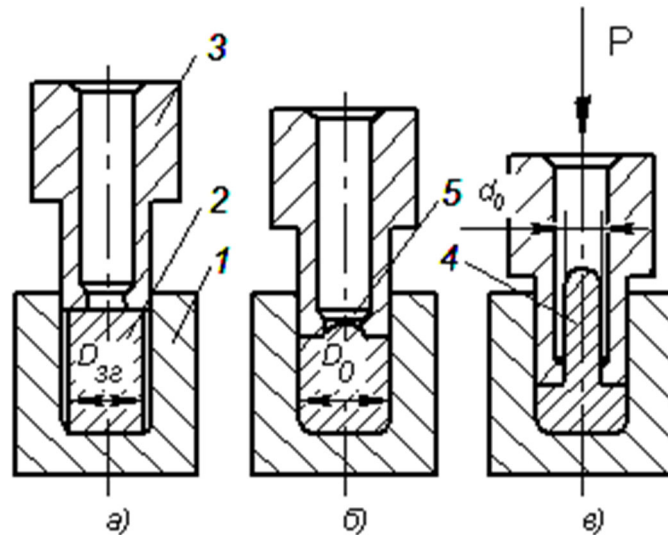


Рисунок 1.12 – Схема пресування із зворотним витіканням:

1 – контейнер, 2 – злиток, 3 – пуансон, 4 – виріб, 5 – матриця

Пресування найчастіше проводиться за високих гомологічних температур, тобто за умов гарячої деформації. У холодному стані пресують метали з порівняно невисокими властивостями міцності.

Для зниження зусилля деформування та підвищення рівномірності деформації по перерізу пресованого профілю при пресуванні застосовуються мастила: при холодному пресуванні – мило та мінеральні масла, а при гарячому – рідке скло та порошкоподібний графіт.

Пресуванням отримують складні профілі різного перерізу довжиною до 25-35 м, прутки діаметром 5-200 мм, труби гладкі і ребристі діаметром до 400 мм і вище при товщині стінок 1,5-8 мм.

До технологічних переваг процесу пресування відносяться: висока пластичність матеріалу, що пресується, за рахунок створення умов всебічного нерівномірного стиснення; можливість отримання пресуванням складних профілів; швидкість та легкість переналагодження пресування з одних видів та розмірів профілів на інші шляхом заміни матриць; підвищені якість та точність профілів виробів; висока продуктивність (до 5 м/хв).

До технологічних недоліків процесу пресування відносяться: обмеження довжини та маси заготовок; значну витрату металу через залишення прес-залишків, а також збільшення технологічних зусиль деформування та зношування інструменту, особливо при прямому пресуванні.

1.6 Деформації, робота та зусилля деформування при пресуванні

Деформований стан заготовок круглого профілю - такий самий, як і при волочінні. Відмінністю є лише великі за величиною обтискання і зсувні деформації.

Інтенсивність деформацій при пресуванні (видавлюванні), також як і при волочінні круглих профілів, розраховується наступним чином:

$$\varepsilon_i = \sqrt{4 \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \frac{16}{3} \left[\frac{\Delta \rho}{r} \right]^2} = \sqrt{\varepsilon_{zu}^2 + \frac{16}{3} \varepsilon_{z\rho}^2}, \quad (1.9)$$

$$\text{де } \varepsilon_{zu} = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon_z) = 2 \ln \frac{R}{r} = \ln \frac{F_0}{F_1} = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (1.10)$$

$$\varepsilon_{z\rho} = \frac{\partial U_z(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\Delta \rho}{r} \frac{\rho}{r}. \quad (1.11)$$

При обчисленні питомої роботи в типових для пресування умовах гарячої деформації межу плинності матеріалу, що деформується, можна вважати приблизно постійною.

$$A_W(\varphi, \rho, z) = \sigma_T \varepsilon_i. \quad (1.12)$$

На величину межі плинності найбільший вплив надають вихідні механічні властивості металу і температура деформування. Середня питома робота деформації має бути обчислена з урахуванням зміни інтенсивності деформації залежно від радіусу ρ .

$$\begin{aligned} A_{W,cp} &= \frac{1}{V_0} \iiint \sigma_i \varepsilon_i \rho \, d\rho \, d\varphi \, dZ = \\ &= \frac{2\pi H_0 \sigma_T}{V_0} \int_0^r \sqrt{4 \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 + \frac{16}{3} \left[\frac{(B-A)}{r^2} \rho \right]^2} \rho \, d\rho = \\ &= \frac{\sigma_T}{8 \left(\frac{B-A}{r} \right)^2} (\varepsilon_i^3 - \varepsilon_{Z,u}^3) = \sigma_T \frac{(\varepsilon_i^3 - \varepsilon_{Z,u}^3)}{8 [\varepsilon_{z\rho}(r)]^2}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Таким чином, середня питома робота деформації при пресуванні (видавлюванні) залежить від межі плинності деформованого матеріалу, інтенсивності деформацій, а також від кутових та лінійних компонентів тензора деформації. Знаючи середню питому роботу деформації та об'єм металу, що пресується в одиницю часу, визначимо потужність, необхідну на деформування:

$$N_\partial = A_{W,cp} \cdot \pi R^2 v_n. \quad (1.14)$$

Зусилля пресування є однією з основних технологічних характеристик процесу, що визначає вибір устаткування.

Сила деформування може бути обчислена як відношення потужності деформування на швидкість переміщення пуансона:

$$P_\partial = \frac{N_\partial}{v_n} = \frac{A_W V}{v_n} = A_W \pi R^2 = \frac{\sigma_T \pi R^2}{8 [\varepsilon_{z\rho}(r)]^2} (\varepsilon_i^3 - \varepsilon_{zu}^3). \quad (1.15)$$

Додаткове тертя заготовки про стінки контейнера і матриці враховується силою тертя:

$$P_{mp} = 2\pi(Rh_3 + rh_m)\tau_T = 2\pi(Rh_3 + rh_m)\mu\frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}. \quad (1.16)$$

Зусилля пресування не є постійним по ходу процесу: спочатку, у міру заповнення всіх порожнин в контейнері і матриці зусилля пресування зростає, на початку стаціонарного перебігу воно максимальне, потім дещо знижується, а в кінці процесу – знову зростає.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ФОРМОЗМІНЕННЯ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ ШТАМПУВАННІ У ВІДКРИТИХ І ЗАКРИТИХ ШТАМПАХ ТА ВИДАВЛЮВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК ТИПУ «СТАКАН» З ВІДПАЛЕНОЇ СТАЛІ 20Х

2.1 Анізотропія матеріалу, що видавлюється

Анізотропний матеріал - матеріал, що має у різних напрямках різні властивості. Анізотропія механічних властивостей металевих матеріалів зумовлена, по-перше, особливостями їхньої кристалічної будови, а, по-друге, особливостями структури, що виходить в результаті обробки методами пластичного деформування. Кристалічна анізотропія також називається *гомогенною анізотропією* і є наслідком анізотропії самого кристала, що становить основу металу. Оскільки метали складаються з великої кількості хаотично орієнтованих відносно один одного мікроскопічних кристалів, пов'язаних у зерна, взаємна орієнтація яких дуже різноманітна, то це призводить до практично повної відсутності гомогенної анізотропії у полікристалічних металів.

При обробці металів тиском з'являється *текстура*, тобто певна орієнтація складових структури зерен та міжзеренних включень, викликана їх витягуванням вздовж напрямку пластичного деформування при обробці тиском. Анізотропія, зумовлена орієнтацією структури матеріалу, називається *гетерогенною анізотропією*. У металевих матеріалів після прокатки або пресування, як правило, виникає волокниста, рядкова та пластинчаста структура. Волокниста і рядкова структура характерна для сталей, а пластинчаста - для алюмінієвих сплавів (їх зерна мають форму не волокон, а пластин, що сприяє утворенню шаруватої структури матеріалу та ще більшому прояву анізотропії). Наприклад, у гарячекатаній сталі 20Х межа текучості поздовжніх волокон $\sigma_{\text{позд}} = 335$ МПа, а межа текучості поперечних волокон

$\sigma_{\text{попер}} = 311$ МПа. У загартованого і природно зістареного алюмінієвого сплаву Д16 після пресування $\sigma_{\text{позд}} = 390$ МПа, а $\sigma_{\text{попер}} = 293$ МПа. До гетерогенної анізотропії також відносять конструктивну анізотропію, що виявляється, наприклад, у шаруватих або волокнистих композиційних матеріалів, при якій різниця поздовжнього і поперечного напруження плинності ще більше зростають.

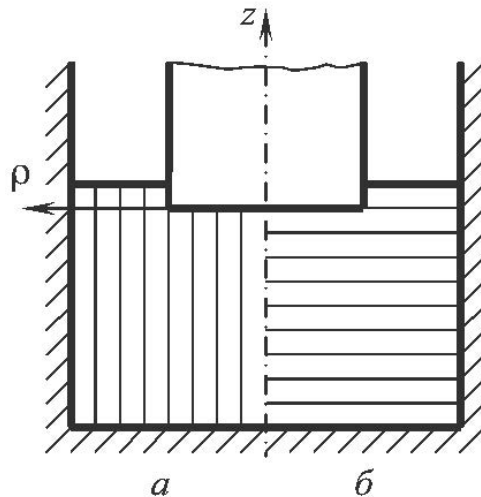


Рисунок 2.1 – Схема можливого розміщення волокон в структурі заготовки, що видавлюється

Отже, на силу деформування та одержувані властивості при видавлюванні заготовок з гарячекатаних або пресованих прутків впливає волокниста структура, що обумовлює вихідну анізотропію властивостей матеріалу, що видавлюється, при якій міцнісні властивості поздовжніх волокон значно вище, ніж поперечних волокон. Ці співвідношення необхідно брати до уваги при холодному деформуванні (рис. 2.1а).

Зокрема, при холодному видавлюванні заготовку раціонально розташовувати так, щоб напрямок її волокон був перпендикулярним напрямку сили деформування (рис. 2.1б).

Питому силу початку деформування анізотропного матеріалу можна визначити за формулою

$$q_{a.\text{початк}} = \frac{1,732 \cdot \sigma_{sz}}{\sqrt{4 - k_a^2}} \cdot q \quad (2.1)$$

У рівнянні (2.1) відносна питома сила q розраховується за формулами відповідних розділів (для видавлювання порожнистих виробів, включаючи розділи про видавлювання суцільних ступінчастих стрижнів і трубних виробів). Коефіцієнт анізотропії

$$k_a = \frac{\sigma_{s\rho}}{\sigma_{sz}} \quad (2.2)$$

де $\sigma_{s\rho}$ і σ_{sz} – напруження течії анізотропного матеріалу в осьовому і радіальному напрямках (рис. 2.1). Коефіцієнт в чисельнику формули (2.1) отримано з умови, що при $\sigma_{s\rho} = \sigma_{sz}$ ($k_a = 1$) формула (2.1) переходить у вираз для визначення питомої сили деформування $q_{\text{пит}}$ ізотропного матеріалу, тобто матеріалу з однаковими властивостями в усіх напрямках.

У точній постановці для обліку зміцнення необхідно мати дві криві зміцнення, отримані шляхом випробування зразків, вирізаних із заготовки в осьовому (для визначення σ_{sz}) і радіальному (для визначення $\sigma_{s\rho}$) напрямках. Знайшовши накопичену деформацію ϵ_i ; за цими кривими можна встановити відповідні значення напруги плинності $\sigma_{s\rho}$ і σ_{sz} , а потім провести необхідний розрахунок за формулами (2.1) та (2.2).

Для спрощення розрахунків можна прийняти коефіцієнт анізотропії постійним, рівним відношенню відповідних меж плинності, а зміцнення враховувати за допомогою однієї кривої зміцнення, що характеризує зміну напруги плинності σ_{sz} .

Розрахунки показують, що при прикладанні сили деформування вздовж волокон (рис. 2.1а) уточнення за рахунок обліку анізотропії традиційно застосовуваних для видавлювання матеріалів буде незначним (1,5 ... 2,0%). У зв'язку з цим для обчислення питомої сили доцільно використати звичайні формули. Якщо матеріал має значну анізотропію, то для визначення питомої

сили, особливо при видавлюванні поперек волокон (див. рис. 2.1, б), слід застосовувати формулу (2.1).

Приклад 2.1. Визначити зменшення питомої сили при видавлюванні поперек волокон заготовки з анізотропної сталі 20Х порівняно з питомою силою при видавлюванні вздовж волокон цієї ж сталі. Прийняти $R = 1,5$, $\mu = \mu_1 = 0,1$. Зміцнення не враховувати.

Рішення. За літературними даними [1] знаходимо відносну питому силу $q = 3,404$. При видавлюванні вздовж волокон напруга плинності $\sigma_s = \sigma_{\text{позд}} = 335$ МПа, натуральна питома сила деформування $q_{\text{пит}} = \sigma_s \cdot q = 1140$ МПа. При видавлюванні в поперечному напрямку волокон заготовки $\sigma_{sz} = \sigma_{\text{попер}} = 311$ МПа, а $\sigma_{s\rho} = \sigma_{\text{позд}} = 335$ МПа. По формулі (2.2) обчислюємо коефіцієнт анізотропії $k_a = 1,077$, по формулі (2.1) - питому силу початку деформування упоперек волокон $q_{a.\text{початк}} = 1088$ МПа. Таким чином, $q_{\text{пит}}/q_{a.\text{початк}} = 1,05$, тобто питома сила при видавлюванні заготовки в поперечному напрямку її волокон знизиться на 5%.

Приклад 2.2. Уточнити з урахуванням анізотропії питому силу при розрахунку видавлювання вздовж волокон заготовки з алюмінієвого сплаву Д16, що має помітну анізотропію. Порівняти одержані значення з результатами розрахунку питомої сили без урахування анізотропії. Прийняти $R = 1,5$, $\mu = \mu_1 = 0,1$. Зміцнення не враховувати.

Рішення. За літературними даними [1] знаходимо відносну питому силу $q = 3,404$. Напруження плинності без урахування анізотропії $\sigma_s = \sigma_{\text{позд}} = 390$ МПа, і отже питома сила деформування $q_{\text{пит}} = \sigma_s \cdot q = 1328$ МПа. При розрахунку з урахуванням анізотропії $\sigma_{sz} = \sigma_{\text{позд}} = 390$ МПа, а $\sigma_{s\rho} = \sigma_{\text{попер}} = 293$ МПа. По формулі (2.2) обчислюємо коефіцієнт анізотропії $k_a = 0,751$, по формулі (2.1) - питому силу деформування уздовж волокон $q_{a.\text{початк}} = 1241$ МПа. Таким чином, $q_{\text{пит}}/q_{a.\text{початк}} = 1,07$, тобто при однаковій орієнтації

волокон заготовки з алюмінієвого сплаву Д16 уточнення з урахуванням анізотропії сплаву складе 7 %.

2.2 Застійна зона під торцем пуансону

Застійна зона - розташована між осередком пластичної деформації та формотворчим інструментом, це область заготовки, в якій відсутнє зростання пластичної деформації. Основна причина утворення застійної зони - контактне тертя, яке стримує деформацію в приконтактних шарах заготовки. За відсутності мастила застійна зона утворюється під торцем пуансона вже у початковий момент видавлювання. Якщо видавлювання здійснюється з мастилом, то у початковий момент деформування, коли мастильний шар досить ефективний і відповідно коефіцієнт тертя малий, застійна зона відсутня (рис. 2.2, а).

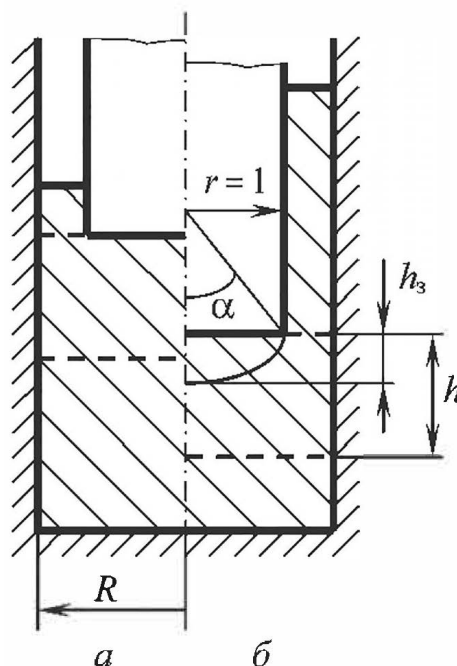


Рисунок 2.2 - Схема утворення застійної зони під торцем пуансону

У міру збільшення робочого ходу мастильний шар виснажується, в результаті чого спочатку утворюється **зона утрудненої деформації** (у цій зоні

накопичена деформація зростає значно менш інтенсивно, ніж у сусідніх зонах осередку пластичної деформації). При подальшому збільшенні робочого ходу пуансона тертя ще більше зростає, і зона утрудненої деформації перетворюється на застійну зону (рис. 2.2 б), в якій практично повністю припиняється зростання накопиченої деформації. В результаті в застійній зоні відбувається значно менше опрацювання металу, а характеристики міцності будуть нижче, ніж в інших частинах виробу. У малопластичних матеріалів можливий сколювання, що починається на межі застійної зони з кромкою торця пуансона і іноді призводить до повного відділення розташованого в цій зоні металу від решти виробу.

У літературі інформація щодо аналітичних методів визначення можливості утворення застійної зони та її розмірів при видавлюванні порожнистих циліндричних виробів обмежена. Розглянемо це питання докладніше.

Численні експериментальні дослідження показують наступне: при видавлюванні стаканів форма внутрішньої межі застійної зони близька до сферичної. Оскільки застійну зону можна розглядати, як продовження пуансона, то приймаємо, що за її наявності видавлювання здійснюється сферичним пуансоном з граничним тертям ($\mu_1 = 0,5$) по торцю. Знайшовши для конкретних значень μ і R кут α , визначальний сферичний торець (див. рис. 2.2), при якому відносна питома сила буде мінімальною, слід порівняти останню з відносною питомою силою для пуансона з плоским торцем при тих самих значеннях μ і R і конкретному значенні μ_1 .

Якщо відносна питома сила при плоскому торці пуансона буде меншою, ніж при сферичному, то це відповідно до принципу найменшої енергії означає, що застійна зона не утворюється. Якщо відносна питома сила при плоскому торці пуансона буде більше, ніж при сферичному, то формується застійна зона розміром $h_3 = h_0$, яка визначається кутом α . Таким чином, утворення застійної зони можна описати нерівністю:

$$1,414\sqrt{\frac{(1+2\mu R)(0,5+\mu_1)}{R^2-1}} > \min_{\alpha} \left(\frac{1-0,5\sin\alpha+2\mu R}{R^2-1} h + \frac{1}{2h} \right), \quad (2.3)$$

де

$$h = \sqrt{\frac{R^2-1}{2(1-0,5\sin\alpha+2\mu R)}}, \quad (2.4)$$

але якщо

$$h < h_0 = h_3 = \frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha}, \quad (2.5)$$

то $h = h_0$.

Отже, алгоритм визначення можливості утворення та розмірів застійної зони буде наступним: 1) обчислення значення лівої частини нерівності (2.3); 2) знаходження методом послідовних наближень за допомогою рівнянь (2.4) і (2.5) кута α , при якому права частина нерівності 2.3 мінімальна; 3) якщо при отриманому значенні нерівність не виконується, то застійна зона не утворюється; 4) якщо нерівність виконується, то для розрахованого значення кута α по рівнянню 2.5 визначаємо найбільший розмір застійної зони.

Розрахунки, виконані за наведеним алгоритмом показали: при хорошому змащуванні ($\mu = \mu_1 = 0,1$) застійна зона не утворюється; при середньому значенні коефіцієнтів тертя $\mu = \mu_1 = 0,3$ застійна зона відсутня для $R < 1,2$, а при граничному терті на торці пуансону ($\mu = 0,3$; $\mu_1 = 0,5$) застійна зона формується у всьому діапазоні значень R (рис. 2.3).

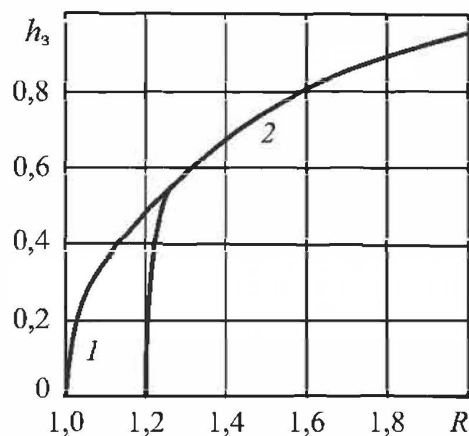


Рисунок 2.3 – Залежність висоти застійної зони від відносного радіусу:

1 – $\mu = 0,3$; $\mu_1 = 0,5$; 2 – $\mu = \mu_1 = 0,3$

При цьому найбільші розміри застійної зони будуть при $R \geq 2$, коли форма застійної зони наближається до півсфери.

Оскільки застійна зона нівелює будь-яку форму торця пуансона, що вписується в півсферу, це пояснює той факт, що спроби оптимізації по силі шляхом підбору в заданих межах форми торця прошивних пуансонів, що використовуються при закритій прошивці великотоннажних злитків ($R \geq 3$), не призвели до позитивного результату.

2.3 Утяжина на зовнішній кромці дна виробу

Утяжина - дефект форми виробу, що штампується, пов'язаний з порушенням контакту деформованого матеріалу з інструментом. При видавлюванні стаканів утяжина проявляється у вигляді підняття дна виробу в зоні його переходу до зовнішньої поверхні стінки стакана (рис. 2.4). Як правило, це є істотним недоліком, оскільки форма і розміри виробу, що штампується, повинні визначатися геометрією штампувального інструменту, а не випадковими факторами, що призводять до нестабільної мимовільної геометрії.

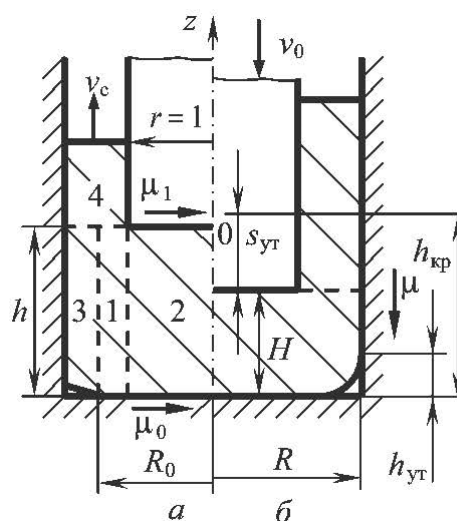


Рисунок 2.4 – Розрахункова модель, що дозволяє описати процес утворення утяжини при видавлюванні стакана (1 – 4 – області)

Відповідно до розробленого загального методу, для прогнозування утворення утяжин при штампуванні необхідно виконати таке.

1. Вибрати розрахункову геометричну модель, що дозволяє одночасно описати два можливі варіанти перебігу металу в аналізованому способі штампування: з утворенням утяжини і без її утворення.

2. Визначити кінематично можливе поле швидкостей течії для більш загального варіанта течії з утворенням утяжки.

3. Отримати енергетичне рівняння завдання з урахуванням наявних граничних умов обраної моделі та встановленого поля швидкостей (оскільки цікавить запобігання утяжини, а не дослідження течії металу за її наявності, то вирішувати складне завдання з рівняннями рівноваги та визначенням напруженого стану недоцільно). В даний час найбільш часто застосовують співвідношення теорії пластичного перебігу, тому краще замість рівняння балансу робіт використовувати рівняння балансу потужностей

$$W_q = W_\sigma + W_\Delta + W_\tau \quad (2.6)$$

де W_q – потужність деформації; W_σ – потужність внутрішніх сил у пластично деформованому об'ємі V ; W_Δ – потужність, що розвивається максимальною дотичною напругою на всіх поверхнях розриву швидкостей; W_τ – потужність сил контактної тертя на швидкостях ковзання по поверхні контакту.

4. Визначити параметри, при яких енергетично вигіднішим є перебіг металу з утворенням утяжини, з умови мінімуму потужності деформації W_q . Це дозволяє отримати рішення поставленого завдання.

2.4 Макроструктура виробу, що видавлюється

Напрямок волокон структури – важлива характеристика експлуатаційних властивостей виробу, що отримується, особливо при роботі в умовах циклічних або динамічних навантажень. Форма волокон значно

впливає на втомну міцність, зносостійкість, корозійну стійкість і ударну в'язкість. Наприклад, для сталей ударна в'язкість зразків з перпендикулярним до напрямку удару розташуванням волокон може бути в 2,6 – 4 рази вище, ніж у зразків з паралельним до напрямку удару розташуванням волокон. Для алюмінієвих сплавів таке співвідношення може зрости у 6 разів. Це пояснюється відповідною орієнтацією крихких інтерметалевих сполук, які полегшують зародження та розповсюдження тріщин.

Внаслідок того, що при обробці різанням волокна перерізаються, підвищується чутливість деталі до концентрації напруг і знижуються показники властивостей міцності. Тому при штампуванні необхідно прагнути до того, щоб направлення волокон відповідало формі деталі, що отримується. Як правило, повну еквідистантність волокон та поверхні виробу забезпечити не вдається. У зв'язку з цим важливо визначити показники викривлення волокнистої структури.

Для з'ясування, які показники є важливими при видавлюванні циліндричних стаканів, розглянемо загальну схему переміщення металу (рис. 2.5).

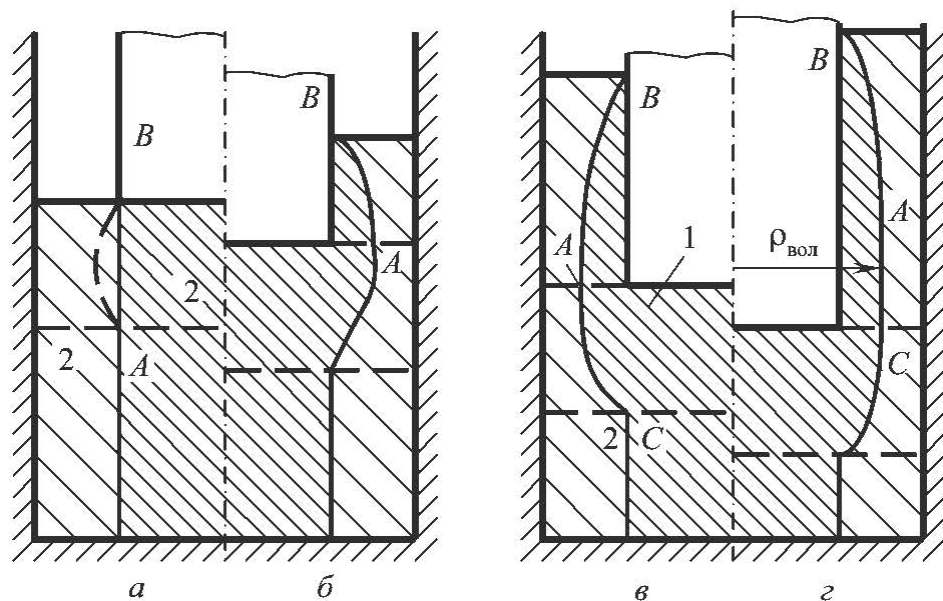


Рисунок 2.5 – Схеми переміщення металу під час видавлювання:

1 – центральна область заготовки; 2 – периферійна область заготовки

У процесі робочого ходу пуансон витісняє метал розташованої під ним центральної області заготовки (поз. 1, рис. 2.5) у напрямку матриці з подальшим переміщенням у стінку стакану, що утворюється. У початковий момент видавлювання межі центральної області відповідає вертикальне волокно, що знаходиться під кромкою торця пуансона (суцільна лінія, на рис. 2.5 а). Точка, що належить цьому волокну, відразу ж переміщається з осередку пластичної деформації в жорстку стінку, що утворюється, тому її радіальне положення залишається незмінним. Оскільки точка А, розташована на нижній межі осередку пластичної деформації, належить одночасно й жорсткій області, що не деформується, її радіальне положення в початковий момент деформації також незмінне (див. рис. 2.5, а). Отже, метал, що видавлюється з-під торця пуансона, буде викликати прогин граничного волокна, надаючи йому форму, приблизно показану на рис. (2.5, а) штриховою лінією.

У міру переміщення пуансону та опускання осередку пластичної деформації точка А потрапляє всередину осередку та починає рухатися у радіальному напрямку (див. рис. 2.5, б). У процесі видавлювання метал центральної області заготовки перебуватиме в межах викривленого граничного волокна, витісняючи у стінку стакану, що утворюється, відповідну частину металу периферійної області.

Всі точки волокна, розташовані в початковий момент видавлювання вище точки А (див. рис. 2.5, а), віддалені від верхньої межі осередку деформації на різні відстані, тому вони пройдуть до виходу в стінку стакану різний шлях. У той момент, коли точка А досягне верхньої межі (див. рис. 2.5, г), точка С, що вийшла на нижню межу, буде віддалена від верхньої межі на ту ж саму відстань, що і точка А в момент початку видавлювання (див. рис. 2.5 а). Таким чином, всі точки волокна, що розглядається, і що знаходяться нижче точки А, будуть проходити до виходу в стінку стакану один і той же шлях, набуваючи в момент виходу ту ж радіальну координату, що і точка А. Це означає наступне: починаючи з моменту виходу точки А на верхню межу

осередку деформації (див. рис. 2,5, в), найбільша радіальна координата граничного волокна перестане змінюватися. Тому при подальшому видавлюванні (див. рис. 2.5, г) граничне волокно на ділянці АС стане еквідистантним утворюючої стінки стакану. Відповідну еквідистантність набудуть і всі волокна структури, що лежать між граничним волокном та стінкою матриці.

Повний вихід у стінку стакану волокон, розташованих поблизу осі симетрії, при реальному видавлюванні принципово неможливий. Наведемо якісний доказ.

В силу симетрії волокно, розташоване на осі симетрії, не може бути видавлено ні в ліву, ні в праву частину стінки стакану, тобто воно залишиться на осі симетрії при будь-якому, скільки завгодно великому, робочому ході (наочно це добре видно на деформованих координатних сітках видавлених стаканів, див. рис. 2.6).

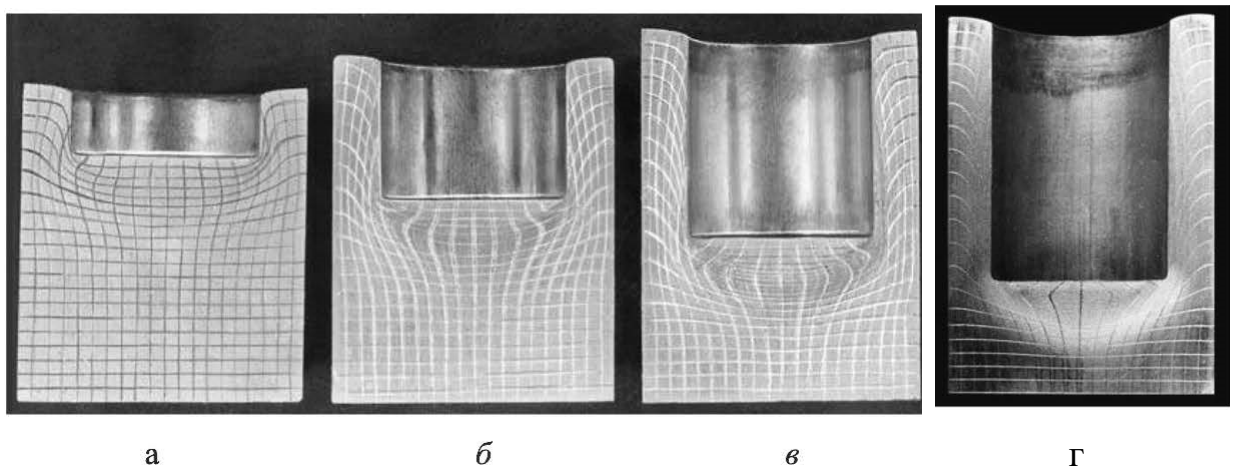


Рисунок 2.6 – Зміна координатних сіток у процесі холодного видавлювання зразків з алюмінієвого сплаву АВ при $s = 0,5$ (а), 1 (б), 1,5 (в), 2 (г)

Чим ближче волокна до центрального волокна, тим більше значення робочого ходу потрібно для їх видавлювання у відповідну частину стінки. Далі буде показано, що навіть при відсутності застійної зони під торцем пуансону

(за її наявності багато волокон центральної області не зможуть вийти в стінку стакана) значення робочого ходу, потрібне для виходу в стінку стакана значної частини волокон, які розташовані в зоні осі симетрії, набагато перевищує реально досягнуте значення у процесі видавлювання.

У розглянутому вище доказі знову порушено питання про неможливість стаціонарної стадії видавлювання стаканів, але вже стосовно змін структури заготовки, що видавлюється. Оскільки існування стаціонарної стадії видавлювання стаканів описується навіть у багатьох авторитетних роботах, додатково наведемо і таке спростування.

Якби процес видавлювання, починаючи з деякого моменту часу, став стаціонарним, це означало б не тільки припинення зростання накопиченої деформації, але і те, що з цього моменту структура частини виробу, що видавлюється, також перестала б змінюватися. Допустимо, для дослідження зміни структури в процесі видавлювання на вихідну заготовку нанесені горизонтальні лінії (рис. 2.7 а).

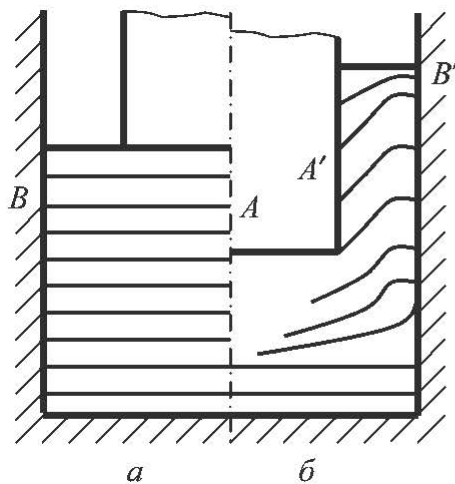


Рисунок 2.7 – Схема до обґрунтування неможливості стаціонарної стадії видавлювання

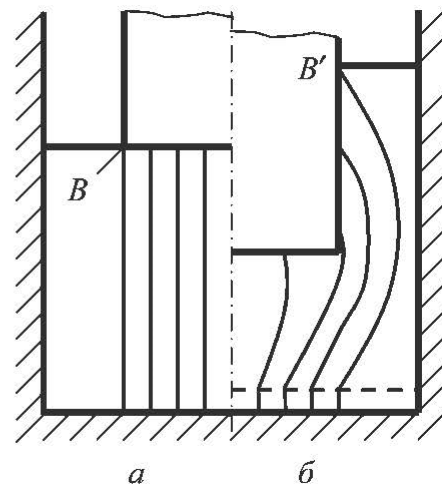


Рисунок 2.8 – Схема розташування верхніх кінців волокон центральної області у стінці стакана

У момент настання стаціонарної стадії відповідна лінія АВ повинна повністю переміститися в стінку стакана, що утворилася, зайнявши умовне

положення А'В' (рис. 2.7, б). Якщо точка А' залишиться на осі симетрії в осередку деформації, то при продовженні видавлювання ця точка опуститься вниз, в той час як точка В' разом зі стінкою стакана підніметься вгору. Це означатиме продовження розтягування та зміни форми лінії А'В' по ходу видавлювання, тобто подальше збільшення деформації та зміна структури, що суперечить прийнятій умові стаціонарності. Крім того, для виконання такої умови всі лінії, розташовані нижче за лінію АВ, повинні повністю повторювати її шлях і займати в стінці стакана еквідистантне положення (див. рис. 2.7, б).

Ця необхідна умова стаціонарності вимагає розриву по ходу видавлювання горизонтальних ліній на осі симетрії для переміщення в ліву та праву частини стінки стакана, тобто порушення суцільності, що не спостерігається насправді. Таким чином, зіставлення спотворення горизонтальних ліній з реальним спотворенням горизонтальних ліній координатної сітки (див. рис. 2.6) повністю спростовує наявність стаціонарної стадії при видавлюванні стаканів.

Розглянемо, як розташовуватимуться у видавленій стінці стакану вертикальні волокна, що спочатку перебувають у центральній області заготовки під торцем пуансона (рис. 2.8, б). Як було зазначено вище, в момент початку видавлювання верхня точка В граничного волокна відразу ж вийде з осередку пластичної деформації в жорстку стінку, що утворюється, і її радіальне положення залишиться незмінним. В результаті граничне волокно набуде вигляду, показаного на рис. 2.5 б і на рис. 2.8, б. Внаслідок радіального переміщення в процесі видавлювання верхня точка наступного волокна в певний момент часу також досягне кромки пуансона і перейде в стінку стакану, розташовуючись на її внутрішній поверхні. Поступово на внутрішню поверхню стінки стакану перемістяться верхні точки інших волокон. У результаті волокна матимуть характерний вигляд, показаний на рис. 2.8 б, відповідний вільному переміщенню під торцем пуансона. При утрудненому

перебігу металу чи наявності застійної зони волокна набувають ще складнішу форму.

Отже, всередині області, яка не виходить за межі граничного волокна (див. рис. 2.5, г), ділянки волокон, розташовані в безпосередній близькості від внутрішньої поверхні стінки стакану, завжди матимуть криволінійну форму, тобто ніколи не будуть паралельні цій поверхні. Таким чином, твердження (засноване на розрахунках методом кінцевих елементів), що волокна, що знаходяться в безпосередній близькості від внутрішньої поверхні стінки стакану, паралельні цій поверхні, є помилковим.

Оскільки аналітичний метод визначення структури виробу, що отримується в результаті деформації, у літературі відсутній, розглянемо розроблений загальний метод вирішення такого завдання.

З точки зору механіки структура деформованого виробу є сукупністю матеріальних точок, кожна з яких має певні початкові координати, тоді розрахунок параметрів такої структури зводиться до визначення положення (координат) цих точок після пластичної деформації. Для цього необхідно:

- 1) вибрати розрахункову геометричну модель, що дозволяє описати можливий перебіг металу в аналізованому способі обробки тиском. Починати краще з найпростіших моделей. Якщо результат не задовольнить дослідника, модель можна поступово ускладнювати;

- 2) визначити для обраної розрахункової моделі кінематично можливе поле швидкостей течії. При строгій постановці для обліку впливу на полі швидкостей різних параметрів пластичного перебігу потрібне вирішення складного завдання взаємопов'язаного визначення напруженого, кінематичного та деформованого станів заготівлі. Однак на практиці, особливо у випадках досить певної течії металу, часто виявляється прийнятним завдання поля швидкостей течії без розв'язання згаданої взаємозалежної задачі. Якщо результат не задовольнить дослідника, поле швидкостей можна поступово

ускладнювати. У багатьох випадках це призводить до досягнення необхідної точності навіть без ускладнення вихідної геометричної моделі;

Як приклад практичної реалізації цього методу розглянемо вільне видавлювання циліндричної стакана. Для вирішення задачі виберемо досить просту геометричну схему (рис. 2.9). На цій схемі осередок пластичної деформації представлений у вигляді двох областей: кільцевій області 1, розташованій під стінкою стакана, що утворюється, і циліндричної області 2, що знаходиться під торцем пуансона. Нижче цих областей лежить тверда область 4, в якій зосереджена недеформована частина металу заготовки, а вище - жорстка область 3, що відповідає видавленій стінці стакана.

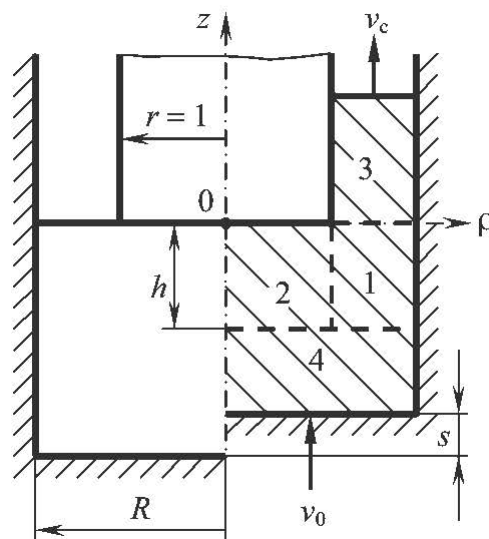


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема визначення структури деформованого виробу: 1 – кільцева область; 2 – циліндрична область; 3,4 – жорсткі області

Переміщення пуансона вниз зі швидкістю v_0 і переміщення осередку пластичної деформації дещо ускладнюють розуміння процесу деформації волокон структури, оскільки до швидкостей пластичного перебігу матеріальних частинок додається переносна швидкість зміщення осередку. Тому для спрощення розуміння приймемо, що пуансон і, відповідно, початок координат на його поверхні умовно нерухомі. При такому представленні

подача металу в осередок деформації через відносність руху здійснюється переміщенням матриці вгору зі швидкістю v_0 .

Обчислення показують, що при великому значенні ходу видавлювання ($s \geq 0,5$) висота осередку пластичної деформації змінюється незначно. Оскільки при виведенні розрахункових формул висота приймалася незалежною від часу, при виконанні зіставних розрахунків, що характеризують зміну структури для декількох значень робочого ходу, найбільш коректно використовувати для цих значень одне і те ж середнє значення висоти. Це середнє значення можна знайти або як середнє арифметичне значення висот, обчислених для досліджуваних значень робочого ходу, або як середнє значення робочого ходу.

Будь-який заданий елемент вихідної структури заготівлі (наприклад, волокно, показане суцільною лінією на рис. 2.10, а, або характерне скупчення зерен, рис. 2.10 б) можна описати сукупністю точок, що характеризуються початковими координатами ρ_0, z_0 . Тоді завдання розрахунку зміни форми цього елемента в процесі деформації зводиться до визначення положення вибраних точок при заданому значенні робочого ходу (штрихова лінія, див. рис. 2.10), тобто кінцевих координат ρ, z .

При такому підході складність форми елемента вихідної структури значення не має, оскільки призводить лише до зміни початкових координат обраних для розрахунку точок, не накладаючи жодних обмежень на використання розробленого методу. Наприклад, можна з рівним успіхом розраховувати не тільки зміну при видавлюванні волокнистої структури заготовки, в якій вихідні волокна були паралельні осі, але і зміну структури заготовки, в якій вихідні волокна були складним чином викривлені в результаті попереднього калібрування осадом або калібрування з утворенням намітки під прошивку.

Якщо здійснюється розрахунок зміни форми спочатку прямих вертикальних волокон, число розрахункових точок може бути обрано порівняно невеликим. Це пов'язано з тим, що всі точки, спочатку розташовані

в жорсткій ділянці 4 нижче точки А, що належить нижній межі осередку пластичної деформації (рис. 2.10, в), потраплятимуть по ходу видавлювання на цей кордон з тими ж координатами (ρ_1, z_1 або ρ_2, z_2), що і початкові координати точки А. Тому ці точки повторюватимуть траєкторію руху точки А (криві 1, 3 на рис. 2.10, в). Отже, якщо характер течії під торцем пуансону в процесі видавлювання не змінився, то на будь-якій вертикальній лінії нижче поточного положення точки А' форма лінії в процесі видавлювання буде незмінною.

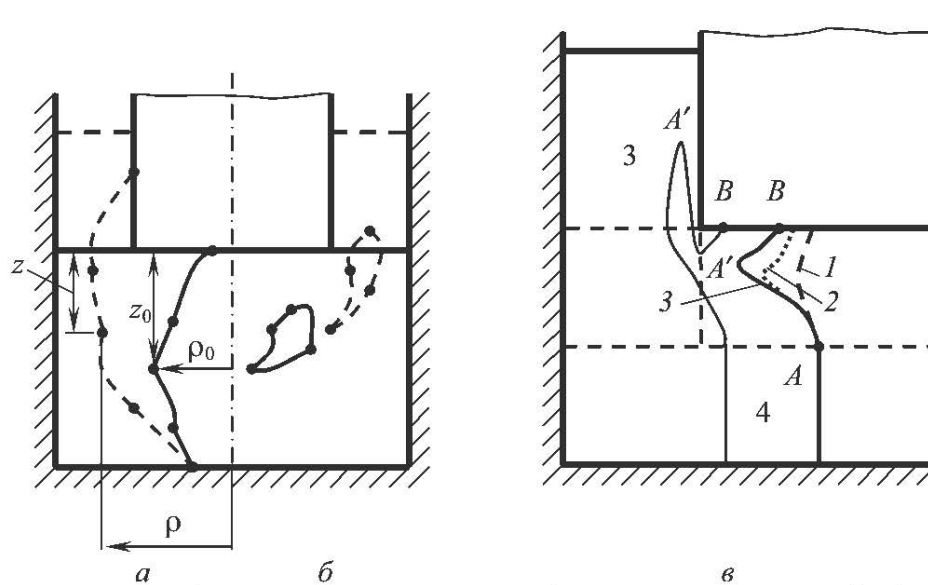


Рисунок 2.10 – Схеми форми елемента структури деформованого виробу (а, б) та зміна форми прямолінійного вертикального волокна в процесі видавлювання (в) $s = 0,5$ (1); 1,0 (2) і 1,5 (3)

Іншими словами, поточне положення точки А' визначає область стаціонарних траєкторій, що лежить нижче. Таким чином, в момент часу, коли точка А' вийде на межу осередку деформації зі стінкою стакана, що утворюється в області 3, рух на лінії між точкою А' і нижньою межею осередку пластичної деформації стане повністю стаціонарним.

Треба зазначити, що це не означає настання стаціонарності і на ділянці лінії А'В. Залежно від початкового положення та умов течії точка В може не вийти в стінку стакана при заданому або при будь-якому значенні робочого

ходу. Наприклад, за наявності застійної зони типове волокно має вигляд, показаний на рис. 2.10, в суцільною тонкою лінією. У цьому випадку точка В, розташована в застійній зоні, нерухома, і, отже, ділянка волокна А'В по ходу видавлювання безперервно розтягується, а частина цієї ділянки, що знаходиться в осередку деформації, змінює свою форму при будь-якому, скільки завгодно великому, значенні ходу видавлювання. Спідні відносно точки А' гілки волокна можуть бути розташовані дуже близько один до одного, візуально утворюючи як би одну розмиту лінію, що потовщується донизу. У зв'язку з цим дослідники іноді помилково вважають, що точка А' відповідає точці В, що повністю вийшла в стінку стакану. Ця помилка обумовлює поширену некоректну думку про існування повністю стаціонарної стадії видавлювання. Насправді стаціонарна стадія настає лише у певній зоні, що примикає до зовнішньої поверхні стінки стакану. Під торцем пуансона і відповідно в зоні, що примикає до внутрішньої поверхні стінки стакану, видавлювання за будь-якого значення робочого ходу залишиться нестаціонарним.

Приклад розрахунку.

Перед видавлюванням заготовка з відпаленої сталі 20Х була піддана закритому формуванню з утворенням намітки в матриці радіусом $R = 1,3$ (рис. 2.11 поз, 1). В результаті характерне волокно структури заготівлі набуло форми, показаної на рис. 2.11 (поз. 2). Потім було виконано холодне вільне видавлювання фосфатованої та омиленої заготовки в матриці з тим самим радіусом при ході $s = 0,7$. Необхідно визначити, яку форму отримало волокно в момент закінчення видавлювання, прийнявши, що течія під торцем пуансону на ділянці ходу $s_{св} = 0,3$ була вільною, а на ділянці ходу $s_{затр} = 0,4$ – утрудненою. Початкові координати точок волокна наведені нижче:

Рішення.

Для проміжного значення робочого ходу $s_{св} = 0,3$ приймаємо $\mu = \mu_1 = 0,05$.

ρ_0	0,70	0,78	0,80	0,79	0,74	0,66	0,60		
z_0	0	-0,20	-0,40	-0,60	-0,80	-1,00	-1,20	-1,40	-1,60
ρ	1,00	1,036	1,074	1,109	1,127	1,047	0,795	0,60	0,60
z	0,06	0,708	0,675	0,50	0,125	-0,338	-0,531	-0,70	-0,90

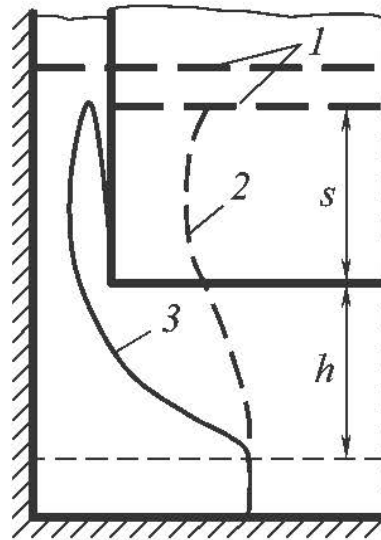


Рисунок 2.11 – Схема зміни форми криволінійного волокна по ходу видавлювання:

1 – верхня частина відформованої заготовки; 2, 3 – проміжна і остаточна форма волокна

З урахуванням того, що $k_y = 0,993$, знаходимо висоту осередку пластичної деформації по формулі (2.7):

$$h_e = h_y = h[1 + k_y(1 - 0,2e^{-s} - 0,8e^{-5s})] = 0,684. \quad (2.7)$$

Результати розрахунку наведено вище. Відповідна до отриманих координат форма остаточного волокна показана на рис. 2.10 (поз 3).

Проведений на початку розділу аналіз дозволяє виділити для подальшого дослідження такі важливі показники волокнистої структури видавленого стакану, які необхідно враховувати в залежності від конкретного призначення виробу (рис. 2.11):

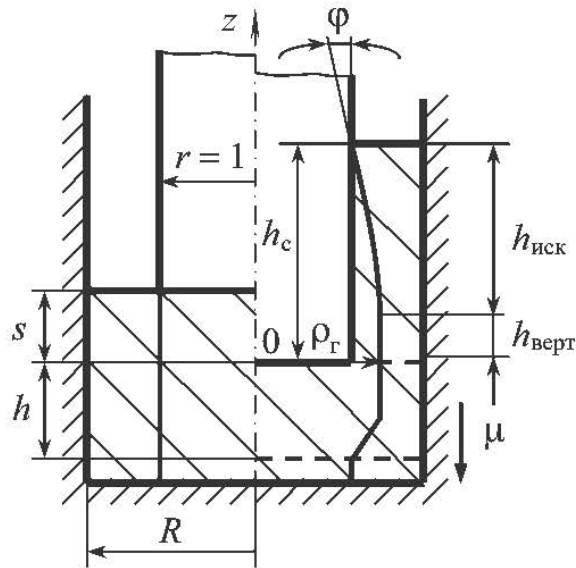


Рисунок 2.11 – Схема для розрахунку геометричних параметрів деформованого волокна структури матеріалу стакану

1) кут виходу волокон структури на внутрішню поверхню стінки стакану φ ;
 2) висоту верхньої ділянки стінки $h_{иск}$, у межах якої з усього поперечного перерізу стінки, волокна будуть викривлені; 3) висоту нижньої ділянки стінки $h_{верт}$, у межах якої на зовнішній частині поперечного перерізу стінки, волокна будуть вертикальні, тобто еквідистантні утворюючій стінки стакану; 4) стаціонарний радіус вертикальної ділянки граничного волокна $\rho_{вол}$ (див. рис. 2,5, г).

Залежність кута виходу волокна на внутрішню поверхню стінки стакану φ від відносного радіусу матриці R і коефіцієнту тертя по матриці μ ($\mu_1 = 0,5$) наведено на рис. 2.10, а. Аналіз отриманих результатів показує, що кут φ при $R = 1,4 \dots 2,0$ змінюється незначно, а при $R = 1,4 \dots 1,0$ значення кута φ різко зменшується до 0. Розрахунки показують, що зі збільшенням тертя між заготовкою та матрицею кут φ також зростає.

Залежності кута φ від відносного радіусу матриці наведено на рис. 2.12, б (по (5.60) ($\mu = 0,1$, $\mu_1 = 0,5$)). Експериментальні залежності отримані по

ділительних сітках і макрошліфам видавлених стаканів (див. рис. 2.6). Найбільша розбіжність у визначенні значень φ становить 5 %.

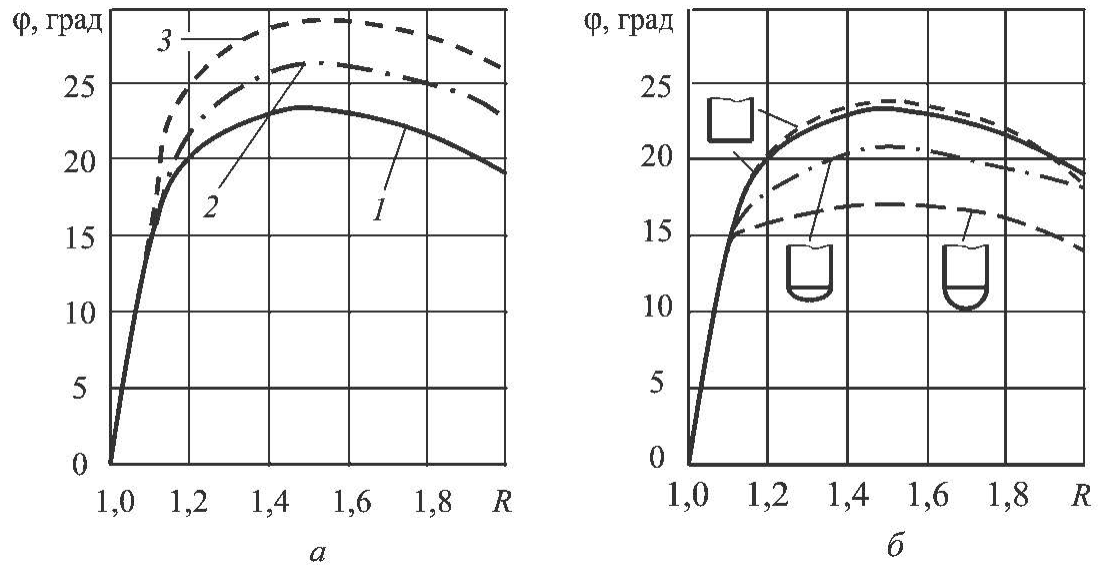


Рисунок 2.12 – Залежності кута φ від відносного радіусу матриці R при $\mu = 0,1$ (1), $0,3$ (2) і $0,5$ (3) (а) і залежність кута φ від відносного радіусу матриці ($\mu = 0,1$) для різних форм пуансону (б): суцільна лінія – розрахунок; пунктирні лінії – експеримент

Згідно рис. 2.12 б, виявлена закономірність зміни кута φ зберігається для різних форм торця пуансона, наприклад, у вигляді сферичного сегмента з $\alpha = 45^\circ$ або півсфери. Найбільше значення кута виходу волокна утворюється при видавлюванні пуансоном з плоским торцем при $R = 1,4 \dots 1,6$, що підтверджується отриманими теоретичними результатами.

2.5 Руйнування

Було встановлено, що в окремих зонах осередку пластичної деформації накопичена деформація безперервно зростає із збільшенням робочого ходу пуансону. При певному значенні робочого ходу вичерпується ресурс

пластичності матеріалу, що видавлюється, що призводить до виникнення тріщин у виробі. Тому для отримання високоякісних виробів необхідно визначити параметри, що потрібні для розрахунку граничної формозміни заготівлі при видавлюванні на основі існуючих теорій руйнування. Такими параметрами є накопичена деформація e_i , гідростатичний тиск σ , у разі яскраво вираженої залежності властивостей матеріалу від швидкості деформації, інтенсивності швидкостей деформації ζ_i в небезпечній точці осередку пластичної деформації.

При видавлюванні найнебезпечнішими точками осередку пластичної деформації є точки А і В, розташовані на його верхній межі (рис. 2.13), оскільки гідростатичний тиск в них малий, а накопичені деформації великі в порівнянні з накопиченими деформаціями в інших точках осередку.

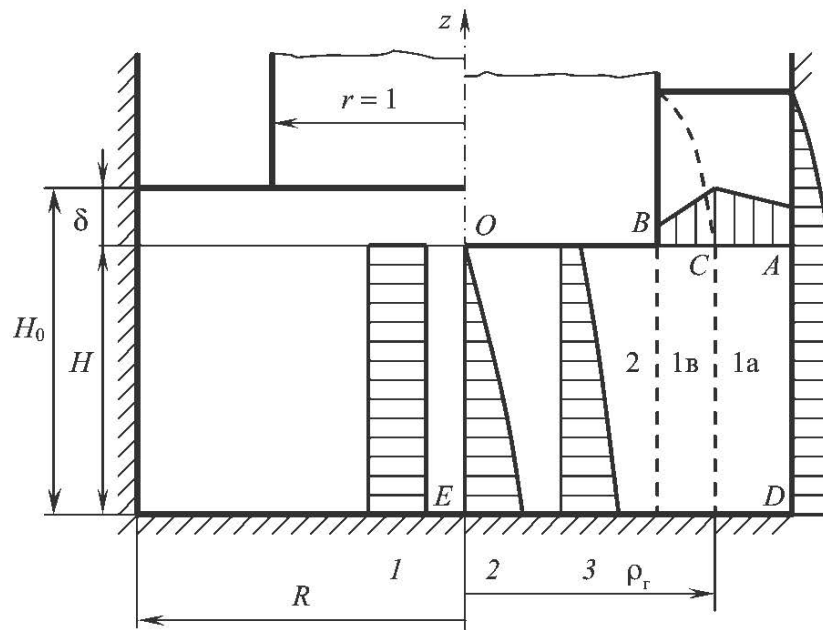


Рисунок 2.13 – Характерні зони та епюри розподілу накопичених деформацій у разі стиснутого видавлювання під торцем пуансона при вільній течії металу (1), при течії із застійною зоною (2) та при утрудненій течії металу (3)

У роботі повністю визначено як напружений, так і деформований стан у будь-якій точці осередку пластичної деформації. Однак рекомендоване

інтегральне підсумовування збільшення ступеня використання запасу пластичності, зване підсумовуванням пошкоджень, для такого складного процесу як видавлювання порожнистих виробів призводить до значних практичних труднощів. Це пов'язано з тим, що при видавлюванні, на відміну, наприклад, від висадки, є дві області з різним напруженим станом і шість зон з різним деформованим станом. Матеріальна частка, що потрапляє в процесі видавлювання в небезпечну точку B (див. рис. 2.13), послідовно проходить ряд зон і областей. Тоді для розрахунку параметрів спочатку необхідно визначити ділянки шляху, що проходять цією частинкою в різних зонах, і відповідні цим шляхам ділянки робочого ходу. Потім за формулами, різними для різних зон, слід знайти потрібні величини. Цей спосіб прогнозування руйнування вкрай трудомісткий, оскільки необхідні чисельні методи із застосуванням комп'ютерної техніки, що ускладнює використання заводськими технологіями.

Тому для прогнозування руйнування застосовується більш простий підхід, що включає усереднення відносного гідростатичного тиску на траєкторії руху матеріальних частинок в небезпечні точки A і B . Це виправдано тим, що при побудові діаграм пластичності також проводилося усереднення відносного гідростатичного тиску по всьому осередку деформації. Середній відносний гідростатичний тиск для частинок можна визначити за формулами:

$$\sigma_A = -0,183 - 0,55 \frac{\mu R}{1 + \mu R} - 0,275 \frac{1 + 2\mu R}{R^2 - 1} h; \quad (2.8)$$

$$\sigma_B = \sigma_A - 0,55 \ln R. \quad (2.9)$$

На виході з осередку пластичної деформації можна прийняти, що відбувається повне розвантаження матеріалу, що видавлюється, тобто гідростатичний тиск стане рівним нулю. Середнє арифметичне цих двох значень визначається за формулою (2.8). Аналогічно для точки B з радіальною координатою $\rho = 1$ в нижній точці осередку пластичної деформації при $z = -h$ знаходимо гідростатичний тиск:

$$\sigma = -0,366 - 1,1 \frac{\mu R}{1 + \mu R} - 0,55 \frac{1 + 2\mu R}{R^2 - 1} h - 1,1 \ln R. \quad (2.10)$$

На виході з осередку пластичної деформації також можна прийняти, що відбувається повне розвантаження матеріалу, що видавлюється, тобто гідростатичний тиск стане рівним нулю. Середнє арифметичне цих двох значень розраховується за формулою (2.9).

Прогнозування руйнування здійснюється у такій послідовності:

1. Для вільного видавлювання знаходиться висота осередку пластичної деформації h . Для стисненого видавлювання використовується кінцеве значення $h = H$.

2. За формулами (2.8) та (2.9) обчислюють значення середнього відносного гідростатичного тиску в небезпечних точках A та B .

3. Для отриманих значень по діаграмі пластичності матеріалу, що видавлюється $e_p - \sigma$, відповідної температури, при якій здійснюється штампування, визначаємо деформації руйнування e_{pA} і e_{pB} . Якщо діаграми пластичності побудовані для певних швидкостей деформації, то останні можна знайти за формулою:

$$\xi_i = \frac{2\nu_0}{d} \frac{1}{R^2 h} \left(1 + \sqrt{\frac{R^4}{3} + 1} \right). \quad (2.11)$$

При використанні діаграм пластичності, побудованих в еквівалентних координатах $L_p - \sigma/T$, виконуємо переведення їх значень у прийнятні значення за формулами

$$e_p = 0,577 \Lambda_p; \quad \sigma = 0,577 \left(\frac{\sigma}{T} \right). \quad (2.12)$$

Перебудована діаграма пластичності сталі 20Х показана на рис. 2.14.

4. Далі за відповідним методом знаходимо робочий хід руйнування пуансона s_p , при якому накопичена деформація в будь-якій небезпечній точці стане рівною критичній. При вільному видавлюванні для визначення

накопичених деформацій розрахункову висоту осередку деформації рекомендується обчислювати по формулі:

$$h_e = h \frac{1 + k_y [1 + (0,2e^{-s} + 0,16e^{-5s} - 0,36)]}{s}, \quad (2.13)$$

Отримане значення ходу руйнування визначає граничну формозміну (глибину порожнини, що видавлюється) за один перехід. При необхідності отримання більшої формозміни слід після видавлювання порожнини допустимої глибини проводити термічну обробку (для вуглецевих сталей - відпал), що відновлює пластичність матеріалу, що штампується, а потім здійснювати остаточне видавлювання. Найефективніше визначати робочий хід руйнування за допомогою програми Mathcad.

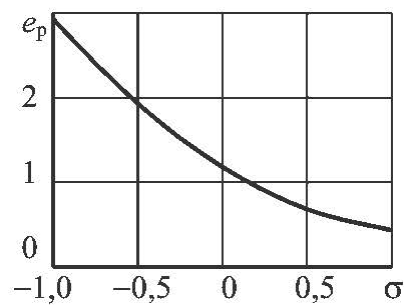


Рисунок 2.14 – Діаграма пластичності сталі 20X при температурі 20°C

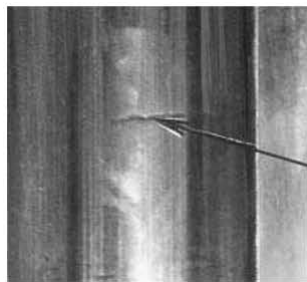
Приклад розрахунку. На рис. 2.15, і 2.16 а, наведені зображення, що показують інтенсивне тріщиноутворення на внутрішній поверхні стінки стаканів зі сталі 20X, отриманих холодним видавлюванням. Для видавлювання використовувалися фосфатовані та омилені заготовки. Відносний радіус матриці $R = 1,5$. Робочий хід, у якому з'явилася перша тріщина, у першому випадку становив $s_{p.e.} = 2,08$, тоді як у другому $s_{p.e.} = 2,2$. Потрібно визначити хід руйнування та порівняти отримане значення з експериментальним.

Рішення. Приймаємо $\mu = \mu_1 = 0,1$ і розраховуємо накопичену деформацію в небезпечній точці за формулами для утрудненого течії під

торцем пуансона. Використовуючи формулу для розрахунку коефіцієнта обтиснення заготовки

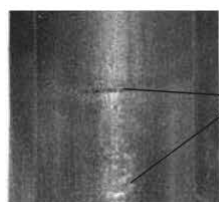
$$\Psi = \frac{1}{R^2 - 1}$$

знаходимо початкову висоту осередку пластичної деформації $h = 0,537$. Відносний гідростатичний тиск у небезпечних точках (по формулам(2.8), (2.9)): $\sigma_A = -0,408$, $\sigma_B = -0,631$. По діаграмі пластичності (див. рис. 2.14) для відповідних значень гідростатичного тиску визначаємо значення граничних накопичених деформацій: $e_{pA} = 1,7$, $e_{pB} = 2,15$. Коефіцієнт зміцнення приймаємо $k_y = 0,999$. З урахуванням цього, задаючи робочий хід s , спочатку по формулі (2.13) обчислюємо висоту h_e , а потім - значення Ψ , n , s_{cm} , e_{iA} , e_{iK} , e_{iB} . Розрахунок проводимо до того часу, доки не знайдемо хід s_p , у якому $e_{iA} = e_{pA}$ або $e_{iB} = e_{pB}$.



початок тріщиноутворення

Рисунок 2.15 – Тріщиноутворення на стакані із сталі 20Х



a

Інтенсивне
тріщиноутворення



б

Рисунок 2.16 – Тріщиноутворення на поверхні порожнини стакана із сталі 20Х при $R = 1,5$ (а) і $1,33$ (б)

У розглянутому випадку за допомогою програми Mathcad при ході $s_p = 2,148$ отримано: $h_e = 0,990$, $\Psi = 0,8$, $n = 2,171$, $s_{cm} = 0,727$, $e_{iA} = 0,679$ (при $s = s_{cm}$ $e_{iA} < e_{pA}$, при подальшому ході пуансона накопичена деформація e_{iA} постійна, тоді руйнування на зовнішній поверхні стінки стакану не відбудеться), $e_{ik} = 2,102$, $e_{iB} = e_{pB} = 2,150$. Таким чином, при $s \geq 2,15$ почнеться інтенсивне тріщиноутворення на внутрішній поверхні стінки стакану (рис. 2.16). Отже, при отриманні виробу з глибиною порожнини, більшою, ніж глибина, що відповідає цьому робочому ходу, необхідно після першого переходу провести відпал отриманого напівфабрикату. У першому випадку $\delta = 3,2\%$, у другому – $\delta = 2,4\%$.

Ці результати також добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими на основі дослідження тріщиноутворення у аналогічних стаканках маловуглецевих сталей при обмеженні робочого ходу пуансона до його діаметра ($s = 2$).

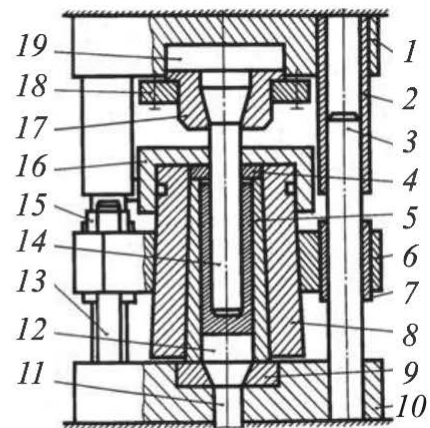
Отримані в прикладі результати були використані при розробці технологічного процесу холодного видавлювання великогабаритних сталевих стаканів з глибокими порожнинами, зовнішній діаметр яких 60 мм, висота 200 мм, діаметр порожнини 40 мм, а глибина 180 мм. З урахуванням оптимальної швидкості деформування, видавлювання здійснювалося на гідравлічному пресі італійської фірми Moldmatis, що має номінальну силу 4 МН і швидкість робочого ходу $2,0 \cdot 10^{-3}$ м/с. Зовнішній вигляд дослідно-промислового штамп перед початком видавлювання показано на рис. 2.17 а, його конструкція – на рис. 2.17, б.

Штамп (див. рис. 2.17 б) включає в себе верхню плиту, що кріпиться до повзуна преса 1, в яку запресовані напрямні втулки 2, що центруються по колонках 3, запресованим в нижню плиту 10, що кріпиться до столу преса. У верхній плиті встановлений опорний вкладиш 19, на який спирається пуансон 14, прикріплений гвинтами до верхньої плити за допомогою пуансонотримача 17 і кільця 18. У середній плиті 6, втулки 7 якої можуть вільно переміщатися

разом з плитою по напрямних колонках (видавлювання в незакріпленій матриці), знаходиться матриця 5, запресована в бандажну обойму 8, до зовнішніх паз якої прикріплена кришка 16 з можливістю швидкого знімання. Під кришкою розташоване загартоване кільце 4, необхідне для знімання видавленого стакану з пуансону у разі її застрягання. За допомогою шпильок 13 і гайок 15 матриця може бути застопорена для отримання порівняльних параметрів традиційного видавлювання.



а



б

Рисунок 2.17 – Зовнішній вигляд штампу перед початком холодного видавлювання великогабаритних сталевих стаканів з глибокими порожнинами (а) та його конструкція (б):

1 – верхня плита; 2 – напрямна втулка; 3 – колонка; 4 – загартоване кільце; 5 – матриця; 6 – середня плита; 7 – втулка; 8 – бандажна обойма; 9 – опорне кільце; 10 – нижня плита; 11 – виштовхувач; 12, 19 – опорні вкладиші; 13 – шпилька; 14 – пуансон; 15 – гайка; 16 – кришка; 17 – пуансонотримач; 18 – кільце

Виштовхування видавленого стакану здійснюється виштовхувачем 11, розміщеним в опорному кільці 9, встановленому в нижній плиті. Завантажена в матрицю заготовля упирається в опорний вкладиш 12.

З урахуванням результатів, отриманих у прикладі, для виготовлення необхідних стаканів використовували два переходи видавлювання. На

кожному переході відносний хід становив $s = 2$. Для відновлення ресурсу пластичності після першого переходу вичавлені напівфабрикати відпалювали. Це дозволило одержати високоякісні вироби, що не мають тріщин (рис. 2.18).

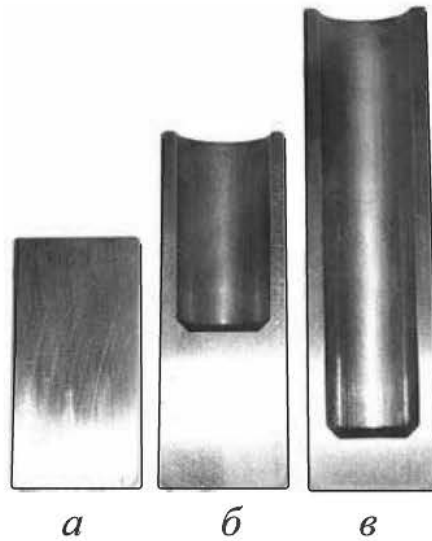


Рисунок 2.18 – Заготовка (а), видавлений напівфабрикат (б) та виріб, що не має тріщин (в)

Таким чином, викладений метод прогнозування руйнування дозволяє розраховувати переходи, які забезпечують досягнення необхідної формозміни заготовки без утворення тріщин.

3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИТЯЖКИ ПОРОЖНИСТОГО ЦИЛІНДРА

3.1 Основи виконання технологічних розрахунків

Заготовки при витяжці розраховують за принципом рівності площ поверхонь (або об'ємів) заготовки і готової деталі з припуском на обрізання [7].

Є три методи розрахунку: аналітичний, графічний і графоаналітичний. Всі вони допустимі для будь-якого виду штампового виробництва. Але, перший найбільш універсальний і доступний для технолога і конструктора, його переваги - можливість використання сучасної обчислювальної техніки, висока точність. Обчислення діаметра заготовки можна звести до розрахунку за формулами для найбільше поширених форм витягнутих деталей, які наведені в [8].

Для витягувань, не потребує більшої точності, розрахунок ведеться за зовнішніми розмірами деталі. Якщо витяжка ведеться без різання деталей із матеріалу товщиною більше 1 мм, розрахунки виконують по середній лінії. Припуски, що рекомендуються на обрізання після витяжки вибирають в залежності від висоти виробу і діаметра фланця [8].

Метод розрахунку та побудови форми заготовки при витяжці прямокутних коробчастих деталей в значній мірі залежить від відносної висоти коробки H/B і відносного радіуса кутового закруглення.

В залежності від співвідношення указаних параметрів спостерігається різне витиснення металу в бічні стінки, тому встановлені окремі області, яким відповідають різні способи побудови форми заготовки [8].

Розміри заготовок при витяжці в стрічці з надрізами розраховують таким самим чином, як і при витяжці із штучних заготовок. Якщо витяжка ведеться в цілій стрічці, розраховують діаметр умовної заготовки з рахунком коефіцієнта уточнення (для однорядної витяжки $\alpha = 0,96...0,98$; для багаторядної $\alpha = 0,92...0,95$):

$$F_{\text{загот}} = F \cdot \alpha \quad (3.1)$$

Число переходів при витяжці залежить від пластичності і структурного стану металу. Критерієм для визначення числа переходів служить граничне значення ступеня деформації, тобто припущений коефіцієнт витяжки. Числові значення мінімальних коефіцієнтів витяжки наведені в [8]. Розміри на переходами циліндричних деталей з фланцем і без нього розраховують по відомим мінімально допустимим коефіцієнтам витяжки [8].

При витяжці деталей типу тіл обертання, проміжні переходи в плані завжди потрібні, але форма їх утворюючих може бути різною.

Проміжні переходи для циліндричних деталей зводяться до трьох основних форм:

- з плоским дном і закругленням r (рис. 3.1, а);
- з дном у вигляді перерізаного конуса (рис. 3.1, б);
- із сферичним дном (рис. 3.1, в).

Ці форми можуть бути з фланцем і без нього в залежності від обраного технологічного процесу і заданого креслення. Якщо фланець незначно більше діаметра витяжки, то один або декілька переходів виконуються без нього, а потім в наступних операціях утворюється фланець.

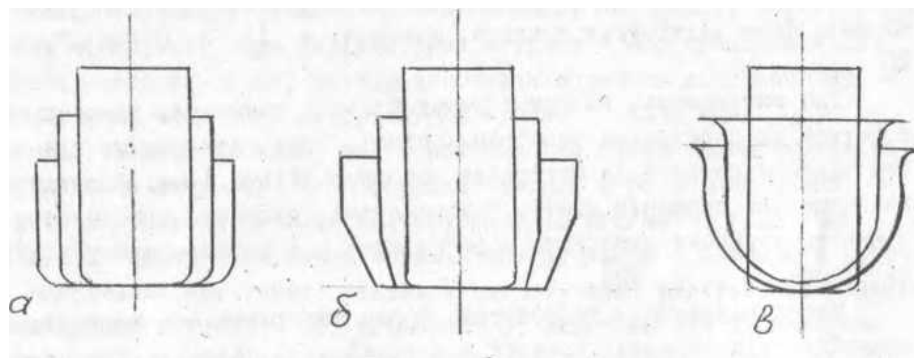


Рисунок 3.1 - Проміжні переходи для циліндричних деталей

Коли деталь задана з великим фланцем, то всі проміжні переходи виконуються також з фланцем.

Перша форма допустима при будь-яких розмірах циліндра, друга - практично мало допустима для циліндрів діаметром менше 20 мм, але при великих діаметрах вона доцільніше першої.

Третя форма зручна для дрібних деталей і особливо при послідовному витяжці в стрічці (штабі).

Радіуси закруглення кромek матриць і пуансонів, призначених для витяжки порожнистих деталей, приймають за таблицями, наведеними в [8], або розраховують за формулою:

$$r_M \approx K \sqrt{(D - d) \cdot S}, \quad (3.2)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від товщини металу;

S , мм	до 0,6	0,6 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
K	1,0	0,9	0,85	0,8	0,7	0,6

D – діаметр плоскої заготовки або попередньої витяжки, мм;

d - діаметр деталі після даного переходу витяжки, мм;

S – товщина металу, що штампується, мм.

Радіуси закруглення пуансона r_{II} для перших переходів рекомендується приймати рівними радіусам матриці r_M . Проте, при відповідних значеннях коефіцієнтів витяжки допускається зменшення радіусів пуансонів до $r_{II} = 0,5 \dots 1 \cdot S$. У процесі калібрування і чеканення можна отримати деталі радіусів $r_{II} < 0,5 \cdot S$.

На кожному переході радіуси закруглення r_M і r_{II} повинні бути різними. На 1 переході вони досягають максимальних значень, а на наступних - зменшуються на 25 %, тобто приймаються $0,75 \cdot r_{Mi}$ і $0,75 \cdot r_{Iii}$. Спочатку доцільно назначити радіуси матриць і пуансонів для останнього переходу. Витяжка проводиться з притиском заготовки і без нього. Необхідність застосування притиску належить встановити за формулою:

$$\frac{D}{S} \cdot 100 \leq 4,5 \cdot (1 - m_1), \quad (3.3)$$

Для кожного переходу однобічний зазор між матрицею і пуансоном приймається в залежності від товщини металу: для I – $Z_1 = (1,3 - 1,5) \cdot S$; для II – $Z_2 = (1,2 - 1,3) \cdot S$; для III і наступних $Z_3 = Z_4 = (1,1 - 1,2) \cdot S$.

Розмір зазору між матрицею і пуансоном при витяжці порожнистих деталей з утоншенням матеріалу: $Z_B = 0,65 - 0,85$.

Для кольорових металів коефіцієнт K можна приймати по нижній межі, а для сталей - по верхній.

Зусилля витяжка порожнистої циліндричної деталі можна визначити за формулами:

$$P_1 = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_1; \quad (3.4)$$

$$P_2 = \pi \cdot d_2 \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_2; \quad (3.5)$$

$$P_n = \pi \cdot d_n \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_n. \quad (3.6)$$

де d_1, d_2, d_n - діаметр деталі відповідно після першої, другої і останньої витяжки; C_1, C_2, C_n - поправочний коефіцієнт відповідно для першої, другої і наступної операції витяжки.

Наведем значення оптимальних коефіцієнтів витяжки із відповідністю з поправочними коефіцієнтами:

m	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,8
C_1	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,4
C_2-C_n	-	-	-	-	-	-	1,0	0,95	0,9	0,8

Зусилля витяжки деталей будь-якої складної форми без наявності перетяжних ребер (порогів) визначається за формулою:

$$P = (P_B + P_r) \cdot K \quad (3.7)$$

де P_B - зусилля, яке необхідне для витяжки кутів закруглень (це зусилля розраховують за формулою для витяжки циліндричних деталей); P_r - зусилля, яке необхідне для вигину прямих ділянок; коефіцієнт $K = 1,1 \dots 1,2$.

Зусилля притиску при витяжці деталей будь-якої форми (в загальному вигляді).

$$Q = F \cdot q \quad (3.8)$$

де F - площа заготовки під притиском, q - питоме зусилля притиску.

Повне зусилля витяжки, необхідне для підбору преса дорівнює:

$$P_{\text{пр}} = P + Q \quad (3.9)$$

Як запобігання розривів заготовки до початку процесу витяжки, максимальна швидкість повинна бути на крупних пресах $V_{\text{max}} = 15...45$ см/с, на невеликих $V_{\text{max}} = 70$ см/с.

Максимальну швидкість витяжки можна визначити за емпіричною формулою:

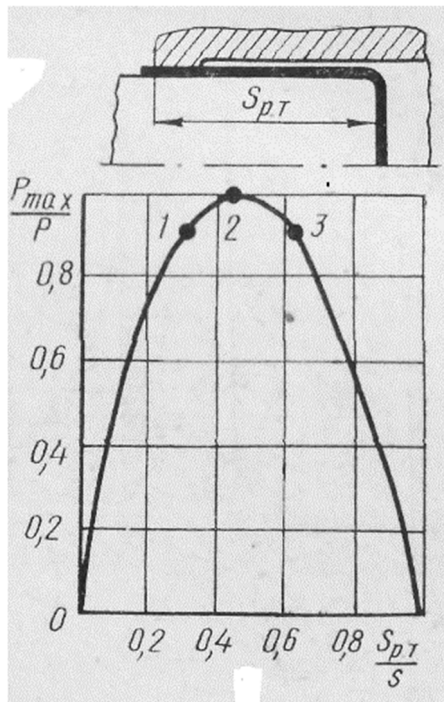
$$V_{\text{max}} = 3,33 \cdot (1 + m_1) \cdot \sqrt{D - d_1} \quad (3.10)$$

або

$$V_{\text{max}} = 0,105 \cdot v_b \cdot \sqrt{H \cdot (H - h)} \quad (3.11)$$

де v_b – швидкість обертання валу об/хвил; h – робоча частина ходу (від початку деформації), мм; H – повний хід повзуна, мм.

Графік робочих навантажень при витяжці без фланця «напрорал» можна збудувати за трьома характерними точками (рис. 2.2):



1 – з координатами $0,9 \cdot P_{\text{max}}$ і $0,3 \cdot S_P$;

2 – з координатами P_{max} і $0,42 \cdot S_P$;

3 – з координатами $0,9 \cdot P_{\text{max}}$ і $0,63 \cdot S_P$.

Рисунок 3.2 – Побудова графіку робочих навантажень при витяжці

Повний робочий хід S_P приймається рівним висоті H виробу.

Прес вибирається по зусиллю, роботі, потужності, деформації, величині і швидкості ходу, закритій висоті і розмірам штампового простору. Щоб легше було

видаляти відштамповані деталі, хід витягаючого повзуна повинен в 2,2 – 2,5 рази перевищувати висоту деталі.

3.2 Розрахунок параметрів технології витяжки порожнистого циліндра

Розрахувати параметри технології витяжки порожнистого циліндра (рис.3.3, а).

$$\text{Вихідна заготовка – лист} \quad \frac{0 - 1,0 \times 1000 \times 2000 \text{ ДСТУ 19904 - 74}}{1 - \text{м} - \text{ОСВ} - 08\text{Ю ДСТУ 9045 - 80}}$$

Річна програма - 100 тис. шт.

Згідно випуску /програми/ деталей вид виробництва - серійний.

В умовах серійного виробництва рекомендується використовувати операційні штампи, які встановлюються на універсальних пресах. Відповідно до вимог технологічності конструктивної форми, радіус дна витягнутого виробу не повинен перебільшувати $3S$. Відхилення на зовнішньому діаметрі складає не менше 0,7 мм, а від площини дна - не менше 0,9 мм. Ці значення можуть бути отримані на останній операції калібрування. Відхилення ± 2 мм по висоті деталі забезпечується при обрізанні [9]. Радіус дна 1 мм. Припуск на обрізання $\Delta h = 9$ мм [9], тобто висота виробу після калібрування $h_s = 240 + 9 = 249$ мм.

В залежності від зовнішнього діаметру готового виробу d , діаметр плоскої заготовки дорівнює:

$$\begin{aligned} D_0 &= (d^2 + 4 \cdot d \cdot h_B - 1,72 \cdot r \cdot d - 0,56 \cdot r^2)^{0,5} \\ &= (100^2 + 4 \cdot 100 \cdot 249 - 1,72 \cdot 1 \cdot 100 - 0,56 \cdot 1^2)^{0,5} \approx 331 \text{ мм.} \end{aligned}$$

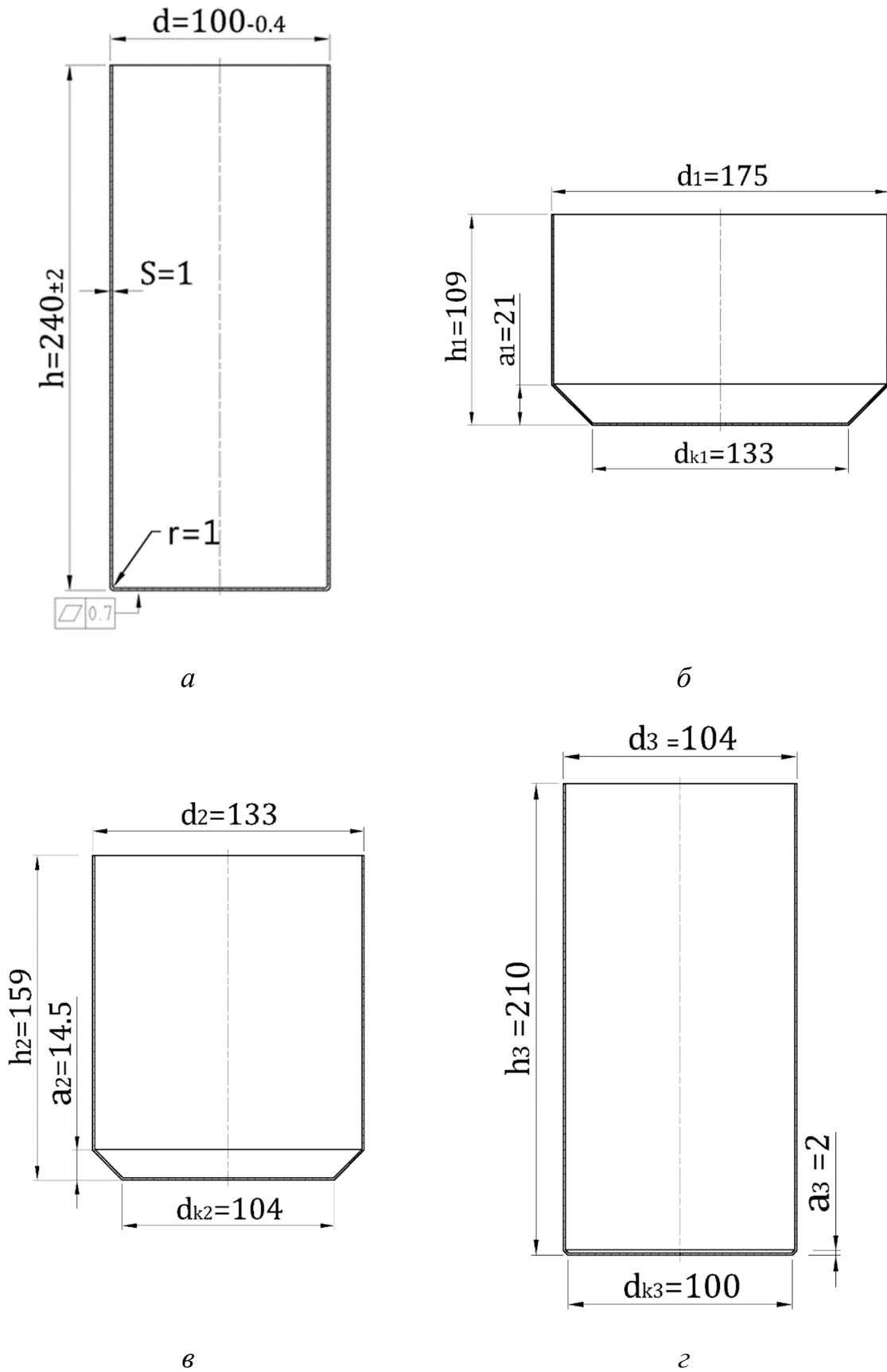


Рисунок 3.3 – Креслення деталі (а) і схеми переходів витяжки (б-г)

При багатоопераційному інтенсивному витяганні помітно збільшується площа поверхні заготовки, що враховується введенням коефіцієнта $\beta=1,06$ [9], тому доцільно виробити заготовку діаметром:

$$D_p = D_0/\beta = 331/1,06 \approx 312 \text{ мм.}$$

Оптимальні коефіцієнти витяжки із заготовки, відносна товщина якої $(S/D) \cdot 100 = (1/312) \cdot 100 = 0,32 \%$, складають: $m_1 = 0,56$; $m_2 = 0,76$; $m_3 = 0,78$; $m_4 = 0,96$. Витяжка відбувається з притиском [9]. Визначаємо кількість переходів:

$$n_{\text{переходи}} = 1 + \frac{\ln d - \ln(m_1 \cdot D_p)}{\ln m_2} = 1 + \frac{\ln 100 - \ln(0,56 \cdot 312)}{\ln 0,76} = 3,03.$$

Приймаємо 4 переходи.

Діаметри переходів:

$$d_1 = m_1 \cdot D_p = 0,56 \cdot 312 = 175 \text{ мм;}$$

$$d_2 = m_2 \cdot d_1 = 0,76 \cdot 175 = 133 \text{ мм;}$$

$$d_3 = m_3 \cdot d_2 = 0,78 \cdot 133 = 104 \text{ мм;}$$

$$d_4 = m_4 \cdot d_3 = 0,96 \cdot 104 = 100 \text{ мм.}$$

Для полегшення процесу витяжки приймаємо форму дна із скривленням під кутом 45° (рис. 2.3, б-г). Висота конічних дільниць за переходами: $a_1=21$ мм; $a_2=14,5$ мм; $a_3=2$ мм. Діаметри дна переходів d_k при витяжці деталей з перерізанним конусом: $d_{k1}=d_2$; $d_{k2}=d_3$ і т.д. Для даного випадку $d_{k1}=133$ мм. Тому:

$$a_1 = \frac{d_1 - d_{k1}}{2} = \frac{175 - 133}{2} = 21 \text{ мм;}$$

$$a_2 = \frac{d_2 - d_{k2}}{2} = \frac{133 - 104}{2} = 14,5 \text{ мм;}$$

$$a_3 = \frac{d_3 - d_{k3}}{2} = \frac{104 - 100}{2} = 2 \text{ мм.}$$

Висота деталей, які витягаються після кожної операції дорівнює:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 0,25 \cdot \left(\frac{D_p}{m_1} - d_1 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{a_1}{d_1} \right) \cdot (d_1 + 0,86 \cdot a_1) \\
 &= 0,25 \cdot \left(\frac{312}{0,56} - 175 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{21}{175} \right) \cdot (175 + 0,86 \cdot 21) \\
 &= 109 \text{ мм};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_2 &= 0,25 \cdot \left(\frac{D_p}{m_1 \cdot m_2} - d_2 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{a_2}{d_2} \right) \cdot (d_2 + 0,86 \cdot a_2) = 0,25 \cdot \\
 &\left(\frac{312}{0,56 \cdot 0,76} - 133 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{14,5}{133} \right) \cdot (133 + 0,86 \cdot 14,5) = 159 \text{ мм};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 0,25 \cdot \left(\frac{D_p}{m_1 \cdot m_2 \cdot m_3} - d_3 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{a_3}{d_3} \right) \cdot (d_3 + 0,86 \cdot a_3) \\
 &= 0,25 \cdot \left(\frac{312}{0,56 \cdot 0,76 \cdot 0,78} - 104 \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{2}{104} \right) \\
 &\cdot (104 + 0,86 \cdot 2) = 210 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

Аналогічно $h_4 = 249$ мм.

Заготовка діаметром $d_{заг} = 104$ мм і висотою $h_3 = 210$ мм надходить на IV операцію калібрування. Висока пластичність матеріалу І-М-ОСВ-08Ю (ДСТУ 9045-80) та оптимальні технологічні параметри дозволяють виконувати усі операції без проміжного відпалу [9].

3.3 Розрахунок силових умов витяжки порожнистого циліндра

Визначаємо силові умови витяжки: зусилля витяжки і зусилля притиску на операціях штамповки полого циліндру (рис. 2.3).

На I операції вирубається плоска заготовка діаметром $D_p = 312$ мм і товщиною $S = 1$ мм, тобто $S/D_p < 0,2$. Тому:

$$\sigma_{cp} = 0,8 \cdot \sigma_b = 0,8 \cdot 323 = 258,4 \text{ МПа}.$$

Значення σ_b для сталі І-М-ОСВ-08Ю приймаємо за ДСТУ 9045-80.

Максимальне зусилля вирубання:

$$P = \pi \cdot D_p \cdot S \cdot \sigma_{cp} \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 312 \cdot 1 \cdot 258,4 \cdot 10^{-6} = 0,25 \text{ МН}.$$

Абсциса точки з максимальним зусиллям на графіку робочих навантажень при $n = 70$ (число ходів преса у хвилину) визначається:

$$h_n = S \cdot (0,76 - 0,035 \cdot S - 0,0014 \cdot n) = 1 \cdot (0,76 - 0,035 \cdot 1 - 0,0014 \cdot 70) = 0,62 \text{ мм.}$$

Графік зусилля деформації при вирубанні зображений на рис. 3.4.

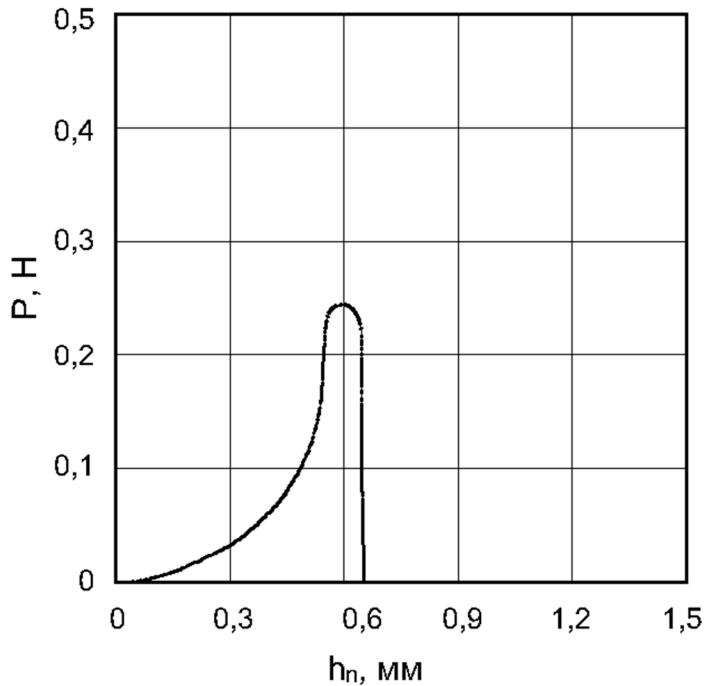


Рисунок 3.4 – Графік робочих навантажень

Для виконання операції по ДСТУ 9408-83 вибираємо однокривошипний відкритий прес простої дії з номінальним зусиллям 0,4 МН моделі K2I24 з розмірами стола $L \times B = 710 \times 580$ мм; закрита висота 340 мм.

Максимальне зусилля на операціях витяжки (див. рис. 3.3, б-г) розраховується за формулою:

$$P_n = \pi \cdot d_n \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_n \cdot 10^{-6}$$

Після підстановки відповідних кількісних значень отримаємо:

$$P_1 = 3,14 \cdot 175 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ МН,}$$

$$P_2 = 3,14 \cdot 133 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,13 \text{ МН,}$$

$$P_3 = 3,14 \cdot 104 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ МН,}$$

На рис. 3.5 показані графіки робочих навантажень витяжки, які побудовані за описаною раніше методикою.

Тиск притиску на I операції витяжки визначається:

$$q_1 = 2 \cdot \left(\frac{D_p}{d_1} - 1,2 \right) \cdot \left(\frac{D_p}{S \cdot 100} \right) = 2 \cdot \left(\frac{312}{175} - 1,2 \right) \cdot \left(\frac{312}{1 \cdot 100} \right) \approx 3,6 \text{ МПа.}$$

На наступних операціях можна приймати менший тиск:

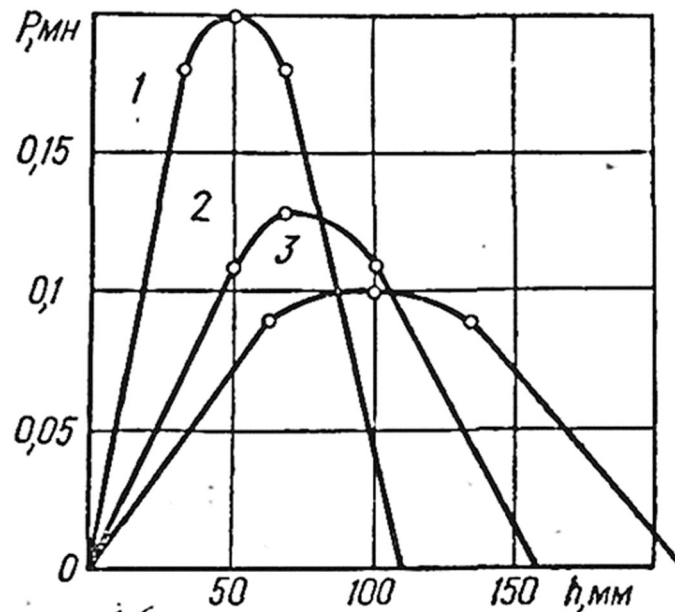


Рисунок 3.5 – Графіки робочих навантажень при витяжці у першому (1), другому (2) і третьому (3) переходах

$$q_{2,3} = 2 \cdot \left(\frac{175}{133} - 1,2 \right) \cdot \left(\frac{175}{1 \cdot 100} \right) \approx 0,4 \text{ МПа.}$$

Радіус закруглення витяжних кромки матриць r_m вибирається в залежності від відносної товщини заготовки і коефіцієнта витяжки. На всіх операціях приймаємо $r_m = 8$ мм.

Зусилля притиску на n -ій операції витяжки визначається за формулою:

$$Q_n = 0,25 \cdot \pi \cdot [d_{n-1}^2 - (d_n + 2 \cdot r_m)^2] \cdot q_n \cdot 10^{-6}.$$

Після підстановки числових значень отримаємо:

$$Q_1 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [312^2 - (175 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \approx 0,175 \text{ МН;}$$

$$Q_2 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [175^2 - (133 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \approx 0,003 \text{ МН;}$$

$$Q_3 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [133^2 - (104 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \approx 0,001 \text{ МН;}$$

Прес для витягування вибираємо по технологічним зусиллям і за умови, що хід H витяжного повзуна повинен у 2,5 рази перебільшувати висоту деталі, тобто $H > 2,5 \cdot 249 = 623$ мм. Цім вимогам відповідав прес однокривошипний,

закритий, подвійної дії з номінальним зусиллям витяжного повзуна 3,15 МН, притискного 2 МН і ходом витяжного повзуна $H = 630$ мм. Швидкість інструмента до початку процесу витяжки визначається за формулою:

$$v \approx 0,105 \cdot v_B \cdot \sqrt{h_B \cdot (H - h_B)} = 0,105 \cdot 12 \cdot \sqrt{249 \cdot (623 - 249)} \approx 384 \text{ мм/с.}$$

Кількість неперервних ходів повзуна за хвилину приймаємо $n = 12$ (ДСТУ 7639-75). Висота робочої частини хода h прийнята рівною максимальній висоті заготовки. Отримане значення швидкості відповідає рекомендуемому для операцій витяжки [9].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Цехи металургійного виробництва належать до цехів підвищеної небезпеки. Основними небезпечними та шкідливими факторами у них є: теплове випромінювання; вібрації; шум; підвищені запиленість, загазованість, напруга в електричних мережах, напруга магнітного поля, пожежопідригність.

Вимоги до техніки безпеки під час роботи на ковальсько-штампувальному устаткуванні викладено у таких основних документах: ПОТ РМ-003–97 (Правила з охорони праці під час виконання ковальсько-пресових робіт), ДСТУ 12.3.026–81, ГСТ 42299.

4.1 Загальні вимоги безпеки

До виконання технологічних процесів ковальсько-пресових ділянок допускаються особи не молодше 18 років, які успішно пройшли попередній медогляд, професійне навчання та мають посвідчення про здобуття відповідної професії, а також пройшли навчання та інструктаж з безпеки праці.

Повторний інструктаж з охорони праці повинен проводитися не рідше ніж один раз на 3 міс. Небезпечними та шкідливими виробничими факторами при роботі на ковальсько-пресовому устаткуванні є:

- підвищена температура поверхні нагрівального обладнання, заготовок, штампувань;
- рухомі частини обладнання;
- фізичні навантаження під час транспортування заготовок, деталей, оснащення;
- гострі кромки, задирки та шорсткості на поверхні заготовок;
- підвищена напруга в електричній мережі, рівень шуму, рівень вібрацій, рівень яскравості та інфрачервоної радіації при відкритих робочих зонах нагрівального обладнання, нагрітих заготовок.

Засоби індивідуального захисту:

- костюм бавовняний з вогнезахисним просоченням (ДСТУ 12.4.045-87);
- черевики шкіряні з металевими шкарпетками (ДСТУ 28507-90);
- брезентові рукавиці (ДСТУ 12.4.010–75);
- захисні окуляри;
- захисна каска (ДСТУ 12.4.128-83);
- навушники протишумні (ТУ 400-28-127).

Контроль за дотриманням вимог безпеки праці на ділянці покладається на майстра ділянки або особу, яка його заміщає згідно з наказом.

Працівник зобов'язаний дотримуватись правил внутрішнього трудового розпорядку та техніки безпеки.

4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Правильно одягнути спецодяг: куртку поверх штанів, штани поверх черевиків, черевики повинні бути з металевими шкарпетками.

Перевірити наявність та справність індивідуальних засобів захисту: захисних окулярів, захисної каски, навушників, брезентових рукавиць.

Підготувати для роботи необхідний інструмент: кліщі, молоток, зубила, сокири, оправки тощо. Переконатися у їхній справності:

- зубила, сокири, оправки не повинні мати тріщин та наклепу;
- рукоятки кувалд та молотків повинні бути овального перерізу, не мати тріщин;
- кліщі повинні бути виготовлені із сталі, що не сприймає загартування, а губки – мати форму, що відповідає конфігурації заготівлі. На внутрішній поверхні ручок кліщів має бути упор, що запобігає здавлюванню пальців руки. Несправним інструментом користуватися не дозволяється;
- довжина рукояток кліщів, гачків та інших інструментів має бути достатньою, щоб під час роботи руки не піддавалися тепловому впливу

та не знаходились у робочій зоні молота чи преса. Інструмент повинен мати ізольовані по довжині захвату ручки;

- необхідно перевірити наявність чистої води у бочці для охолодження інструменту.

Перевірити, щоб на робочому місці не було бруду та будь-яких сторонніх предметів, що захаращують площу підлоги.

Перевірити справність молота, преса:

- оглянути повітропровід, по манометру перевірити тиск повітря у магістралі, переконатися у справності болтових з'єднань та клинових кріплень, проконтролювати щільність затягування клинів та справність огорож пускової педалі молота, преса;
- прокачати бабу молота, повільно пускаючи її у хід;
- багаторазовим натисканням пускового пристрою перевірити справність роботи механізму, що включає, контролювати, чи немає здвоєних ударів або мимовільного опускання повзуна;
- перевірити наявність у молота всіх огорожувальних засобів (з заднього боку і з боку проходів; екранів, що захищають від дії нагрівальних пристроїв, окалини, що відлітає);
- перевірити справність захисного заземлення обладнання;
- переконатися, що на рухомих частинах молота або преса, а також на нерухомих частинах, що розташовані вгорі, немає будь-яких предметів, які можуть впасти при роботі.

Про всі недоліки та несправності обладнання, виявлені на робочому місці, доповісти майстру для вжиття заходів щодо їх усунення до початку роботи.

Під час роботи на ковальсько-пресовому устаткуванні також необхідно дотримуватись правил техніки безпеки.

4.3 Вимоги безпеки під час роботи

Виконувати лише ту роботу, яка доручена адміністрацією підрозділу.

При здійсненні роботи не відволікатися самому та не відволікати інших.

Забороняється присутність на робочому місці сторонніх осіб.

Підтримувати належний порядок на робочому місці: інструмент, заготовлі та поковки укладати на відведені місця, не допускаючи захаращення робочого місця та проходів.

Не проводити огляд, змащування та очищення при увімкненому обладнанні. Використовувати інструмент лише за призначенням.

При штампуванні не тримати кліщі перед собою, а розташовувати їх збоку тулуба. Дотримуватись температурного інтервалу штампування, вказаного в технологічній карті. Штампування перегрітого або охолодженого нижче за норму металу забороняється.

Заготовлі та поковки (штампування) не повинні мати гострих кромek і задирок розміром, що перевищує вказані на кресленні.

Розміщувати заготовку в струмку штампу суворо у встановленому місці, використовуючи кожен струмок тільки за призначенням.

При штампуванні з попереднім осадом заготовки в торець укладати заготовку в центрі осадового майданчика, тримаючи заготовку строго вертикально і так, щоб сколи торців були звернені в бік себе або від себе.

Попередньо складати штамп відповідно до технологічного процесу, запобігаючи залипанню штампувань і перегріву штампу. При залипанні деталі в штампі припинити роботу і негайно повідомити майстра.

Не штампувати випадкових заготовок з розмірами більше, ніж розрахункові, тому що надлишок металу, що не умістився в струмок, може бути відтятий і викинутий назовні. При виході металу з облойної щілини на дзеркало штампу негайно зупинити роботу і повідомити майстра.

За жодних обставин не вводити руки в зону опускання баби молота або повзуна преса. Окалину зі штампу видаляти лише вказаними у технології засобами. Забороняється видаляти окалину руками чи рукавицями, здувати стисненим повітрям, якщо немає приймального патрубку витяжної вентиляції.

При видаленні заготовки, що застрягла в струмку штампу, застосовувати лише пристрої, зазначені в технологічній карті. Пам'ятати, що підкладання в струмок штампу будь-яких предметів і удари по них призводять до тяжких травм.

Під час укладання заготовки в штамп, при переміщенні її в струмок та зняття зі штампу не тримати ногу на педалі. Не допускати холостих ударів верхньої частини штампу на нижню.

Періодично перевіряти надійність кріплення штампу у процесі роботи. Помітивши несправність чи ослаблення клинів, негайно зупинити молот чи прес. Вибивання та забивання клинів проводити тільки за допомогою спеціально призначених для цього засобів, дотримуючись особливої обережності.

Забивання та вибивання клинів за допомогою «сокола» виконувати під безпосереднім наглядом майстра. Вибивання клинів починати з нижнього штампу. Якщо клин не виступає за тіло штампу, то при вибиванні клина використовувати вибивання і починати вибивання наступним чином: кліщами взяти вибивання, підставляти до кінця клина і легкими ударами «сокола» вибивати клин.

Під час перерв у роботі зупинити молот, плавно опустити бабу, не залишаючи її на вазі. При переналагодженні або усуненні несправності бабу поставити на підставку або в спеціальний замикаючий пристрій відключити привід. Не класти кліщі та інший інструмент на штамп та не кидати на підлогу. Зберігати інструмент у стелажах та пірамідах.

Для вгамування спраги пити підсолену газовану воду. Не їсти на робочому місці. Використовувати під час роботи повітряний душ, а при

перервах у роботі відпочивати, сидячи поза зоною теплового впливу (опромінення).

У разі травми, нездужання припинити роботу, повідомити майстра та звернутися до медпункту. Під час виконання змінного завдання можуть статися різноманітні непередбачені ситуації, тому ці моменти обумовлюються у правилах техніки безпеки.

4.4 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Дії персоналу в аварійних ситуаціях повинні здійснюватись відповідно до плану ліквідації аварійних ситуацій.

При раптовому відключенні електроенергії, несподіваному падінні тиску повітря в системі, виявленні несправності обладнання, пристроїв та інструменту необхідно:

зупинити роботу;

відключити обладнання;

негайно повідомити майстра про ситуацію, що виникла.

У разі пожежі:

відключити обладнання;

негайно повідомити про те, що трапилося майстру або викликати пожежну частину;

розпочати гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння.

При отриманні травми повідомити майстра та звернутися до медпункту.

У правилах техніки безпеки також застерігаються дії після закінчення робіт.

4.5 Вимоги безпеки при закінченні роботи

Зупинити молот (прес), плавно опустити бабу молота в нижнє положення, замкнути важіль керування та перекрити подачу пари (повітря) у пневматичних молотів, вимкнути електродвигун у преса.

Упорядкувати робоче місце, прибрати відходи, окалину.

Протерти молот, прес. Очищення стисненим повітрям забороняється.

Прибрати на місце придатний для подальшої роботи інструмент, а непридатний відділити для ремонту або вилучення.

Скласти поковки та заготовки в тару.

Здати робоче місце зміннику або майстру, про всі помічені неполадки в роботі повідомити майстра.

Зняти спецодяг та взуття, прибрати у шафу.

Прийняти душ.

ВИСНОВКИ

1. У загальній частині бакалаврської роботи розглянуто загальні положення теорії обробки металів тиском з урахуванням кривих зміцнення, анізотропії властивостей матеріалу, що штампується, впливу масштабу заготовки, що обробляється, швидкості деформування і температурного ефекту. Розглянуто результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів кування, осаджування, висаджування, прошивки, пресування, гарячого об'ємного штампування, схеми штампування у відкритих та закритих штампах. Наведено схеми устаткування для цих операцій і принципи їх роботи, параметри нагрівання та охолодження штампів при гарячому штампуванні, енергосилові параметри процесів.

2. У технологічній частині бакалаврської роботи виконано аналіз проблем формозмінення при об'ємному штампуванні у відкритих і закритих штампах та видавлюванні циліндричних заготовок типу «стакан» з відпаленої сталі 20Х. Розглянуто вплив анізотропії механічних властивостей металевих матеріалів на параметри процесів штампування і видавлювання, схеми можливого розміщення волокон в структурі заготовки, що видавлюється, наведено приклади розрахунків сили видавлювання. Розглянуто схеми утворення застійної зони і зони утрудненої деформації під торцем пуансону і їх вплив на показники процесу. Наведено алгоритм визначення можливості утворення застійних зон та їх розмірів. Наведено розрахункову модель, що дозволяє описати процес утворення утяжини при видавлюванні стакану. Розглянута макроструктура виробу, що видавлюється і напрямок волокон структури, як важлива характеристика експлуатаційних властивостей виробу. Встановлено, що в окремих зонах осередку пластичної деформації накопичена деформація безперервно зростає із збільшенням робочого ходу пуансону, що призводить до виникнення тріщин у виробі і його руйнування. Розглянуто принципи і послідовність прогнозування руйнування заготовки, що дозволяє

розраховувати переходи, які забезпечують досягнення необхідної формозміни заготовки без утворення тріщин.

3. У механічній частині бакалаврської роботи виконано розрахунок параметрів технології витяжки порожнистого циліндра. Застосовано аналітичний метод розрахунку, як найбільш універсальний і доступний для технолога і конструктора. Його переваги - можливість використання сучасної обчислювальної техніки і висока точність. Обчислення діаметра заготовки можна звести до розрахунку за формулами для найбільше поширених форм витягнутих деталей. Наведено проміжні переходи для циліндричних деталей, розрахунок силових умов витяжки порожнистого циліндра.

4. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» наведено вимоги до техніки безпеки під час роботи на ковальсько-штампувальному устаткуванні, зокрема, загальні вимоги, вимоги безпеки перед початком роботи, вимоги безпеки під час роботи, вимоги безпеки в аварійних ситуаціях, вимоги безпеки при закінченні роботи тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. George T. Halmos. Roll Forming Handbook. Taylor & Francis Group. 2006. Canada.
2. Wei-Wen Yu. Cold-Formed Steel Design- Third Edition- John Wiley and Sons, Inc. 2000. Canada.
3. Проценко В. М., Белоконь Ю. О. Технологія виготовлення гнутих профілів : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Обробка металів тиском" Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 104 с.
4. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Belokon Yu. A., Bondarenko Y. V. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. Steel in Translation, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.
5. Проценко В. М., Бондаренко Ю. В., Явтушенко А. В. Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 126 с.
6. Проценко В. М. Обтискне та сортове виробництво : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія". Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 51 с.
7. Проценко В. М. Технологія виготовлення гнутих профілів : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 45 с.
8. Ніколаєв В. О. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 112 с.

9. Ніколаєв В. О. Теорія і технологія точної прокатки штаб : навчальний посібник для здобувачів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 100 с.
10. Ніколаєв В. О. Теорія прокатки штаб : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 259 с.
11. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Bondarenko Y. V., Kirichenko A. G., Ping F. Y. Numerical experiment for the calculation of normal contact stress in the deformation canter when rolling a metal strip. *Journal of Engineering Sciences*, Volume 6, Issue 2 (2019), pp. E 31–E 35.
12. Проценко В. М. Прокатка листів та штаб : методичні вказівки до виконання практичних занять, контрольних робіт і самостійної роботи для здобувачів ЗДІА, що навчаються за спеціальністю 136 «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском») всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 67 с.
13. Ніколаєв В. О. Теорія та обладнання точної прокатки штаб: методичні рекомендації до виконання практичних завдань, контрольних і самостійних робіт для здобувачів ЗДІА напряму 8.0504104 ”Обробка металів тиском”. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 52 с.
14. Проценко В. М. Теорія та технологія точної прокатки штаб : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ЗДІА, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Обробка металів тиском» зі спеціальності 136 «Металургія», рівня вищої освіти «Магістр» денної і заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 40 с.
15. Проценко В. М. Профілювання валків листових станів : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ЗДІА, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Обробка металів тиском» зі спеціальності 136 «Металургія», рівня вищої освіти «Магістр» денної і заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 42 с.

16. Серода Б. П., Проценко В. М. Виготовлення спеціальних видів прокату : навчально-методичний посібник для здобувачів ЗДІА спеціальності 7.090404 "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 88 с.
17. Явтушенко О. В., Проценко В. М., Корнілов О. О. Розрахунок валків прокатних станів на міцність і деформацію у програмному комплексі «AutoCAD Mechanical». *Металургія : Збірник наукових праць*. Запоріжжя , 2018. Вип. 2 (40). С. 85 – 90.
18. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V, Bondarenko Y, Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *Conference Proceedings – METAL 2020. 29th International Conference on Metallurgy and Materials*. May 20 - 22, 2020, Brno, Czech Republic, EU. P. 440 – 445. <https://www.confer.cz/metal/2020/3500-mathematical-modeling-of-physical-properties-of-anisotropic-materials>. (Дата звернення: 15.09.2023).
19. Таратута К.В., Проценко В.М., Востоцький С.М. Комп'ютерне моделювання процесу волочіння сплавів на основі титану. IV Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2023). 25-26 травня 2023 року. Черкаси. С 40 – 42. https://fotius.cdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/Book_ІМТСК_2023.pdf. (Дата звернення: 15.09.2023).
20. Румянцев В. Р., Кутузова І. О. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань : навч. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 132 с.
21. ДСТУ 8302 : 2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с. (Інформація та документація).
22. ДСТУ 3008 : 2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. [На заміну ДСТУ 3008-95. Чинний від 2017-07-01]. Київ : Держстандарт України, 1995. 26 с. (Інформація та документація).