

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

**Кваліфікаційна робота / проект**

Другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему **Дослідження енергосилових режимів вільної ковки  
інструментальних сталей**

Виконав: студент II курсу, групи 8.1362-омт  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

М. О. Кармазін

(ініціали та прізвище)

Керівник

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

Рецензент

зав. каф. МТЕТБ, д.т.н., проф. Ю.О. Белоконь

Запоріжжя – 2023 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 другий (магістерський) рівень  
Спеціальність 136 «Металургія»  
(код та назва)  
Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 08 ” 09 2023 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Кармазіну Максиму Олексійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Дослідження енергосилових режимів вільної ковки інструментальних сталей**

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 “09” 10. 23 р. № 1581-с

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали переддипломної практики, курсові проекти, технічна документація ковальсько-пресового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь», літературні джерела.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина. Дослідно-розрахункова частина. Моделювання осадки заготовки в DEFORM 3D. Охорона праці та технологічна безпека. Економічні аспекти проблеми виробництва продукції.

Мета кваліфікаційної роботи – вдосконалення технологічного процесу вільної ковки шляхом дослідження енергосилового режиму ковки, комп'ютерного

моделювання процесу, порівняльного аналізу розрахункових формул, вибору високоефективного обладнання.

Змоделювати процес осадки циліндричних заготовок в САПР DEFORM, дослідити нерівномірність деформації при осаджуванні. Отримати картини формозмінення і деформаційного стану при постійному (від 10 до 80 %) обтиску заготовок. Виконати порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при осадці в залежності від геометричних характеристик зразка. Розрахувати енергосилові параметри процесу ковки та запропонувати встановити на ПрАТ «Дніпроспецсталь» швидкокувальний прес зусиллям 12,5 МН зі схрещеними бойками

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Креслення поковок, бойків, епюр напруження, 3D моделі заготовок у процесі осадки, технологічні переходи кування прокатного валка по базовій технології

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Вступ, реферат, розділи 1–5, висновки, перелік літератури	Проценко В.М., доц. каф. МТЕТБ	

7. Дата видачі завдання 08.09.2023 року.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, розділ 1.	12.09.23 – 13.10.23	
2.	Розділи 2 - 4	17.10.23 – 17.11.23	
3.	Організація виробництва, охорона праці, висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	21.11.23 – 08.12.23	

Студент

(підпис)

**Порвишерст М.Ю.**

(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 до випускної кваліфікаційної магістерської роботи містить: с. 127, рис. 23, табл. 19, літературних джерел 26.

**Об'єкт дослідження:** процес вільної ковки інструментальної сталі.

**Мета роботи:** вдосконалення технологічного процесу вільної ковки шляхом дослідження енергосилового режиму ковки, комп'ютерного моделювання процесу, порівняльного аналізу розрахункових формул, вибору високоефективного обладнання.

**Методи дослідження та апаратура:** комп'ютерне моделювання з використанням програмного комплексу DEFORM, розрахунки енергосилових параметрів за допомогою програмних комплексів Mathcad Prime 9 і Excel, порівняльний аналіз наведених в літературі розрахункових формул.

**Отримані результати та їх новизна.** В експериментальній частині роботи змодельований процес осадки циліндричних заготовок в САПР DEFORM, досліджена нерівномірність деформації при проведенні цієї операції і перевірена збіжність результатів з даними, наведеними в літературі. Для дослідження основних геометричних параметрів заготовки і деформуючого інструменту отримано картини формозмінення і деформаційного стану при постійному (від 10 до 80 %) обтиску заготовок.

Проведено порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при осадці в процесі вільної ковки в залежності від геометричних характеристик зразка. Розраховано енергосилові параметри процесу ковки (зусилля деформування і продуктивності пресу) та запропоновано встановити на ПрАТ «Дніпроспецсталь» швидкокувальний прес зусиллям 12,5 МН зі схрещеними бойками.

**Ключові слова:** КОВКА, ПОКОВКА, ДЕФОРМАЦІЯ, НЕРІВНОМІРНІСТЬ, ПРЕС, ПИТОМИЙ ТИСК, ОСАДКА, БОЙКИ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, КОЕФІЦІЄНТ КОНТАКТУ, МОДЕЛЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА .....	8
1.1 Стан проблеми .....	8
1.1.1 Технологія виробництва поковок з інструментальних сталей на ПАТ «Дніпроспецсталь» .....	8
1.2 Літературний огляд та аналіз наукової інформації .....	18
1.2.1 Визначення сортаменту .....	18
1.2.2 Особливості технологічного процесу виготовлення поковок ....	20
1.2.3 Основні принципи розробки технологічних процесів ковки .....	23
1.2.4 Конструювання поковки .....	23
1.2.5 Характеристики гідравлічного пресу 12,5 МН .....	25
1.3 Постановка задачі дослідження .....	28
2 ДОСЛІДНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	30
2.1 План проведення теоретичних досліджень .....	30
2.2 Методи розрахунку параметрів .....	31
2.2.1 Розрахунок маси поковок .....	31
2.3 Методика експерименту та визначення параметрів процесу .....	46
2.3.1 Порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується .....	46
2.3.1.1 Визначення зусиль деформування в процесі осадки злитків	46
2.3.2 Значення питомих зусиль для різних варіантів ковки .....	53
2.3.3 Розрахунок енергосилових параметрів ковки та вибір устаткування	60
2.3.3.1 Розрахунок зусилля пресу .....	61
2.4 Обробка та обґрунтування результатів досліджень .....	68
2.5 Пропозиції та заходи щодо вдосконалення процесу, технології .....	71
2.5.1 Розрахунок нової технології виробництва поковок прокатних валків	71
2.5.2 Технологічні переходи кування за новою технологією .....	73
2.5.3 Допоміжний інструмент .....	78
2.5.4 Розрахунок бойків зі схрещеною робочою поверхнею .....	79
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК В DEFORM 3D .....	83
3.1 Нерівномірність деформації при осадці циліндричних заготовок ....	83
3.2 Опис системи автоматизованого проектування DEFORM 3D .....	88
3.3 Моделювання процесу осадки циліндричних заготовок з різним співвідношенням початкових геометричних розмірів в DEFORM 3D і розрахунок показників нерівномірності деформації .....	89

3.4 Вдосконалення технологічного процесу ковки прокатних валків на базі DEFORM-3D .....	98
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА .....	103
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища ..	103
4.2 Заходи направлені на покращення умов праці на підприємстві .....	104
4.2.1 Освітлення .....	104
4.2.2 Теплообмін .....	105
4.2.3 Захист від механічних травм .....	106
4.2.4 Захист від надмірного теплового випромінення .....	107
4.2.5 Захист від шкідливих виділень .....	108
4.2.6 Захист від вибухів .....	108
4.2.7 Захист від шуму і вібрацій .....	109
4.3 Електробезпека .....	110
4.4 Пожежна та технологічна безпека .....	112
4.5 Економічні аспекти проблеми виробництва .....	114
4.5.1 Розрахунок капітальних витрат на реконструкцію .....	114
4.5.2 Розрахунок зміни собівартості тони продукції в результаті проведення реконструкції .....	114
4.5.3 Техніко-економічні показники .....	117
ВИСНОВКИ .....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	122
Додаток А – Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи ..	125

## ВСТУП

Обробка металів тиском дозволяє раціонально використати метал і забезпечити високу продуктивність устаткування. Розвиток цієї прогресивної і високоефективної технології немислимий без розвитку ковальсько-пресового виробництва.

Сучасний розвиток прокатного виробництва холоднокатаного металу, що характеризується безперервною інтенсифікацією холодної прокатки і ускладненням умов експлуатації прокатних валків вимагає з боку машинобудівних заводів посиленої уваги до питань якості валків і вдосконалення їх виробництва. В комплекс експлуатаційних властивостей валків входять передусім висока зносостійкість поверхневих шарів і конструкційна міцність усього валка.

Економічне витрачання металу при виготовленні поковок, що є актуальною задачею, закладене в самій ідеї пластичного формозмінення при обробці металу тиском, яка полягає в перетворенні заготовки простої форми в поковку складнішої форми того ж об'єму.

Досягнутий рівень ковальського виробництва визначає можливість швидкого, якісного і економічного створення найсучасніших літальних апаратів, транспортних і вантажопідйомних машин, потужних енергетичних установок, сучасних засобів оборони і іншої новітньої техніки. Чим вище потенційні можливості виробництва, тим важливіші завдання його вдосконалення. До високopersпективних виробництв можна віднести виробництво на базі процесів кування, що є одним з найважливіших в металургійній і машинобудівній технології, а також в інших найсучасніших галузях промисловості.

Мета кваліфікаційної роботи: вдосконалення технологічного процесу вільної ковки шляхом дослідження енергосилового режиму ковки, комп'ютерного моделювання процесу, порівняльного аналізу розрахункових формул, вибору високоефективного обладнання.

## **1 АНАЛІТИЧНО - ПОШУКОВА ЧАСТИНА**

### **1.1 Стан проблеми**

#### **1.1.1 Технологія виробництва поковок з інструментальних сталей на ПрАТ «Дніпроспецсталь»**

ПрАТ «Дніпроспецсталь» є єдиним в Україні виробником інструментальних і швидкорізальних сталей широкого марочного і профільного сортаменту різного призначення. Велика частина обсягу виробництва таких сталей призначена для постачання на експорт, в т. ч. у країни Західної Європи і Америки. У зв'язку з цим питання розробки високоефективної технології виробництва інструментальних сталей і забезпечення рівня їх якості, що відповідає вимогам стандартів високорозвинених країн, були і залишаються актуальними, вимагаючи постійної досконалості.

У багатьох випадках іноземний марочний сортамент наближений до сортаменту сталей, наявних у вітчизняних ГОСТ і ДСТУ. Проте вимоги до кінцевої металопродукції мають значні відмінності і являються в окремих випадках специфічними і відсутніми в нашій нормативній документації. Тому у ряді випадків для раніше за добре відпрацьований в технологічному плані сортамент при отриманні нових запитів потенційних покупців були потрібні істотні технологічні доопрацювання [1-3].

Залежно від вимог, що пред'являються до металу, інструментальні сталі на заводі «Дніпроспецсталь» виплавляються у відкритих електропечах з подальшою позапічною обробкою на установці «піч-ківш» фірми «Даніелі» і вакууматорній установці фірми «Манесман-Демаг», а також з рафінуванням в печах електрошлакового плавлення. На заводі є можливість виплавки сталі з використанням печей вакуумно-дугового плавлення.

Технологія виплавки інструментальних сталей передбачає максимальне видалення газів, шкідливих домішок (сірки і кисню) і оптимізацію змісту розкислення. Використання вказаних елементів технології обумовлене як



вимоги до якості металу, так і необхідністю забезпечення максимальної технологічної пластичності при подальшій деформації зливків.

Більшість високолегованих інструментальних сталей має знижену технологічну пластичність, що істотно утрудняє проведення бездефектного деформаційного переділу (ковки). Зливки окремих марок сталей, наприклад X12, X12МФ не підлягають деформації на високопродуктивному прокатному стані. Їх попередній переділ здійснюється малопродуктивним і витратним методом ковки. Крім того, після ковки зливків цих марок сталей у ряді випадків зустрічаються дефекти, що класифікуються як розриви по ліквацийним ділянкам. Нині проводяться дослідження, спрямовані на рішення цих проблем шляхом встановлення оптимальних звужених меж окремих хімічних елементів, а також розробки нових ефективніших режимів кінцевого розкислювання і модифікування металу в процесі його позапічної вакуумної обробки. Підвищення пластичності інструментальних сталей дозволить підняти технологію деформаційного переділу важкодеформованих інструментальних сталей на більш високий рівень.

У ковальсько-пресовому виробництві останніми роками спостерігається стійка тенденція до збільшення долі поковок великого розміру з інструментальних сталей: діаметром (стороною квадрата) до 600 мм; смугових перерізів розміром 100-300 × 400-600 мм. Такі поковки можуть робитися із зливків відкритої дугової виплавки за технологією, що включає осадку зливків, і із зливків електрошлакової переплавки діаметром 800 мм, які завод виробляв, переплавляючи неперервноліті електроди [4]. Після зупинки машини напівбезперервного розливання сталі на електроди, що витрачалися, великі зливки ЕШП почали робити з кованих електродів. Для підвищення ефективності виробництва розроблений і впроваджений технологічний процес отримання кованих витрачених електродів змінного перерізу для електрошлакової переплавки в кристалізатор діаметром 800 мм.

Інструментальні штампові і швидкорізальні сталі леговані вольфрамом, молібденом, ванадієм, хромом, які з'єднуються з вуглецем, утворюють

евтектичні карбіди, що практично не розчиняються в твердому розчині до температури плавлення. Наявність твердої непластичної карбідної фази в аустенітній матриці при температурі гарячої деформації і нерівномірний розподіл її по перерізу зливка або заготовлі обумовлює високий опір деформації і низьку технологічну пластичність.

Деформаційний переділ таких матеріалів призводить до утворення смужчастих структур, орієнтованих у напрямі деформації. Характерними прикладами можуть служити структурна смужчастість і карбідна неоднорідність, які є однією з причин істотного зниження експлуатаційних і технологічних властивостей інструментальних сталей.

Ефективним способом зменшення карбідної неоднорідності є гомогенізуюча термічна обробка зливоків перед деформацією і пластична деформація. Чим більше міри деформації, тим менше карбідна неоднорідність і краще якість сталі. Значний вплив на якість сталі впливає процес деформування.

Наявність різноманітного устаткування для обробки металу тиском в ПрАТ «Дніпроспецсталь» зумовила велике число технологічних схем деформаційного переділу зливоків і заготовок з інструментальних сталей. Разом з традиційними схемами, що включають кування зливоків на першому етапі і прокаткою на другому, на заводі успішно використовується і нетрадиційна схема, що включає прокатку зливоків з подальшим куванням катаних заготовок на сортові профілі.

Для деформації зливоків на заводі використовують преса зусиллям 60 і 32 МН, радіально-ковочну машину РКМ-1000 і заготівельний прокатний стан 1050/950.

Для гарячої деформації кованих або катаних заготовок додатково до вказаних агрегатів використовують молот з масою падаючих частин - 3 т, радіально-кувальну машину РКМ 340 і сортові прокатні стани 550, 325 і 280.

При цьому схеми деформації інструментальних сталей включають від 2 до 4 операцій кування і прокатки з проміжними операціями уповільненого

після деформаційного охолодження, відпалу, абразивної зачистки поверхні деформованої заготовки і нагріву під подальше кування або прокатку. Для забезпечення підвищених вимог до структури і механічних властивостей готової продукції роблять гомогенізуючий нагрів зливків перед деформацією, роблять дві операції осадки зливків з проміжним протяганням і ряд інших спеціальних деформаційно-термічних обробок. При цьому гомогенізуючі нагриви в 3-4 рази довші звичайних за діючою технологією. Розроблені і впроваджені режими гомогенізації зливків сталей 4X5МФ і 4X5МЗФ, приведені в табл. 1.1.

Можливі поєднання різних способів обробки металу тиском утворюють сукупність з десятків технологічних схем, кожна з яких забезпечує отримання цілого ряду профілів певної якості.

При цьому структура інструментальних сталей, а з нею і службові властивості багато в чому визначаються технологією обробки тиском: поєднанням способів деформування, мірами одиничних обтисків, швидкостями, температурою і сумарних ступенів деформації.

**Таблиця 1.1** – Режими гомогенізації зливків сталей 4X5МФ і 4X5МЗФ

№ з/п	Температура витримки по східцях, °С		Час витримки по східцях, ч	
	перед куванням	перед прокаткою	перед куванням	перед прокаткою
1	950	950	5	2
2	1050	1050	6-7	5
3	1150	1150	6-7	5
4	1250	1240	14-16	3-6
5	1200	1180	3-6	2-4

Вибір технологічної схеми визначається головним чином вимогою до якості продукції. Другим критерієм вибору способу деформації зливків і заготовок є економічна доцільність тієї або іншої схеми.

Кування забезпечує індивідуальні умови деформації кожного зливка і заготовки за рахунок оперативної зміни режимів деформації залежно від технологічної пластичності сталі. При куванні застосовують проміжний підігрів поковок до температур максимальної пластичності металу, проміжне

обдирання поковок для видалення поверхневих дефектів, що утворюються, або вирубування дефектів в гарячому стані.

Крім того, кування на пресах і молотах забезпечує ідеальну схему тристороннього стискування по усьому перерізу профілю. В результаті цієї обробки отримана металопродукція характеризується високою якістю поверхні і інтенсивного опрацювання осьової зони прутка [3 – 5].

Проте при всій своїй гідності кування - малопродуктивний процес з великими втратами металу в чад, окалину, кускові відходи, абразивний пил і стружку, що обумовлює високу собівартість поковок.

Тому з метою зменшення витрат на виробництво металопродукції в останній час на заводі проведений ряд робіт по заміні операції кування на пресах, прокатці на заготівельному стані 1050/950 і заміні операції кування на молотах прокаткою на сортовому стані 550 [5, 6].

Однією з найбільш ефективних робіт в цьому напрямі стало освоєння пресування швидкорізальних сталей на заготовку для прокатних станів [7, 8].

Прокатка порошкових сталей на блюмінгу дозволяє збільшити продуктивність процесу деформації пресувань, підвищити точність профілю і поліпшити структуру металу за рахунок зменшення числа нагрівів перед деформацією.

Зі зменшенням сумарного часу знаходження металу при високій температурі зменшується розмір карбідів і аустенітних зерен і, отже, покращуються експлуатаційні властивості сталі.

Встановлений значний вплив калібрування і режимів деформації на розподіл обичайки по периметру профілю прокату [9]. При видаленні частини обичайки на пресуванні (перед прокаткою) нерівномірність розподілу обичайки по периметру профілю прокату зберігається. При видаленні половини товщини обичайки з поверхні пресування товщина обичайки на кутах катаної заготовки складає 0,4-0,6 мм, на гранях – 1,0-1,5 мм. Внаслідок нерівномірності деформації в квадратних, ромбічних, овальних і круглих калібрах збільшення сумарної міри деформації при прокатці збільшує

нерівномірність розподілу обичайки по периметру профілю. Прокатка заготовки з невидаленою обичайкою на стані 280 із загальним коефіцієнтом витягу від 30 до 200 вимагає збільшення знімання металу при обточуванні на 100 кг/т в порівнянні з плющенням на станах 325 і 550 з коефіцієнтами витягу від 2,5 до 25. Тому прутки діаметрами 8-22 мм роблять на стані 280 із заготовки, зачищеної суцільно до повного видалення обичайки, за винятком сталей Р6М7Ф6К10-МП, Р12МФ5К5-МП, Х18МФ6-МП, абразивна зачистка яких дуже нетехнологічна, викликає утворення шліфувальних тріщин.

Зростання потреби машинобудування індустріально розвинених країн на прутки з інструментальних високолегованих сталей ледебуритного класу зажадав освоєння технології плющення на стані 550 сталей типу Х12, Х12МФ (1.2080, 1.2379 за DIN17350), порошкових швидкорізальних сталей усього марочного сортаменту ПрАТ «Дніпроспецсталь», а також швидкорізальних сталей відкритої дугової виплавки Р6М5, Р18, Р9 замість кування.

Технологію нагріву заготовок і їх прокатка розробляли на основі результатів дослідження пластичності і опору деформації при крученні і ударній в'язкості при температурі 800-1200 °С [9].

На сьогодні зроблені тисячі тон прокату діаметром 44-95 мм із сталей Х12, Х12МФ на експорт. При цьому витратний коефіцієнт при прокатці заготовки перерізом 125 x 125 мм на готовий профіль для сталі Х12 складає 1,080, для сталі Х12МФ – 1,090. При куванні цей показник для обох сталей перевищує 1,120.

Отримана на стані 550 продукція з інструментальних сталей ледебуритного класу відповідає вимогам DIN17350. За якістю мікроструктури (карбідна неоднорідність, розмір аустенітного зерна) вона не поступається кованим, а в деяких випадках і перевершує її.

Це пов'язано з тим, що карбідну фазу здатна зруйнувати зміцнена матриця, для отримання якої необхідно зменшити паузи між одиничними обтисками звести до мінімуму статичне зміцнення аустеніту. Такі умови більшою мірою забезпечуються прокаткою, тому що вона робиться за

короткий проміжок часу і в певних проходах забезпечується максимальне зміцнення аустеніту, подальша деформація якого призводить до руйнування карбідів, їх переміщення уздовж лінії прокатки і зменшення карбідної неоднорідності.

Для розробки режимів термічної обробки, що забезпечують отримання потребуючих показників якості, з використанням дилатометра японського виробництва проводяться дилатометричні дослідження фазових перетворень в процесі нагріву і охолодження сталі.

Зазвичай для розробки і коригування режимів термічної обробки визначають критичні точки  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  при нагріві металу і  $A_{r3}$  і  $A_{r1}$  при охолодженні. Результати дослідження зразків ряду інструментальних сталей приведені в табл. 1.2.

Переділ підкату інструментальних сталей включає холодне або тепле волочіння після хімічної обробки поверхні або спеціальну обробку прутків обточкою, шліфовкою, поліровкою.

З метою підвищення пластичності важкодеформованих інструментальних сталей ледебуритного класу перед деформацією підкат, розмотуючись з бунту, поступає в індуктор, де нагрівається до температури  $500-800^{\circ}\text{C}$  і в теплому стані деформується у волоці барабанного стану. Для індукційного високочастотного нагріву підкату діаметром 2-14 мм використовуються установки ЛЗ-107, ВЧГ-3.160 і УІН-250-10/120-20.

**Таблиця 1.2** – Критичні точки інструментальних сталей [10]

№ з/п	Марка сталі	Номер плавки	Критичні точки $^{\circ}\text{C}$			
			$A_{c1}$	$A_{c3}$	$A_{r3}$	$A_{r1}$
1	95X5ГМ	32853	770	795	710	670
2	95X5ГМФ	10282	780	815	720	675
3	P10M2Ф5K8-МП	026049	805	825	750	710
4	P12MФ5K5-МП	026369	820	845	760	720
5	P10M3Ф4K8-МП	026211	825	850	780	755
6	P0M2Ф10C-МП	026191	825	855	765	730

№ з/п	Марка сталі	Номер плавки	Критичні точки			°С
			Ас <sub>1</sub>	Ас <sub>3</sub>	Аγ <sub>3</sub>	Ап
7	Р6М5Ф4-МП	027184	810	855	740	690
8	ХВ4Ф	165476	745	795	720	680

Бунтову сталь, що калібрується, після відпалу правлять і розкроюють на мірні довжини за допомогою правильно-відрізних верстатів. Спеціальну обробку поверхні прутків інструментальних сталей роблять на обдирних верстатах фірми «Кизерлинг» або шліфувальних верстатах ВШ-622 і ВШ-620Н.

Поліпшення якості обточеної і шліфованої поверхні - важлива умова конкурентоспроможності продукції заводу на світовому ринку, яке досягається за рахунок розробки і впровадження нових технологічних прийомів: удосконалення інструмента, режимів різання, модернізації існуючого і установки нового обладнання для обробки металопродукції.

Обробка металу на ад'юстаж механізована і робиться на агрегатних лініях і високопродуктивних верстатах.

Металопродукція з інструментальних сталей може поставлятися з вибіркової, суцільною зачисткою поверхні абразивним інструментом або в обточеному стані. Залежно від вимог споживача з урахуванням профільного сортаменту методом абразивної зачистки досягається шорсткість обробленої поверхні  $R_z < 80-120$  мкм, методом різцевого обточування –  $R_z < 40-80$  мкм. Гарячекатані і ковані прутки квадратного перерізу, смуги завтовшки або стороною квадрата 100 мм і більше поставляються з суцільною зачисткою або стругальними, або що фрезеруються по погодженням із споживачем із забезпеченням шорсткості поверхні  $R_z < 100$  мкм.

При цьому на заводі розроблена і впроваджена технологія підготовки до абразивної обробки тріщіночутливих інструментальних, у тому числі ледебуритних сталей. Підібраний спеціальний абразивний інструмент, що

дозволяє робити спецобробку, обдирання і чистову шліфовку вище перерахованих сталей, включаючи кобальтові швидкоріжучі.

Обточування прутків діаметром 150-600 мм роблять на токарних верстатах в центрах, діаметром 45-350 мм – на безцентрово-токарних верстатах із забезпеченням шорсткістю поверхні  $R_z \sim 40-80$  мкм.

З метою розширення сортаменту сталі із спеціальною обробкою поверхні і задоволення зростаючих вимог до прокату по точності геометричних розмірів, кривизні прутків і шорсткості поверхні в умовах заводу введений в експлуатацію новий сучасний цех ад'юстажної обробки металу, в якому встановлені дві автоматичні лінії фірми «Ландграф» для обробки прокату завдовжки від 3 до 7 м. Перша лінія призначена для обробки прутків діаметром від 21 до 75 мм на чистові діаметри від 20 до 70 мм з точністю, що відповідає квалітету  $h_9$ , шорсткістю поверхні  $R_a < 1,4$  мкм і кривизною не більше 0,4 мм на метр довжини. Вона включає правильно-косовалкову машину ОВВ 400×5, виготовлену Старокраматорським машинобудівним заводом, обдирний верстат 75КС, фаскознімальний верстат, правильно-полірувальну машину RMB2 - 80. Ця лінія забезпечена приладами контролю якості прутків: є лазерна установка для виміру геометричних розмірів профілю, вихрострумний дефектоскоп для оцінки якості поверхні і прилад для сортування прутків за марками сталі.

Друга лінія призначена для обробки прутків діаметром від 51,5 до 212 мм на чистові розміри від 50 до 200 мм з точністю по квалітету  $h_9$  і шорсткістю поверхні  $R_a < 1,4$  мкм до круга 130 мм і  $R_a < 5,0$  мкм для діаметрів 130-200 мм.

Ця лінія включає обдирний верстат 200КІ і правильно-полірувальну машину RMB2 – 130. Як і перша, вона забезпечена приладами для автоматичного лазерного вимірювання геометричних розмірів профілю, для визначення поверхових дефектів і для сортування прутків за марками сталі.

Технологія фірми «Landgraf» повністю забезпечує вимоги, що пред'являються до сталі з точністю обробки по квалітету  $h_9$ . У новому цеху маємо можливість виконати різання і упаковку готової продукції, що дозволяє



покращувати її товарний вид і захищати метал від зовнішніх дій під час зберігання і транспортування.

Велику увагу споживачі інструментальних сталей приділяють якості торців сортового прокату і поковок [19].

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності різання металу в холодному стані, особливо тріщиночутливих інструментальних сталей, є впровадження стрічкопильного різання, яке відрізняється від абразивного і анодно-механічного різання чистим, точним різом. Цей метод різання дозволяє понизити величину шорсткості торця, наблизити її до шорсткості обточеної або шліфованої поверхні, не змінюючи поверхневої твердості і структури металу в зоні різання.

Для успішного просування товару на ринок недостатньо дотримання вимог до точності розмірів і якості металу. Замовники хочуть отримувати продукцію презентабельного виду, і це вважається одним з параметрів оцінки якості. Якщо раніше досить було усунути тільки поверхневі дефекти, то тепер вимоги споживачів до зовнішнього вигляду металопродукції істотно змінилися.

Для забезпечення доставки продукції відповідно до вимог контрактів і технічних протоколів робиться консервація металу, що забезпечує захист його від корозії в різних кліматичних умовах. Для цього застосовуються масляні консерванти з упаковкою і без неї.

Як відомо, один і той же товар можна піднести по-різному. І упаковка тут грає далеко не останню роль. Освоєні нові види м'яких пакувальних засобів, армованих міцними матеріалами, що виключають руйнування попередньої упаковки при транспортуванні і зберіганні в різних кліматичних умовах (багатошарові пакувальні матеріали типу Lamiflex, Propaflex і Nolkoflex).

Маркування готової продукції теж зазнала значні зміни, проблеми вирішені шляхом застосування нових етикеток, які зараз використовують для позначення металу марки «Дніпроспецсталь», мають сучасний вигляд. Їх

можна зміцнити навіть на необробленій поверхні торців металопродукції, що дозволяє швидко і легко відшукати необхідну партію товару на складі. Зараз уся металопродукція забезпечена маркуванням, що відповідає світовим стандартам.

## 1.2 Літературний огляд та аналіз наукової інформації

### 1.2.1 Визначення сортаменту

На станах холодної прокатки зазвичай застосовуються сталеві ковани валки. Процес виробництва їх є складним і трудомістким. Тривалість циклу виробництва таких валків досягає 2-4 місяці. Технологічна схема виробництва валків складається з наступних основних операцій:

виплавка і розливання сталі;

ковка зливків і заготовок;

механічна і попередня термічна обробка поковок;

механічна обробка валків під загартування;

загартування валків і подальша їхня механічна обробка (обробка шийок, шліфування бочки).

Трудомісткість за витратами вказаних операцій стосовно робочих валків середніх розмірів приведена в табл. 1.3.

**Таблиця 1.3** – Трудомісткість операцій стосовно робочих валків [11]

Виплавка сталі	Близько 35 %
Кування зливка	Близько 25 %
Термічна обробка	Близько 17 %
Механічна обробка	Близько 21 %
Інші (упаковка, транспортування)	Близько 2 %

Для виготовлення робочих валків застосовуються високовуглецеві хромисті сталі типу 9Х. Для збільшення жароміцності і зменшення схильності зерна до зростання ці сталі у ряді випадків додатково легують молібденом, ванадієм, вольфрамом, а для підвищення теплостійкості – кремнієм (табл. 1.4).

**Таблиця 1.4** – Хімічний склад сталей, вживаних для виробництва валків холодної прокатки (ГОСТ 3547 – 57) [12]

Марка сталі	Зміст, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	V	Ni	W
				Не більше					
9Х	0,80-0,95	0,20-0,35	0,25-0,45	0,030	0,030	1,40-1,70	-	≤0,25	-
9Х2	0,85-0,95	0,20-0,35	0,25-0,45	0,030	0,030	1,70-2,10	-	≤0,30	-
9ХФ	0,85-0,95	0,20-0,45	0,20-0,40	0,030	0,030	1,40-1,70	0,10-0,25	≤0,30	-
9Х2В	0,85-0,95	0,20-0,35	0,25-0,45	0,030	0,030	1,70-2,10	-	≤0,30	0,30-0,60
9Х2МФ	0,85-0,95	0,20-0,35	0,25-0,45	0,030	0,030	1,70-2,10	0,10-0,20	≤0,30	-
9Х2СФ	0,85-0,95	0,20-0,35	1,30-1,60	0,030	0,030	1,70-2,10	0,10-0,20	≤0,30	-
80ХНЗВ	0,75-0,85	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	1,40-2,10	-	2,70-3,20	0,50-0,70
45ХНВ	0,40-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	1,30-1,70	-	1,20-1,60	0,50-0,80
55Х	0,50-0,60	0,35-0,65	0,17-0,37	0,040	0,040	1,00-1,30	-	≤0,30	-
50ХГ	0,46-0,54	0,70-1,00	0,17-0,37	0,040	0,040	0,90-1,20	-	≤0,40	-

За призначенням валки розділяються на робочі і опорні. Особливо високі вимоги пред'являються до робочих валків.

Основні показники якості робочих валків являються:

1. Значення поверхневої твердості і міра рівномірності розподілу її по бочці;
2. Глибина «активного» загартованого шару.

ГОСТ на сталеві валки холодної прокатки металів передбачає фактично один показник якості – твердість бочки валків. По твердості валки діляться на чотири класи, які одночасно визначають їх призначення:

- А - робочі валки з твердістю 95 - 102 HSh.
- Б - робочі валки з твердістю 90 - 94 HSh.
- У - робочі валки з твердістю 70 - 85 HSh.
- Г - робочі валки з твердістю 45 - 69 HSh.

Для опорних валків великого діаметру твердість 70 - 85 HSh може бути досягнута тільки в результаті виготовлення складених валків при нагріві з подальшим загартуванням в термічних печах і суцільнокованих валків при загартуванні за допомогою індукційного нагріву ТПЧ.

Поверхнева твердість загартованих робочих валків залежить від режиму температур відпуску (температура і тривалість), що призначається відповідно до необхідної твердості і перерізу валка. Валкові сталі мають різні режими відпускання.

### **1.2.2 Особливості технологічного процесу виготовлення поковок**

Якість і експлуатаційна стійкість валків холодної прокатки залежить від правильного вибору раціональної технології і режимів кування. Важливою умовою, що забезпечує високу якість поковок валків і зменшення браку при їх виробництві, є суворе дотримання технологій [13].

Основна мета ковки полягає в зменшенні неоднорідності будови металу, ущільнення його внаслідок заварювання тріщин, газових пухирів і інших дефектів, властивих литій структурі. В процесі ковки структуру сталі необхідно прокувати по усьому перерізу, забезпечуючи якнайповніше руйнування первинної карбідної сітки і окремих кристалітів. При куванні слід

домагатися найбільш вигідного розташування волокон в поковці і сприятливого співвідношення механічних властивостей як в подовжньому, так і в поперечному перерізах, значно зменшити анізотропію властивостей по цих напрямках і по перерізу поковки.

Технологічний процес виготовлення поковок валків складається з наступних основних операцій:

- білетирування зливка;
- осадка зливка;
- протягання бочки і шийок;
- обробка в розмір бочки і шийок;
- обрубання кінців.

Кількість нагрівів, під час яких виконуються вказані операції, залежить від об'єму роботи при куванні, маси поковки і потужності ковальсько - пресового устаткування.

Нині поковки робочих валків холодної прокатки залежно від їх розміру і маси виготовляють на машинобудівних заводах за способом вільної ковки за допомогою гідравлічних кувальних пресів або пароповітряних кувальних молотів.

Білетирування зливка, поперечний переріз якого має форму восьмигранника, є обтискання ребер і граней зливка з метою підвищення пластичності металу, що необхідно для успішного здійснення кування на подальших операціях. Білетирування злиwkів звичайної конусності (2 – 5 % на сторону) не представляє особливих технологічних труднощів. Під час цього процесу тіло зливка перетворюють на циліндричний блок. Зливки збільшеної конусності (понад 5 % на сторону) можна білетирувати як на циліндричний, так і на конічний блок. При такому зливку довжина циліндричного блоку може виявитися надмірно великою і негативно вплинути на подальшу його осадку. У наслідку цього білетирування таких злиwkів виконують переважно на конічний блок.

Власне операцію білетування роблять в нижньому вирізному і верхньому плоскому бойках. Якщо поверхня зливка хороша, а метал в литому стані має достатню технологічну пластичність, то білетування можна не робити.

У процес білетування, окрім самого білетування, входить також ковка прибуткової частини на круг-цапфу для утримування зливка в патроні кантувальника або захоплення маніпулятора. Довжина цапфи для надійного утримування зливка рівна зазвичай 1,7 – 1,3 діаметру цапфи для злиwkів масою 3 – 12 тон, яка знаходиться в межах 320 – 500 мм. Залишок металу з кінця прибуткової частини після оформлення цапфи відрубують.

Останньою в процесі білетування роблять операцію відрубання донної частини обжатого блоку. Для отримання чистого торця, обрубку роблять з поворотом послідовно за три ходи пресу. При цьому з боку донної частини поступає у відхід 20 – 50 мм металу по довжині блоку.

Наступна операція – осадка (одинарне або подвійне). Осадка сприяє дробленню дендритної структури металу зливка і карбідної сітки, більше рівномірному розподілу карбідів металу, що за об'ємом деформується, і разом з цим покращує механічні властивості в подовжньому і поперечному напрямках, знижує анізотропію металу поковок валка.

Ковка більшості основних марок сталі робиться в інтервалі температур 1150 - 800°C. при більш високих температурах і тим більше при тривалих витримках металу з'являється «раковистий злам», сприяючий руйнуванню валків. Повільне охолодження від температури кінця кування до температури 600°C (копежа) призводить до виділення карбідної сітки, тому копеж рекомендується при нижчих температурах (300 - 400°C).

Контроль на карбідну сітку і карбідну ліквацию проводиться по ГОСТу 801 - 60 в поверхневих і осьових зонах поковок. При наявності карбідної сітки з балом  $\geq 4$  потребує подвійне поліпшення.

Після осадки, залежно від практики виробництва, блоки піддають витягу за схемою круг - круг або круг - квадрат - круг. Поковки валків діаметром 230

- 370 мм виготовляють під пресами. Після осадки зливки простягають з круга на круг або через квадрат на дві - чотири мірні заготівлі. З кожної заготівлі під пресом виковують один - два валки.

### **1.2.3 Основні принципи розробки технологічних процесів ковки**

Розробка технології кування поковок заснована на двох головних принципах:

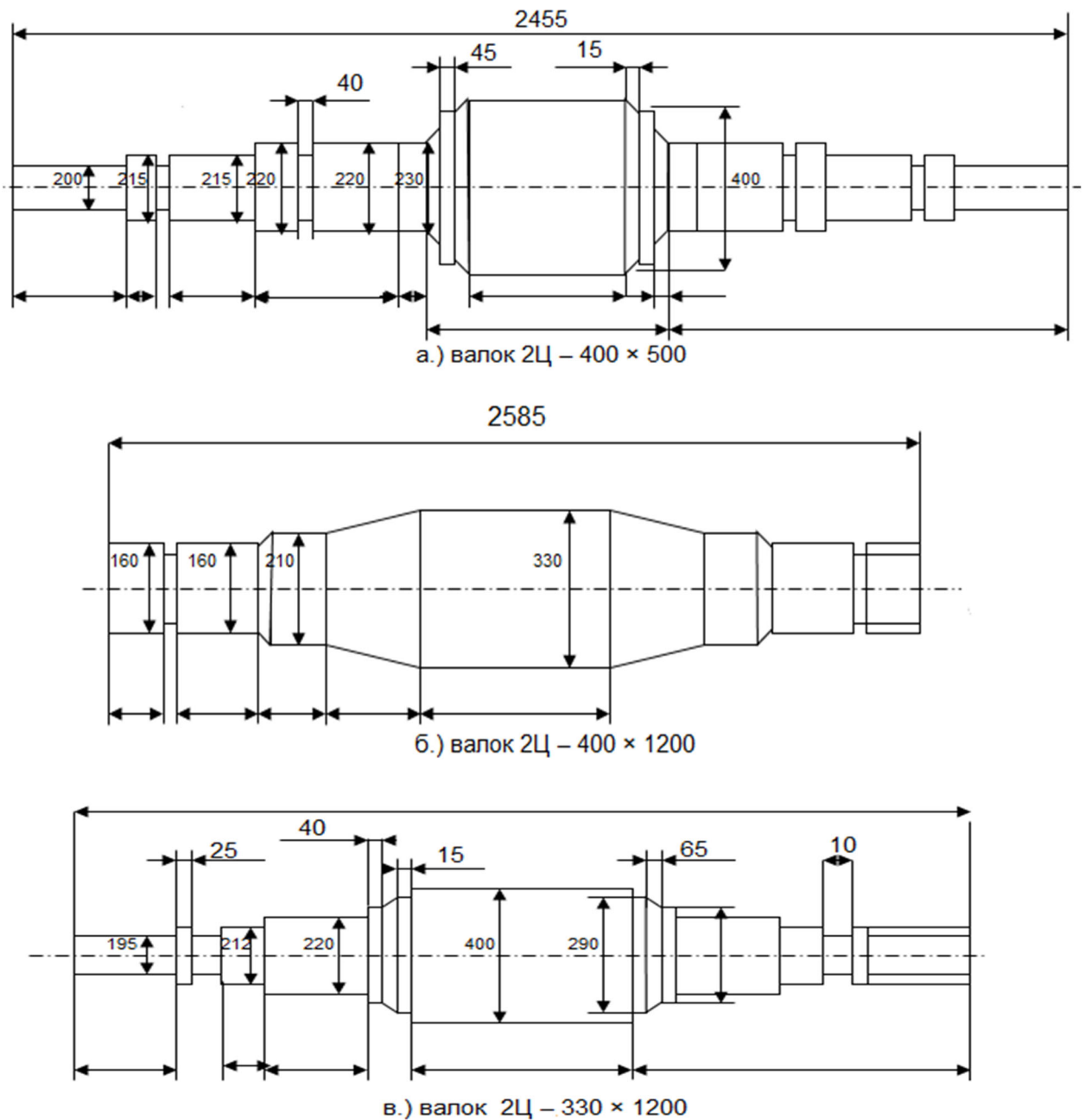
- досягнення найбільш високої якості поковок, що забезпечується чистотою сталі і якістю зливка, схемою побудови процесу ковки, правильністю призначення і точністю виконання термомеханічних режимів кування;
- забезпечення економічності процесу виготовлення поковки, а також перетворення її в чисту деталь, що визначається найменшою витратою металу, палива, найменшою тривалістю циклів нагріву і кування.

При розробці технологічного процесу кування послідовно вирішують наступні завдання:

- Вибір оптимального варіанту креслення (ескіза) поковки;
- Вибір технологічної схеми кування;
- Визначення типу устаткування;
- Розрахунок необхідної по розмірах, маси і типу заготовки (зливка) з урахуванням способу виплавки;
- Визначення кількості переходів і режимів кування;
- Вибір необхідного інструменту, пристосувань;
- Призначення температурного інтервалу кування, режимів нагріву заготовки (зливка) і охолодження поковки.

### **1.2.4 Конструювання поковки**

Для побудови креслення поковки використовується в якості початкової інформації конструкторське креслення деталі [14]:



**Рисунок 1.1** – Конструкторське креслення деталі

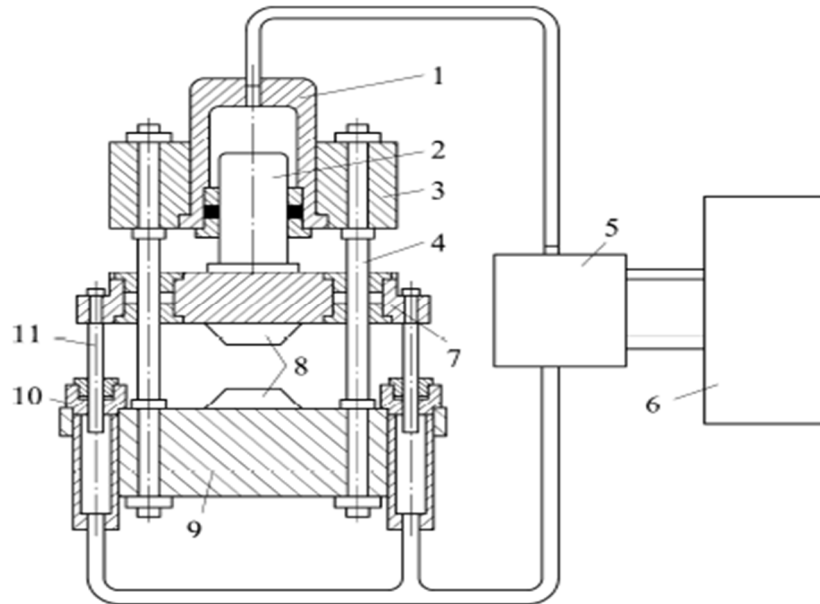
Тип поковки визначається по ГОСТ 7062-79, виходячи із співвідношення геометричних розмірів деталі і її форми [6]. У цій роботі розглядається технологічна схема виробництва валків холодної прокатки, які за типом поковки є поковка круглого перерізу з уступами (рис. 1.1).

Відношення довжини деталі до максимального розміру повинне перевищувати 1:2.



### 1.2.5 Характеристики гідравлічного пресу 12,5 МН

Гідравлічний прес зусиллям 12,5 МН призначений для виконання усіх операцій вільної ковки, а так само деяких операцій штампування, що не вимагають строгого напрямку рухливої траверси. Використовується для кування вуглецевих і високовуглецевих сталей і сплавів, кольорових металів і їх сплавів (рис.1.2).



1 – робочій циліндр; 2 – плунжер; 3 – верхня нерухома поперечка; 4 – колона; 5 – система керування; 6 – привід; 7 – рухома поперечка; 8 – бойки; 9 – нижня нерухома поперечка; 10 – циліндри; 11 – плунжер

**Рисунок 1.2** – Схема гідравлічного пресу зусиллям 12,5 МН

Для кування злиwkів масою більше 2-3 т використовують гідравлічні преси із зусиллям від 5 до 150 МН і більше [17]. Гідравлічні преси деформують поковку не ударною дією, а поступовим просуванням інструменту. При цьому в процесі роботи ходу бойків безперервно підводиться енергія, для цього використовується вода або олія під високим тиском. Приводи в гідравлічних пресах по конструкції діляться на насосні, насосно-акумуляторні і мультиплікаторні.

Сили які виникли в процесі роботи гідропресу замикаються в станині і на фундамент не передаються. Фундаменти гідропресів значно дешевші за

молоткові. Недоліками гідропресів є їх тихохідність, невисока продуктивність і складність в експлуатації із-за наявності рідини високого тиску, з якою можуть працювати тільки спеціально навчені робітники. Принципова схема облаштування гідравлічного ковальського пресу показана на (рис. 1.2).

Робоче зусилля пресу створюється рідиною (водною емульсією або мінеральною олією) високого тиску, що подається в робочий циліндр 1 від приводу 6 через систему управління 5. Рідина давить на плунжер 2, який передає зусилля на рухливу поперечку 7. Остання переміщається по колонах 4, жорстко сполученим верхньою і нижньою нерухомими поперечками 3 і 9. При опусканні поперечки 7 рідина з поворотних циліндрів 10 витісняється плунжерами 11. Заготовка деформується бойками 8, які прикріплюють до нерухомої 9 і рухливою 7 поперечкам. Для підйому поперечки 7 після робочого ходу рідина під тиском подається в поворотні циліндри 10, а з робочого циліндра 1 витісняється плунжером 2. Таким чином, поперечка здійснює прямий і зворотний ходи. Прямий хід має дві ділянки: наближення, при якому робочий інструмент підводиться до заготовки, і при цьому заготовка деформується. Зупинки рухливої поперечки для виконання допоміжних операцій (зміни інструменту, переміщення заготовки і так далі) називаються технологічними паузами.

Гідропресова установка складається з власне пресу, приводу (джерела рідини високого тиску, що живить прес), приймачів для рідини (баків), органів управління, трубопроводів.

При роботі гідравлічних пресів рідина високого тиску витрачається тільки під час прямого і зворотного робочого ходу, а хід зближення здійснюється за рахунок рідини низького тиску. Тому в гідроприводі пресів часто використовують спеціальні пристрої – акумулятори, що дозволяють накопичувати рідину високого тиску під час технологічних пауз і прямого холостого ходу (наближення). Це дає можливість знижувати настановну потужність приводу (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Характеристики вертикального двоколонного пресу [18]

№	Найменування параметра.		Од. вим.	Вел-на
1	Номінальне зусилля		МН	12,5
2	Робоча рідина			олія
3	Максимальний робочий тиск олії		МПа	32,0
4	Тиск повітря в наповнювачі		МПа	0,3-0,4
5	Найбільший робочий хід пересувний траверси		мм	1250
6	Відстань від столу до рухливої траверси у верхньому її положенні		мм	2650
7	Ширина робочої зони упоперек осі кування		мм	1900
8	Відстань між центрами колон		мм	3500
9	Розміри столу	Ширина	мм	1250
		довжина	мм	3150
10	Номінальний хід столу		мм	1500
11	Число робочих ходів в хвилину (при ході поперечки до 165 мм)			20
12	Число шлітованих ходів в хвилину (при ході поперечки до 40 мм)			45
13	Маса установки		т	250
14	Максимальна вага пресу	Станина	т	37
		Рухливі траверси	т	16
15	Кількість східців			1
16	Точність кування			±98-1,5
17	Встановлена потужність електродвигуна		кВт	1150
18	Габаритні розміри	У плані	мм	33000 15500
		Висота над рівнем підлоги	мм	4800
		Заглиблення під підлогою	мм	5000
19	Глибина фундаментного прямика		мм	7800

### 1.3 Постановка задачі дослідження

З вищенаведеної інформації витікає, що ковальсько-пресове обладнання і технологія ПрАТ «Дніпроспецсталь» морально і фізично застарілі, використовуються з початку 60-х років, і з метою підвищення якості продукції, продуктивності процесів, зменшення часу простоїв і ремонтів необхідне технічне переозброєння виробництва.

Існують резерви підвищення якості металу і пов'язані вони в першу чергу з можливостями регулювання пластичної течії металу в процесі ковки. Ці можливості склали предмет теоретичних досліджень, а також реалізації їх результатів в промисловості для виробництва відповідальних поковок, що мають поліпшені фізико-механічні властивості, заданою макробудовою і підвищеним запасом експлуатаційної надійності і довговічності. Разом з перевагами економічного характеру, особливо при великосерійному виробництві, обробка металів тиском у ряді випадків є єдино можливим способом отримання виробів заданої форми, особливо з високоміцних металів і сплавів, що мають спеціальні властивості, а нові можливості її застосування, що виявилися за останні роки, відкривають перед цим способом обробки подальші шляхи розвитку і широкого впровадження в промисловість.

Впровадження досягнень теорії обробки металів тиском до аналізу течії металу дозволило отримати рішення, в яких умови реальних процесів деформації, як і відповідна їм напруга і сила, є предметом вивчення в теорії обробки металів тиском, зокрема в теорії кування.

Вплив багатьох фізико-математичних чинників на протікання процесів пластичного формозмінення металів обумовлює складність побудови математичної моделі цих процесів. Через це, з одного боку, є необхідність в схематизації і спрощуючи припущеннях (тобто приблизність математичного рішення задачі), а з іншого боку, необхідність використання даних експериментальних досліджень.

У сучасному металургійному виробництві для розробки технологічного процесу з використанням нового устаткування, нових матеріалів, для впровадження нових технологій все частіше використовують системи автоматизованого проектування (САПР).

Одна з цілей цієї роботи - встановити збіжність результатів, що отримуються при моделюванні процесів обробки металів тиском в САПР з експериментальними даними. У експериментальній частині роботи змодельований процес осадки циліндричних заготовок в САПР DEFORM 3D, досліджена нерівномірність деформації при проведенні цієї операції і перевірена збіжність результатів з даними, приведеними в літературі.

Ця магістерська робота спрямована на збільшення продуктивності процесу вільного кування і підвищення якості готових виробів шляхом заміни старого устаткування, застарілого морально і що має великий фізичний знос (простої цеху унаслідок ремонту устаткування займають більше 50 % робочого часу). Прес зусиллям 32 МН, знаходиться в постійній експлуатації з початку 60 - х років. Новий швидкоковочний гідравлічний прес з нижнім циліндром та зусиллям 12,5 МН, виробництва НВО «Дніпропрес», не вимагає постійного позапланового ремонту, і отже, при постійній роботі без простоїв, більш ніж в 2 рази збільшить продуктивність цеху.

Однією з основних цілей цієї роботи – це зробити порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при формуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується.

Зробити розрахунок енергосилових параметрів і установка на пресі схрещених бойків, набагато спрощує технологічний процес кування, що значно підвищує годинну продуктивність пресу:

- ковальський цикл скорочений на 30 %;
- усувається трудомістка і енергоємна операція осадки;
- підвищуються механічні властивості оброблюваного металу.

Комп'ютерне моделювання процесу вільного кування дозволяє оптимізувати технологічний процес без великої кількості дорогих експериментів на діючому устаткуванні, наочно представити етапи формозмінення металу і характер напруженого стану по окремих зонах, розрахувати енергосилові параметри процесу кування.

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 План проведення теоретичних досліджень

В даному розділі необхідно вирішити задачі, поставлені після проведеного аналізу першого розділу, а саме проблем, пов'язаних з виробництвом інструментальних сталей.

Необхідно виконати наступні розрахунки та порівняльний аналіз:

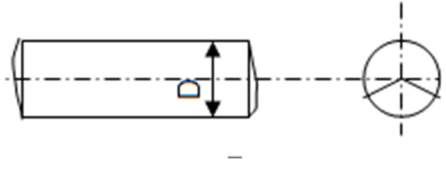
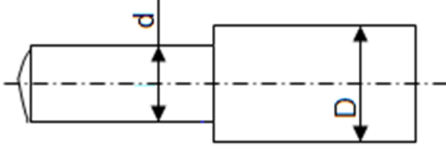
- розрахувати масу злитка для ковки прокатних валків;
- розрахувати технологічну схему ковки прокатних валків;
- розрахувати та вибрати технологічний інструмент;
- зробити порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується;
- розрахувати енергосилові параметри та вибрати основне устаткування;
- змодельовати в САПР DEFORM процес осадки циліндричних заготовок;
- виконати розрахунок по новій технології виробництва поковок валків;
- обробити та обґрунтувати дані отримані в результаті аналізу формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується та в процесі моделювання в САПР DEFORM;
- запропонувати нову технологію ковки валків, яка складається з застосування схрещених бойків на гідравлічному пресі;
- розрахувати технологічну схему ковки прокатних валків з урахуванням нової технології;
- розрахувати та вибрати технологічний інструмент з застосуванням схрещених бойків.

## 2.2 Методи розрахунку параметрів

### 2.2.1 Розрахунок маси поковок

Масу технологічного напуску на поковках розраховують виходячи з номінальних розмірів поковки.

**Таблиця 2.1** – Формули розрахунку маси технологічного напуску на поковках [7]

Найменування напуску	Ескіз поковки	Розрахункова формула
Скіс після рубки на гладких поковках круглого перерізу		$G_{ск} = 0,28 \times D^3 \times 10^{-6}$
Скіс уступу у валка		$G_{гал} = 0,18 \times 10^6 \times (D - d) \times (D + 2d)$

Розрахунок маси поковки робиться за наступними формулами:

$$G_{пок} = \sum_{i=1}^N G_{(i)} + \sum_{i=1}^{N-1} G_{гал(i)} + \sum_{i=1}^2 G_{ск(i)} \quad (2.1)$$

де  $G$  - маса  $i$ -того ступеня;

$G_{гал}$  – маса галтелі;

$G_{ск}$  – маса напуску на скіс після рубки.

Визначимо об'єм циліндричних ділянок :

Валок 2Ц - 400 × 500:

$$V_{1.1} = \frac{\pi D_{1.1}^2}{4} \times l_{1.1} = \frac{3,14 \times 4,35^2}{4} \times 9,25 = 137,84 \text{ дм}^2 \quad (2.2)$$

$$V_{1.2} = \frac{\pi D_{1.2}^2}{4} \times l_{1.2} = \frac{3,14 \times 2,5^2}{4} \times 8,1 = 39,74 \text{ дм}^2$$

Валок 2Ц-330 × 1200:

$$V_{2.1} = \frac{\pi D_{2.1}^2}{4} \times l_{2.1} = \frac{3,14 \times 3,75^2}{4} \times 16,5 = 182,15 \text{ дм}^2$$

$$V_{2.2} = \frac{\pi D_{2.2}^2}{4} \times l_{2.2} = \frac{3,14 \times 1,9^2}{4} \times 5,3 = 15,01 \text{ дм}^2$$

Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$V_{3.1} = \frac{\pi D_{3.1}^2}{4} \times l_{3.1} = \frac{3,14 \times 4,4^2}{4} \times 14,75 = 224,16 \text{ дм}^2$$

$$V_{3.2} = \frac{\pi D_{3.2}^2}{4} \times l_{3.2} = \frac{3,14 \times 2,5^2}{4} \times 8,7 = 42,68 \text{ дм}^2$$

Визначимо об'єм кінцевих ділянок :

Валок 2Ц - 400 × 500:

$$V_{\text{кон.1}} = \frac{3,14 \times 2,5^3}{24} \times \text{tg } 15^\circ = 0,53 \text{ .дм}^2$$

Валок 2Ц-330 × 1200:

$$V_{\text{кон.2}} = \frac{3,14 \times 1,9^3}{24} \times \text{tg } 15^\circ = 0,23 \text{ .дм}^2 \quad (2.3)$$

Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$V_{\text{кон.3}} = \frac{3,14 \times 1,9^3}{24} \times \text{tg } 15^\circ = 0,23 \text{ .дм}^2$$

Об'єм перехідних ділянок дорівнює:

Валок 2Ц - 400 × 500:

$$V_{\text{пер.1}} = (D_3 - D_1)^2 \times (D_3 + 2D_1) \times 0,023 = (4,35 - 2,50)^2 \times (4,35 + 2 \times 2,50) \times 0,023 = 0,73 \text{ .дм}^2$$

Валок 2Ц-330 × 1200:

$$V_{\text{пер.2}} = (D_3 - D_1)^2 \times (D_3 + 2D_1) \times 0,023 = (3,75 - 1,9)^2 \times (3,75 + 2 \times 1,9) \times 0,023 = 0,59 \text{ .дм}^2$$

Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$V_{\text{пер.3}} = (D_3 - D_1)^2 \times (D_3 + 2D_1) \times 0,023 = (4,4 - 2,5)^2 \times (4,4 + 2 \times 2,5) \times 0,023 = 0,73 \text{ .дм}^2$$

Тоді загальний об'єм поковки складе:

Валок 2Ц - 400 × 500:

$$V_{\text{пок 1}} = 137,84 + 2 \times 39,74 + 2 \times 0,53 + 2 \times 0,73 = 219,84 \approx 220 \text{ дм}^3. \quad (2.4)$$



Валок 2Ц-330 × 1200:

$$V_{\text{пок 2}} = 182,15 + 2 \times 15,01 + 2 \times 0,23 + 2 \times 0,59 = 213,81 \approx 214 \text{ дм}^3.$$

Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$V_{\text{пок 3}} = 224,16 + 2 \times 42,68 + 2 \times 0,23 + 2 \times 0,73 = 311,44 \approx 311,5 \text{ дм}^3.$$

Маса поковки дорівнює:

$$\text{Валок 2Ц - 400} \times 500: G_{\text{пок 1}} = 7,83 \times V_{\text{пок 1}} = 7,83 \times 220 = 1722,6 \text{ кг} \quad (2.5)$$

$$\text{Валок 2Ц-330} \times 1200: G_{\text{пок 2}} = 7,83 \times V_{\text{пок 2}} = 7,83 \times 214 = 1675,62 \text{ кг}$$

$$\text{Валок 2Ц- 400} \times 1200: G_{\text{пок 2}} = 7,83 \times V_{\text{пок 2}} = 7,83 \times 311,5 = 2439 \text{ кг}$$

*Попередній вибір зливка.*

Зливок вибирають виходячи з умови отримання якісної поковки при максимальному виході придатного металу з урахуванням наступних чинників:

- маси зливка, що відливається з цієї марки сталі;
- можливості ковки розрахункового зливка на пресі необхідного зусилля;
- забезпечення мінімального необхідного укова;
- можливість отримання заданого діаметру поковки.

Розглянемо детальніше ці чинники:

Максимальна маса зливка ( $G_{\text{max}}$ ), що відливається, визначається з урахуванням умови:  $G_{\text{сл}} \leq G_{\text{max}}$ ,

де  $G_{\text{сл}}$  - маса зливка, необхідна для виготовлення цієї поковки.

**Таблиця 2.2** – Характеристика сталі 9Х2МФ, що використовується для виготовлення поковки [6]

ГОСТ	К <sub>ТВ</sub>	Г <sub>ОТК</sub>	Г <sub>наг</sub>	Т <sub>н</sub> , °С	Т <sub>к</sub> , °С	Т <sub>п</sub> , °С	Г <sub>охл</sub>	К <sub>фл</sub>	Г <sub>мс</sub>	Г <sub>сл</sub> , т	К <sub>уд</sub>
1050-74	1,0	1	1	1250	800	750	2	0	0	21,0	1

Мінімально необхідний уков ( $K_{\min}$ ) впливає на якість поковки, що враховується при розрахунку діаметру початкової заготівлі, при цьому повинна виконуватися наступна умова:  $D_{\text{сл}} \leq D_{\text{ср}}$ ,

де  $D_{\text{ср}}$  – середній діаметр зливка (біллета);

$D_{\text{сл}}$  – діаметр зливка, що розраховується залежно від типу поковки

Формула для розрахунку розмірів початкової заготівлі по мінімальному укова (круглий переріз поковки) [11]:

$$D_{\text{сл}} = D_{\text{тела}} \sqrt{K_{\min}} \quad (2.6)$$

**Таблиця 2.3** – Середні норми витрати металу на 1 т поковок

Тип зливка заготівлі	Коефіцієнт витрат металу, $K_{\text{пр}}$ – середній / максимальний.					Середній
	Маса валка, т.					
	До 1	від 1 до 2,0	від 2,0 до 3,0	від 3,0 до 5	від 5	
Нормальн і зливки	1,51/1,53	1,53/1,55	1,54/1,58	1,56/1,6	1,58/1,61	1,55

1). Валок 2Ц – 400 × 500:  $D_{\text{сл}} = 435 \pm 10 \times 1,55 = 675 \pm 10$  мм; (2.7)

2). Валок 2Ц-330 × 1200:  $D_{\text{сл}} = 375 \pm 10 \times 1,55 = 581 \pm 10$  мм;

3). Валок 2Ц- 400 × 1200:  $D_{\text{сл}} = 440 \pm 10 \times 1,55 = 682 \pm 10$  мм;

Маса тіла зливка враховується при розрахунку маси початкової заготовки, при цьому повинна виконуватися умова  $G_{\text{тела}} \geq G_{\text{общ}}$

де  $G_{\text{тела}}$  – маса тіла зливка ;

$G_{\text{общ}}$  – маса металу, необхідного для отримання поковки (маса поковки і маса технологічних відходів).

Маса металу  $G_{\text{заг}}$ , необхідного для отримання заданої поковки, розраховується по формулі:

$$G_{\text{заг}} = N \times G_{\text{пок}} + G_{\text{у}} + G_{\text{тиж.}} + G_0 + G_{\text{від}} \quad (2.8)$$

де  $N = 1$  – число поковок, що виготовляються з одного зливка;

$G_{\text{пок}}$  – маса поковки, що розраховується з урахуванням плюсових допусків на кування;

$G_y$  – маса металу, що йде на угар при нагріванні

$G_{\text{тиж.}}$  – маса недоливу метала при литві зливка;

$G_0$  - втрата металу в процесі осадки зливка;

$G_{\text{від}}$  – маса інших технологічних відходів при куванні.

Масу чаду металу при нагріві  $G_y$  розраховують по формулі:

$$G_y = \{ 0,02 + 0,15 \times (N_b - 1) \} \times G_{\text{тіла}}. \quad (2.9)$$

де  $N_b$  – кількість виносів при куванні;

$G_{\text{тіла}}$  – маса тіла зливка.

$$G_{\text{тиж.}} = K_{\text{нед}} \times G_{\text{тіла}}$$

де:  $K_{\text{тиж.}} = 0,03$  – коефіцієнт, що враховує можливий недолив металу при литті зливка;

$$G_0 = K_0 \times G_{\text{тіла}}$$

де:  $K_0 = 0,02$  – коефіцієнт, що враховує втрати металу в процесі осадки зливка.

Масу технологічних відходів розраховуються по формулі [8] :

$$G_{\text{від}} = \Delta G_d + \Delta G_n + \sum_{i=1}^{N_b} \Delta G_{b(i)} + \sum_{i=1}^{N_0} \Delta G_{0(i)} \quad (2.10)$$

де  $\Delta G_d$  - додаткова маса металу;

$\Delta G_n$  – додаткова маса металу, з врахуванням прибуткової частини зливка;

$\Delta G_{b(i)}$  – додаткова маса металу, необхідна для врахування присічки між поковками;

$N_b$  – число виїмок між поковками;

$\Delta G_{0(i)}$  – втрата металу в процесі рубання;

$N_0$  – число рубок.

Розрахуємо масу зливка для кожної поковки:

1). Валок 2Ц - 400 × 500:

Масу чаду металу при нагріві  $G_y$ :

$$G_y = \{0,02 + 0,15 \times (N_B - 1)\} \times G_{\text{тіла}} = (0,02 + 0,15) \times 1722,6 = 292,84 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{тиж.}} = K_{\text{тиж.}} \times G_{\text{тіла}} = 0,03 \times 1722,6 = 51,678 \text{ кг.}$$

$$G_0 = K_0 \times G_{\text{тіла}} = 0,02 \times 1722,6 = 34,45 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{від}} = 70 + 0 + 0 = 70 \text{ кг}$$

1). Валок 2Ц- 400 × 500, маса поковки = 1722 т ≈ 1730 кг.

$$G_{\text{зл}} = 1730 + 292,84 + 51,678 + 34,45 + 70 = 2178,5 \approx 2180 \text{ кг.}$$

Зливок, який підходить для кування цієї поковки важить 2,5 т.

2). Валок 2Ц – 330 × 1200,

Масу чаду металу при нагріванні  $G_y$ :

$$G_y = \{0,02 + 0,15 \times (N_B - 1)\} \times G_{\text{тіла}} = (0,02 + 0,15) \times 1680 = 285,6 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{тиж.}} = K_{\text{тиж.}} \times G_{\text{тіла}} = 0,03 \times 1680 = 50,4 \text{ кг.}$$

$$G_0 = K_0 \times G_{\text{тіла}} = 0,02 \times 1680 = 33,6 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{від}} = 70 + 0 + 0 = 70 \text{ кг}$$

$$G_{\text{зл}} = 1680 + 285,6 + 50,4 + 33,6 + 70 = 2119,6 \approx 2120 \text{ кг.}$$

Зливок, який підходить для кування цієї поковки важить 2,5 т.

3). Валок 2Ц – 400 × 1200, маса валка = 2439 кг ≈ 2440 кг,

Масу чаду металу при нагріві  $G_y$ :

$$G_y = \{0,02 + 0,15 \times (N_B - 1)\} \times G_{\text{тіла}} = (0,02 + 0,15) \times 2439 = 414,6 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{тиж.}} = K_{\text{тиж.}} \times G_{\text{тіла}} = 0,03 \times 2439 = 73,17 \text{ кг.}$$

$$G_0 = K_0 \times G_{\text{тіла}} = 0,02 \times 2439 = 48,8 \text{ кг.}$$

$$G_{\text{від}} = 70 \text{ кг}$$

$$G_{\text{зл}} = 2439 + 73,17 + 48,8 + 70 = 2594 \approx 2595 \text{ кг.}$$

Зливок, який підходить для кування цієї поковки важить 3 т.

Вибраний зливок для цієї поковки повинен задовольняти наступним вимогам:

$$\text{КВП} \geq \text{КВП}_{\text{min}};$$

де КВП – коефіцієнт виходу придатного із зливка у відсотках;

$KBP_{\max} = 65\%$  (для даного типу поковок) – максимально допустимий КВП у відсотках;

Коефіцієнт виходу придатного із зливка розраховується по формулі:

$$KBP = \frac{G_{\text{пок}} \times N}{G_{\text{зл}}} 100\% \quad (2.11)$$

де  $G_{\text{пок}}$  – маса поковки;

$N$  – число поковок, що отримуються з одного зливка;

$G_{\text{зл}}$  – маса зливка.

Розрахуємо КВП для кожного зливка [20]:

1). Валок 2Ц – 400 × 500:

$$KBP = \frac{1730}{2500} 100 \% = 69,2 \%$$

Злиток підходить.

2). Валок 2Ц-330 × 1200:

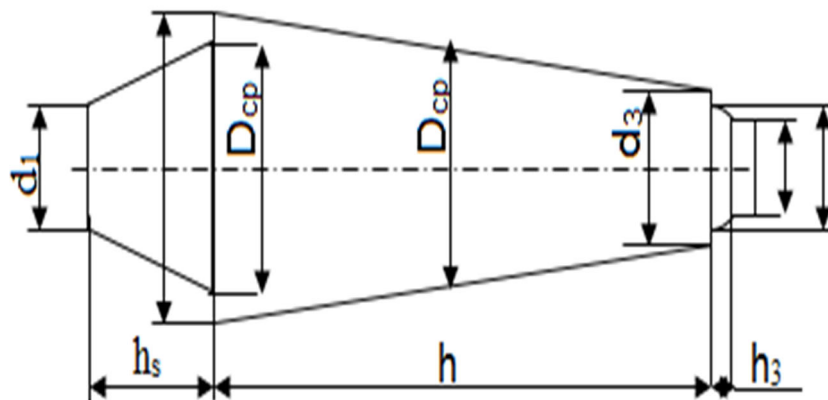
$$KBP = \frac{1678}{2500} 100 \% = 67,2 \%$$

Злиток підходить.

3). Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$D_{\text{сл}} = 440 \pm 10 \times 1,55 = 682 \pm 10 \text{ мм};$$

$$KBP = \frac{2440}{3000} 100 \% = 81 \%$$



**Рисунок 2.1** – Схема зливка вагою від 1,0 до 3,5 т [9]

Таблиця 2.4 – Технологічна маса вибраних зливків

Зливок, т	Маса					
	Тіло		Прибуток		Піддон	
	кг	%	кг	%	Кг	%
2,5	1955	78,2	420,	15,8	125	5,0
3,0	2377	78,2	473	15,8	150	5,0

Таблиця 2.5 – Технологічні розміри вибраних зливків [12]

Зливок, т	Розміри в мм										
	Тала зливка				Прибутки				Піддону		
	h	D <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>cp</sub>	a	h <sub>5</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	h <sub>3</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>
2,5	10 49	569	487	528	10	392	533	333	157	421	265
3	11 00	611	530	570	10	392	576	376	167	461	265

*Технологічні переходи кування.*

Для забезпечення необхідної якості поковок і технологічності її виготовлення в якості основи приймають орієнтацію поковки по відношенню до прибуткової частини зливка. При цьому враховують наступні чинники:

- наявність і місце розташування металу, що йде на проби для випробування;
- місце розташування центру тяжіння поковки по довжині подовжньої осі зливка (рис. 2.2);
- співвідношення поперечних розмірів поковки і її довжини;

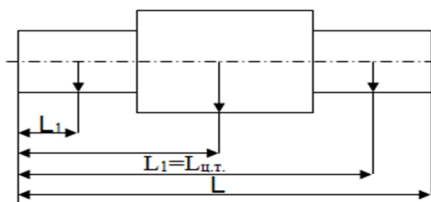


Рисунок 2.2 – Схеми до визначення центру тяжіння поковок

Відстань від торця поковки до її центру тяжіння ( $L_{ц.т.}$ ) визначається по формулі [7]:

$$L_{ц.т.} = \sum_{i=1}^N \frac{G_i \times l_i}{G_{пок}} \quad (2.12)$$

де  $G_i$  – маса  $i$ - того ступеня поковки

$G_{пок}$  – маса поковки;

$l_i$  – відстань від торця першого ступеня до центру тяжіння  $i$ - того ступеня

$$l_i = \frac{L_1}{2} + \sum_{i+1}^N L_{i+1} . \quad (2.13)$$

тут  $L_i$  – довжина даного ступеня.

Оскільки в нашому випадку поковки дзеркально симетричні, то центр тяжіння поковки співпадатиме з центром зливка.

- 1). Валок 2Ц-400 × 500:  $L_{ц.т} = 0,5$ ;  $L_{ц.т} = 0,5 \times 2572 = 1286$  мм;
- 2). Валок 2Ц-330 × 1200:  $L_{ц.т} = 0,5$ ;  $L_{ц.т} = 0,5 \times 2670 = 1335$  мм;
- 3). Валок 2Ц-400 × 1200:  $L_{ц.т} = 0,5$ ;  $L_{ц.т} = 0,5 \times 3085 = 1542,5$  мм.

Поковку розташовують таким чином: ступінь поковки з пробою для випробування розташовується з боку прибутку, поковку орієнтують так, що б центр тяжіння її був розташований ближче до прибутку зливка.

Вибір технологічних переходів полягає у визначенні послідовності операції кування, розміток злитка на частини, визначення числа технологічних переходів.

Для ступінчастого валу число ескізів розмітки дорівнює числу виступів, що присікаються від різних діаметрів. Якщо два або більше за виступ не розділені між собою східцями, присікаючі на попередніх етапах кування мають рівні діаметри або різницю діаметрів не перевищує допустиму величину  $\Delta D$ , то такі виступи виконуються на один діаметр. Для кожного ескізу розмітки знаходять виступ, від якого роблять присікання сходинок (основний ступінь), визначають його діаметр і довжину. Потім визначають

довжини подальших сходинок, розташованих справа і зліва від основного ступеня, діаметр яких менше її діаметру.

Деформація металу під пресом проходить із швидкістю деформації 2-3 м/мін, час охолодження зливка масою до 3-х тон = 1 годину.

Виберемо технологічну схему для кожного з проєктованих валків.

1). Валок 2Ц - 400 × 500:

- нагріваючи до  $T = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- видати заготовку з печі і подати під прес;
- білетирування: обтиск граней на діаметр 485 мм, довжина зливка складає:  $V_{\text{зл}}$  до білетирування =  $V_{\text{зл}}$  після білетирування,  $\Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетирування:

$$V_{\text{зл.1}} = \pi r^2 h = 3.14 \times 264^2 \times 1049 = 229568866 \text{ мм} \quad (2.14)$$

$$L_{\text{зл}} \text{ після білетирування} = 229568866 / 3,14 \times 2422 = 1243,25 \text{ мм};$$

- обрубубання донної частини;
- кування цапфи під осадку на діаметр 300 мм, довгою 600 мм;

Процес білетирування, обрубубання донної частини, кування цапфи під осадку проходять за 16 хвилин.

- Осадку зливка до діаметру 750 мм, на висоту зливка 570 мм.

$$\text{Площа осадженого зливка} = 430084 \text{ мм}^2.$$

Процес осадки проходить в перебігу 2 хвилини, отже додатковий нагрів не потрібно перед осадкою. Залишається час, що б зробити ковку зливка :

- кування на діаметр  $D_n = 1,1 \times D_z$   $D_n = 1,1 \times 435 = 480 \text{ мм}$ .

Кування зливка займає 25 хвилин, отже потрібне додаткове підігрівання зливка.

- підігрівання зливка до кувальної температури = 1230  $^\circ\text{C}$ ;
- протягання зливка на розміри заготівлі : максимальний діаметр 440 мм, довжина зливка = 1510 мм;




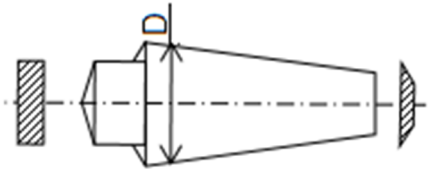
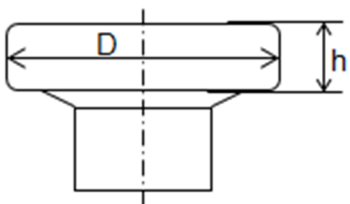
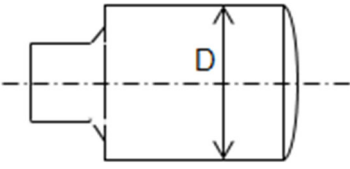
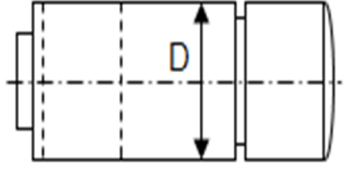
- розмітка зливка на діаметри і східці, розмітка частин;
- обтиснути бочку в міру, кувати східці на діаметр 250 мм;
- обрубкування надлишків.

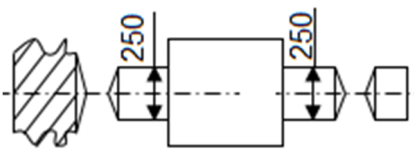
Процес протягання, кування кінців в міру і обрубкування надлишків займає 37 хвилин.

- Маркувати.

Увесь процес кування займає часу:  $T = 80$  хвилин.

**Таблиця 2.6** – Технологічна схема кування валка холодної прокатки 2Ц – 400 × 500 за одне осадження зливка

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
1	Нагрів зливка $T = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$		Нагрівальні печі.
2	Білетування на діаметр 485 мм Обрубка донної частини. Зробити цапфу під осадку.		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний. Сокира.
3	Осадка зливка на діаметр 750 мм, висотою 570 мм.		Верхня сферична плита. Нижня сферична плита.
4	Ковка на діаметр 480 мм Підігрів зливка до $t = 1230^{\circ}\text{C}$ .		Нагрівальна піч. Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский.
5	Протяжка зливка да діаметр 440 мм Розмітка і присіканням ступенів.		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
6	Обтиснути злиток, Ковка ступенів на діаметр 250 мм, Обрубка надлишків		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский. Розкатка. Сокира.
7	Правити Маркувати.		

## 2). Валок 2Ц - 330 × 1200:

- нагріваючи до  $T = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- білетування: обтиск граней на діаметр 485 мм, довжина зливка складає:  $V_{\text{зл}}$  до білетування =  $V_{\text{зл}}$  після білетування,  $\Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетування:

$$V_{\text{зл.1}} = \pi r^2 h = 3.14 \times 264^2 \times 1049 = 229568866 \text{ мм}$$

$$L_{\text{зл}} \text{ після білетування} = 229568866 / 3,14 \times 2422 = 1243,25 \text{ мм};$$

- кування цапфи під осадку на діаметр 300 мм, довжиною 600 мм;
- обрубкування донної частини;
- осадка зливка до діаметру 750 мм, на висоту зливка 570 мм;

$$\text{Площа осадженого зливка} = 430084 \text{ мм}^2.$$

Процес білетування, кування цапфи, обрубкування донної частини займає 18 хвилин, час охолодження зливка - 65 хвилин, отже додатковий нагрів не потрібно перед осадкою. Залишається час, що б зробити ковку зливка:

- кування на діаметр  $D_n = 1,1 \times D_3$   $D_n = 1,1 \times 375 = 412,5 \text{ мм}$ ;

Час кування 25 хвилин, отже для подальших операцій потрібне додаткове підігрівання:


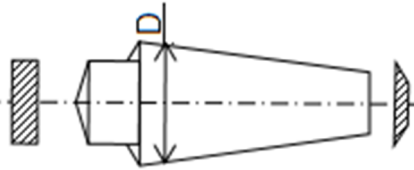
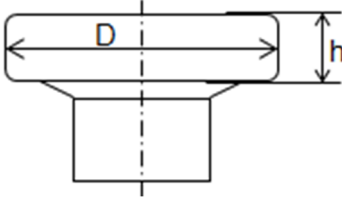
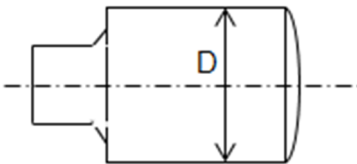
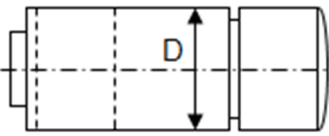
- підігрівання зливка до температури  $1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

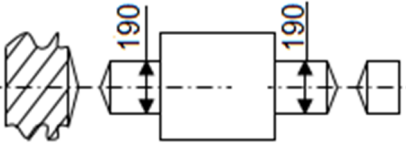
- протягання зливка на розміри заготовки: максимальний діаметр 380 мм, довжина зливка = 2025 мм;
- розмітка зливка на діаметри і східці, розмітка частин;
- обтиснути бочку валу в міру, обтиснути східці на діаметр 190 мм;
- обрубкування надлишків;

Процес протягання, кування кінців в міру і обрубкування надлишків займає 37 хвилин.

- Правити, маркувати.
- Увесь процес кування займає часу:  $T = 80$  хвилин.

**Таблиця 2.7** – Технологічна схема ковки валка 2Ц – 330 × 1200 холодної прокатки за одне осідання зливка [7]

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
1	Нагрів злитка $T = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$		Нагрівальні печі.
2	Білетування на діаметр 485 мм Обрубка донної частини Зробити цапфу під осадку		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний. Сокира.
3	Осадка злитка на діаметр 750 мм і висоту 570 мм.		Верхня сферична плита. Нижня сферична плита.
4	Ковка на діаметр 415 мм Підігрів злитка до $t = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$ .		Нагрівальна піч. Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский.
5	Протяжка злитка да діаметр 375 мм Розмітка і присіканням ступенів.		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
6	Обтиснути злиток, Ковка ступенів на діаметр 190 мм, Обрубка надлишків		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский. Розкатка. Сокира.
7	Правити Маркувати.		

### 3). Валок 2Ц - 400 × 1200:

- нагріваючи до  $T = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- білетування: обтиск граней на діаметр 530 мм, довжина зливка складає:  $V_{\text{зл}}$  до білетування =  $V_{\text{зл}}$  після білетування,  $\Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетування:

$$V_{\text{сл.1}} = \pi r^2 h = 3.14 \times 285^2 \times 1100 = 280551150 \text{ мм}^3$$

$$L_{\text{зл}} \text{ після білетування} = 280551150 / 3,14 \times 265^2 = 1272,3 \text{ мм};$$

- кування цапфи під осадку на діаметр 300 мм, довжиною 600 мм;
- обрубання донної частини;
- осадка зливка до діаметру 800 мм, на висоту зливка 600 мм;

$$\text{Площа осадженого зливка} = 515300 \text{ мм}^2.$$

Процес білетування, кування цапфи, обрубання донної частини займає 18 хвилин, час охолодження зливка - 65 хвилин, отже додатковий нагрів не потрібно перед осадкою. Залишається час, що б зробити кування зливка :

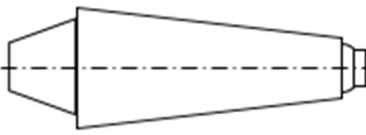
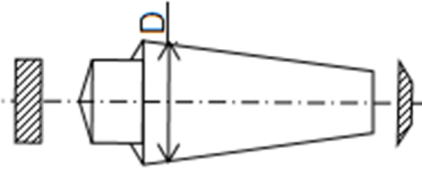
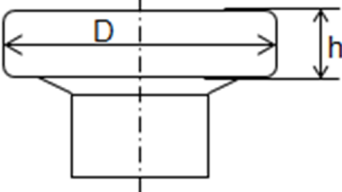
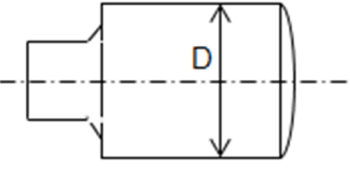
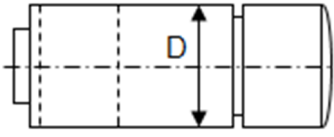
- кування на діаметр  $D_n = 1,1 D_z$   $D_n = 1,1 \times 440 = 484 \text{ мм}$ ;
- час кування 25 хвилин, отже для подальших операцій потрібне додаткове підігрівання;
- підігрівання зливка до кувальної температури =  $1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

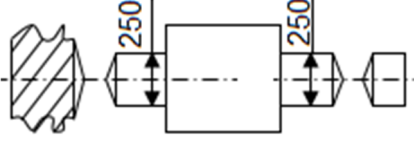
- протягання зливка на розміри заготовки: максимальний діаметр 440 мм, довжина зливка = 1846 мм;
- розмітка зливка на діаметри і східці, розмітка частин;
- кування східців на діаметр 250 мм;
- обрубкування надлишків;

Процес протягання, кування кінців в міру і обрубкування надлишків займає 37 хвилин.

- Правити, маркувати;
- увесь процес кування займає часу:  $T = 80$  хвилин;

**Таблиця 2.8** – Технологічна схема ковки валка 2Ц - 400 × 1200 холодної прокатки за одне осідання зливка

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
1	Нагрів злитка $T = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$		Нагрівальні печі.
2	Білетування на діаметр 530 мм Обрубка донної частини Зробити цапфу під осадку		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний. Сокира.
3	Осадка злитка на діаметр 800 мм і висоту 600 мм.		Верхня сферична плита. Нижня сферична плита.
4	Ковка на діаметр 484 мм Підігрів злитка до $t = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$ .		Нагрівальна піч. Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский.
5	Протяжка злитка да діаметр 440 мм Розмітка і присіканням ступенів.		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний

№	Назва операцій	Ескізи поковки.	Інструмент
6	Обтиснути злиток, Ковка ступенів на діаметр 250 мм, Обрубка надлишків		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний і плоский. Розкатка. Сокира.
7	правити Маркувати.		

## 2.3 Методика експерименту та визначення параметрів процесу

### 2.3.1 Порівняльний аналіз формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується

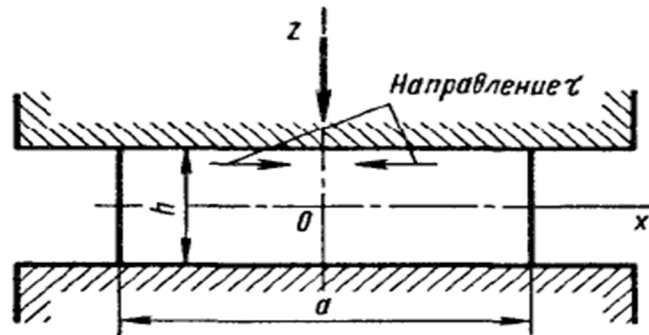
Існують різні методи визначення зусиль осадки заготовки. У даному розділі будуть розглядані основні методи, які активно застосовуються на практиці в розрахунках при виборі оптимального обладнання для здійснення необхідної операції вільної ковки залежно від поставленого завдання у виробництві.

Спочатку розглянемо метод аналізу, який був запропонований В. М. Данченко.

#### 2.3.1.1 Визначення зусиль деформування в процесі осадки злитків

Осадкою називають ковальську операцію, за допомогою якої зменшують висоту вихідної заготовки з одночасним збільшенням площі її поперечного перерізу. За схемою деформації осадка завжди є стисненням - деформація в напрямку активної сили негативна, а дві інші деформації позитивні. В окремих випадках можлива рівність останніх між собою (просто стиснення) або рівність однієї з них нулю (плоска деформація). В ідеальному випадку, при відсутності сил тертя на контакті, схема напруженого стану є лінійним стисненням. У всіх інших випадках – нерівномірне всебічне стиснення.

За допомогою осадки одержують різні диски, плити, штампові кубики і т. п. У цьому випадку осадка є основною і заключною операцією. Але частіше осадку застосовують як проміжну операцію з метою пророблення литої структури металу (рис. 2.3).



**Рисунок 2.3** – Схема деформації в процесі осадки [5]

Зазначимо, що якби тертя на контактній поверхні було відсутнім, то напружений стан був би лінійним. Тертя ж змінює схему напруженого стану па схему нерівномірного всебічного стиснення.

Напрямок елементарних сил тертя на контактній поверхні, а отже, і контактних дотичних напружень показано на рис. 2.3. Відповідно до правила знаків дотичні напруження на половині фігури праворуч від осі негативні, а ліворуч – позитивні. У силу симетрії перерізу щодо координатних осей досить розглядати лише перший квадрант.

Шукаємо розподіл нормальних напружень тільки на контактній поверхні. Згідно із прийнятими допущеннями, на цій поверхні напруження не залежать від координати  $z$ , тому що ця координата тут стала і дорівнює  $0,5h$ . Отже, для контактної поверхні маємо:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{d\sigma_x}{dx} \quad \text{і} \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial x} = \frac{d\sigma_z}{dx}. \quad (2.24)$$

Дотичне напруження на контактній поверхні позначимо через  $\tau_k$  тобто  $\tau_{xz} = \tau_k$  при  $z = 0,5h$ . Напруження  $\tau_{xz}$  по мірі віддалення від кожної з контактних поверхонь буде за абсолютною величиною зменшуватися і на осі  $x$  при  $z = 0$  перетвориться на нуль, оскільки вісь  $x$  є горизонтальною віссю симетрії перерізу штаби.

Допустимо, що напруження  $\tau_{xz}$  є лінійною функцією  $z$ :

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{2\tau_x}{h}. \quad (2.25)$$

Підставляючи наведені дані у перше рівняння системи диференціальних рівнянь рівноваги для плоско-деформованого стану  $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = 0$ , одержимо:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau_k}{h} = 0 \quad (2.26)$$

Рівняння (2.26) є спрощеним рівнянням рівноваги для точок контакту. Диференціюючи умову пластичності ( $\sigma_x - \sigma_z = \beta\sigma_T$ ) по  $x$  для тих же самих точок, одержимо:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_z}{dx}.$$

Підставимо в останній вираз в (2.26):

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{2\tau_k}{h} = 0 \quad (2.27)$$

Для розв'язання цього рівняння необхідно прийняти той чи інший розподіл дотичних напружень на контактній поверхні і підставити його замість  $\tau_k$ .

Спочатку задаємо умову тертя за Г. Амонтоном ( $\tau_{тр} = f\sigma_z$ ):

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = \frac{-2f\sigma_z}{h}.$$

Після розділення змінних і інтегрування одержуємо:

$$\ln \sigma_z = \frac{-2f}{h} x + C,$$

де  $C$  – довільна стала.

Щоб виключити з рівняння логарифми, уведемо нову сталу інтегрування  $\ln C_1 = C$ .

Тоді  $\sigma_z = C_1 e^{\frac{-2fx}{h}}$ .



Сталу інтегрування  $C_1$  знайдемо з граничних умов. На краю контактної поверхні, тобто при  $x=a/2$ , горизонтальне напруження  $\sigma_x = 0$ .

Отже, виходячи з умови пластичності,  $\sigma_z = \beta\sigma_T$ . Звідси одержуємо

$$C_1 = \beta\sigma_T e^{\frac{fa}{h}}.$$

Таким чином, одержуємо часткове розв'язання рівняння рівноваги (формула Є.П. Унксова):

$$\sigma_z = -\beta\sigma_T e^{-\frac{f(a-2x)}{h}}. \quad (2.28)$$

Відповідно, розподіл напружень тертя описується наступною формулою:

$$\tau_{TP} = -f\beta\sigma_T e^{-\frac{f(a-2x)}{h}}. \quad (2.29)$$

У даному випадку еюра контактного тиску і напружень тертя описується експонентною залежністю з урахуванням вертикальної симетрії заготовки (рис. 2.4).

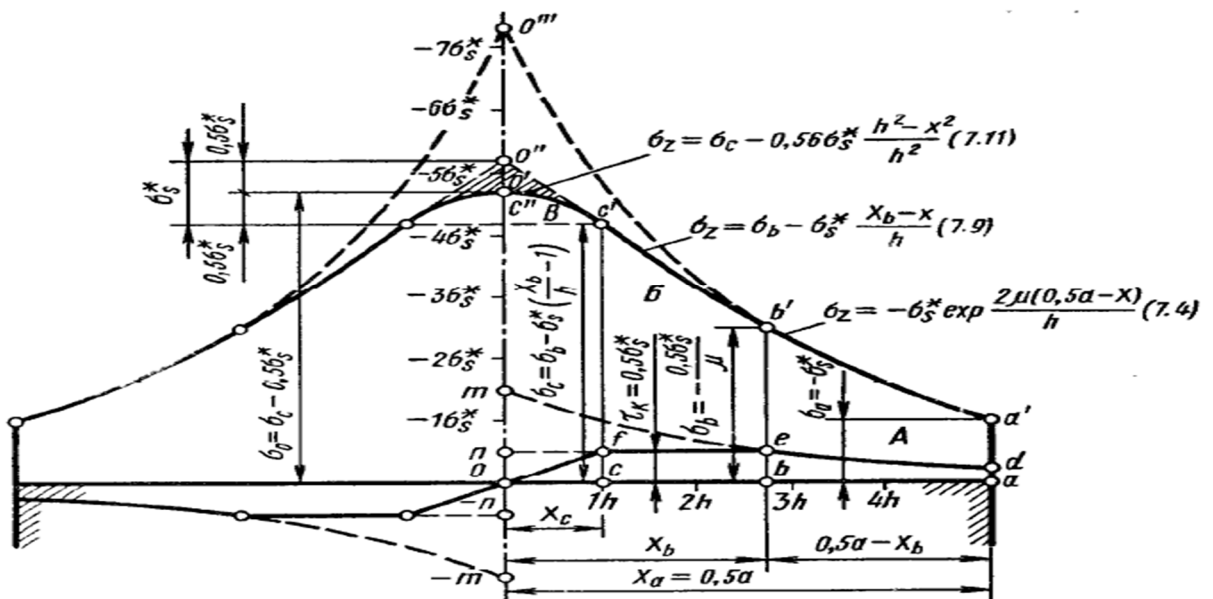


Рисунок 2.4 – Еюра контактних напружень [14]

Щоб визначити силу деформації, потрібно інтегрувати вирази (2.28) по контактній поверхні. Потім, розділивши силу на площу контакту, можна

одержати значення середнього контактного тиску (виведення цього та іншого виразів можна знайти в підручниках з теорії обробки металів тиском):

$$p_{cp} = \beta\sigma_T \frac{2h}{fa} \left( e^{\frac{-fa}{h}} - 1 \right). \quad (2.30)$$

Далі розглянемо граничні умови за Е. Зібелем ( $\tau_{TP} = -f\sigma\beta\sigma_T$ ):

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = \frac{2f\sigma\beta\sigma_T}{h}.$$

Після розділення змінних та інтегрування одержуємо:

$$\sigma_z = \frac{2f\sigma\beta\sigma_T}{h} x + C.$$

Сталу інтегрування  $C$  знайдемо з граничних умов (див. вище).

Звідси одержуємо 
$$C = -\left( \beta\sigma_T + \frac{f\sigma\beta\sigma_T}{h} a \right).$$

Таким чином, одержуємо часткове розв'язання рівняння рівноваги:

$$\sigma_z = -\beta\sigma_T \left( \frac{f\sigma}{h} (a - 2x) + 1 \right). \quad (2.31)$$

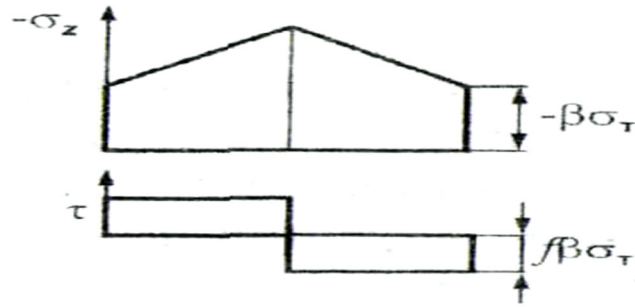
Епюра контактної тиску і напружень тертя для даного випадку описується прямими лініями (рис. 2.5).

Середній контактний тиск визначається в такий спосіб:

$$p_{cp} = \beta\sigma_T \left( 1 + \frac{f\sigma a}{4h} \right). \quad (2.32)$$

І, нарешті, розглянемо лінійний розподіл напружень тертя на контакті. У цьому випадку напруження тертя збільшуються від нуля у центрі заготовки до певної максимальної величини на її краю. Розглянемо як максимальне значення напруження, що відповідає умові Е. Зібеля  $\left( \tau_{TP} = -f\sigma\beta\sigma_T \frac{2x}{a} \right)$ . Тоді:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = \frac{4f\sigma\beta\sigma_T x}{ha}.$$



**Рисунок 2.5** – Епюри контактних напружень відповідно до умови Е. Зібеля [5]

Розділяючи змінні та інтегруючи, одержуємо:

$$\sigma_z = \frac{2f_\sigma \beta \sigma_T}{ha} x^2 + C.$$

Сталу інтегрування  $C$  знайдемо з граничних умов (див. вище).

Одержуємо:

$$C = -\left( \beta \sigma_T + \frac{f_\sigma \beta \sigma_T}{2h} a \right).$$

Таким чином, одержуємо часткове розв'язання рівняння рівноваги:

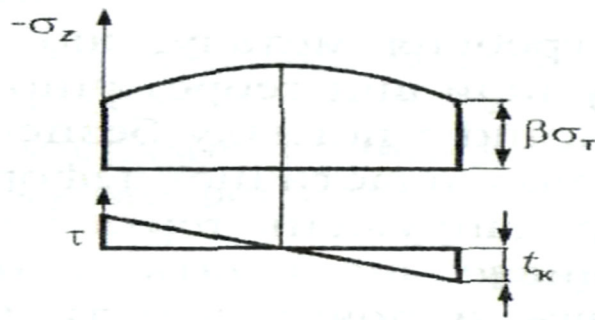
$$\sigma_z = -\beta \sigma_T \left( \frac{f_\sigma}{4ha} (a^2 - 4x^2) + 1 \right). \quad (2.33)$$

Епюра контактного тиску і напружень тертя для даного випадку описується параболою і прямою лінією, відповідно.

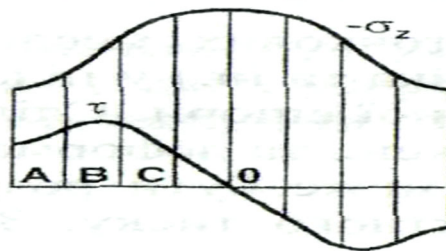
За аналогією визначається середній контактний тиск:

$$p_{cp} = \beta \sigma_T \left( 1 + \frac{f_\sigma a}{6h} \right). \quad (2.34)$$

Проведемо аналіз отриманих рівнянь. Ряд проведених експериментальних досліджень показав, що при коефіцієнті тертя, меншому за 0,2, розподіл напружень тертя при осадці низьких зразків приблизно відповідає умові Г. Амонтона; зона ковзання поширюється практично на всю контактну поверхню (рис. 2.6). Отже, для зазначених умов доцільно використовувати формули С.П. Унксова (2.28) і (2.32).



**Рисунок 2.6** – Епюри контактних напружень для лінійного розподілу напружень тертя на контакті [5]



**Рисунок 2.7** – Тризонні епюри контактного тиску і напружень тертя при осадці [5]

Якщо ж на контакті має місце, головним чином, зона прилипання, що відповідає осадці високих зразків при високому терті, маємо куполоподібну епюру контактного тиску, і для розрахунків варто використовувати формули (2.33) і (2.34). У випадку осадки середніх за висотою зразків при середньому рівні сил контактного тертя (тобто якщо коефіцієнт тертя знаходиться в інтервалі від 0,2 до 0,4), на контакті переважає зона гальмування, і варто використовувати рівняння С.І. Губкіна, тобто формули (2.31) і (2.32).

Найчастіше в реальних процесах ОМТ на контакті присутні одночасно дві, або навіть три характерні зони. На рис. 2.7 показані тризонні епюри контактного тиску і напружень тертя.

Зона *A* є зоною ковзання, дія сил тертя з наближенням до вільної границі слабшає, і часткам металу на контакті енергетично легше скочити до вільної границі. Зону *B* звичайно називають зоною гальмування, оскільки тут напруження тертя досягають своїх максимальних (для даних умов деформації)

значень, і ковзання по контактi утруднено. I, нарештi, зона C – зона прилипання; тут ковзання на контактi практично вiдсутнє.

Одержати точне аналітичне розв'язання для двох- чи тризонного контакту важко, тому що необхідно заздалегiдь знати довжину характерних зон. Тому була отримана низка наближених рiвнянь, заснованих на допущеннi про вiдому довжину зон прилипання, гальмування i ковзання. Данi розв'язання не одержали широкого практичного застосування, унаслідок своєї складностi.

На завершення розгляду цього питання обговоримо вiрогiдностi отриманих епюр. Експериментальнi дослiдження (прямий вимiр за допомогою точкових месдоз, форма гребеня металу, що впливає з щiлини бойка та iн.) у цiлому пiдтвердили вид теоретично розрахованої тризонної епюри. Слiд зазначити, що з погляду безперервностi полiв напружень та деформацiй в осередку пластичної деформацiї, на контактi не може бути розривiв епюр напружень тертя i перегинiв епюр контактного тиску. Звiдси впливає, що навіть за наявностю розвинутого ковзання, на контактi завжди повинна бути присутня, нехай i дуже невелика, зона прилипання [3 – 5].

Формули для розрахунку середнього контактного тиску при осадцi цилiндра (2.35) i штаби кiнцевої довжини (2.36), отриманi при допущеннях iнженерного методу, наводимо без виведення:

$$p_{cp} = \sigma_T \left( 1 + \frac{f_\sigma d}{3h} \right) \quad (2.35)$$

$$p_{cp} = \beta \sigma_T \left( 1 + \frac{f_\sigma a}{3h} \right) \quad (2.36)$$

Далi в наступному роздiлi розглянемо рiзнi варіанти значень питомих зусиль в рiзних випадках.

### 2.3.2 Значення питомих зусиль для рiзних варіантiв ковки

Знаючи розподiл напруги  $\sigma_T$  на контактній поверхнi в межах кожної дiлянки i межi цих дiлянок, можна визначити деформуючi зусилля, iнтегруючи рiвняння, виражаючи  $\sigma_T$  по площах вiдповiдних дiлянок контактної поверхнi,

на яких вони дійсні, і беручи суму цих інтегралів. Оскільки епюри симетричні відносно осі  $z$ , цю суму потрібно подвоїти.

1-й варіант. При  $a/h \geq 2(1+\psi)$  і  $0 < \mu < 0,5$ ;

$$p = 2l \left[ \int_{x_b}^{0.5a} \sigma_s \exp \frac{2\mu(0.5a-x)}{h} dx + \int_h^{x_b} - \left( \sigma_b - \sigma_s \frac{x_b-x}{h} \right) dx + \int_0^h - \left( \sigma_c - 0.5\sigma_s \frac{h^2-x^2}{h^2} \right) dx \right] \quad (2.37)$$

Рисунок 2.6 показує, що другий інтеграл можна узяти в межах не від  $h$  до  $x_b$  а від нуля до  $x_b$  віднявши при цьому площу  $O''c'O'$ , яка відбиває вплив менш інтенсивного зростання нормальної напруги на ділянці  $B$  (рис. 2.6) падіння дотичної напруги. Третій інтеграл у вираженні (2.37) при цьому відпадає.

Площа  $O''c'O'$ , у свою чергу, є різницею між площею трикутника  $0''c'c''$  і площею параболічного сегменту  $0''c'c''$ : площа  $O''c'O' = 0''c'c'' - 0'c'c''$ ; площа  $O''c'O' = 0,5 \sigma_{sh} - 23_{0,5} \sigma_{sh}$ .

Після інтеграції і підстановки значень  $\sigma_T$  і  $x_b$  приведених раніше, отримаємо значення деформуючого зусилля  $P$ . Розділивши останнє на контактну площу  $a/h$ , знайдемо питомий тиск:

$$P = k_\sigma \frac{h}{\mu a} \left\{ \left( \frac{1}{2\mu} - 1 \right) + \left( \frac{a}{2h} - \psi \right) \left[ 1 + \mu \left( \frac{a}{2h} - \psi \right) \right] - \frac{\mu}{3} \right\} \quad (2.38)$$

Останній член у фігурних дужках  $\mu/3$  відображає вплив падіння дотичної напруги на центральній ділянці. Таким чином, зниження питомого тиску виражається величиною:

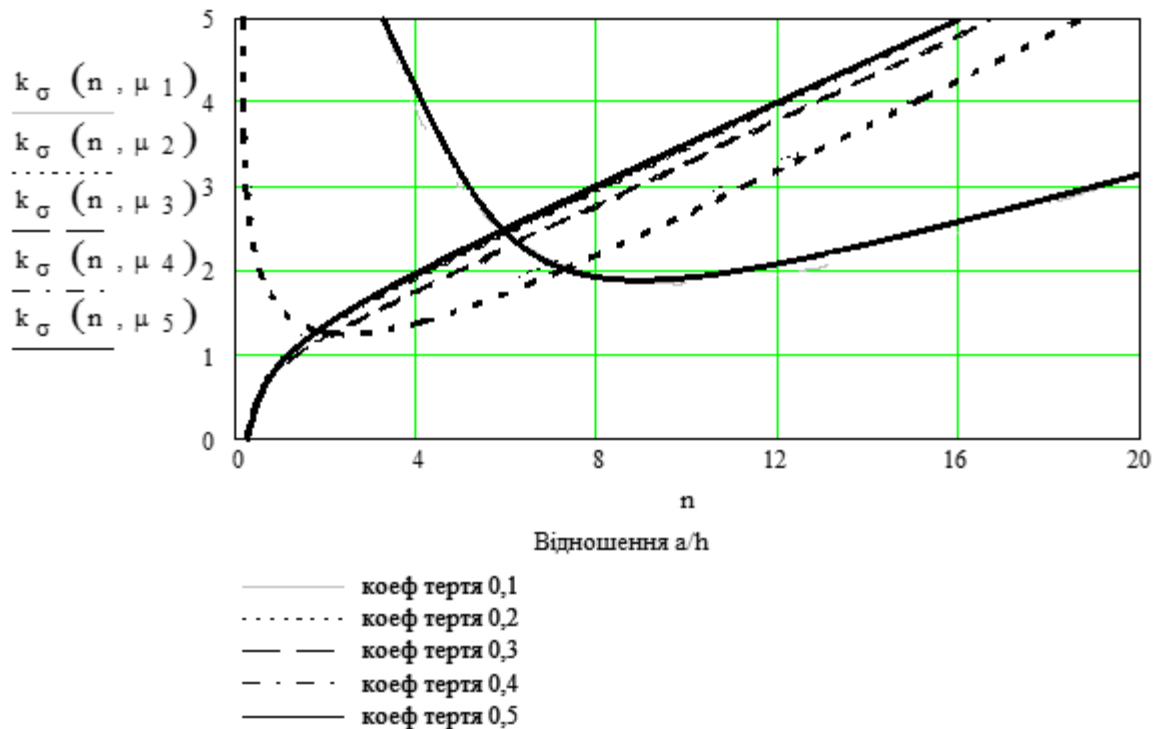
$$\sigma_T \frac{h}{\mu a} \frac{\mu}{3} = \sigma_T \frac{1}{3} \frac{h}{a} \quad (2.39)$$

Чим більше відношення  $a/h$ , і т.ч. чим відносно ширше і нижче осаджувана штаба, тим менший вплив на величину питомого тиску робить наявність куполоподібної ділянки на епюрі напруги.

Нехай  $k\sigma_{13} ha \leq 0,1\sigma_s$ , тоді  $ha \geq 313$ . Таким чином вже при відношенні

$\frac{h}{a} \geq 3 \frac{1}{3} ha \geq 313$  зневажа ділянкою падіння дотичної напруги викличе абсолютну помилку при визначенні питомого зусилля, 10%, що не перевищує, від  $\sigma_T$ . Оскільки при даному варіанті завжди  $p > \sigma_T$ , то відносна помилка буде ще меншою.

Враховуючи, що  $k_\sigma = \frac{1}{3} \frac{h}{a}$ , побудуємо графік залежності  $k_\sigma$  від  $a/h$ , враховуючи при цьому різні значення коефіцієнту тертя  $\mu$  (рис. 2.8).



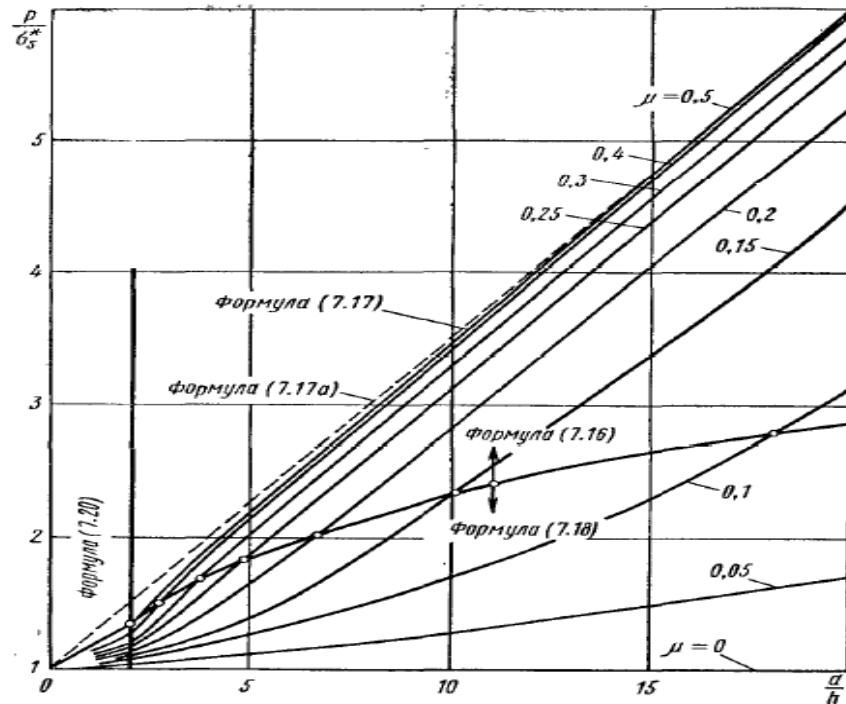
**Рисунок 2.8** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану металу від відношення  $a/h$  (1- й варіант)

де  $a/h$  – це коефіцієнт контакту, який показує співвідношення між контактною і вільною від контакту поверхнями металу.

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.38) зображеного на рис. 2.8, можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  лінійно зростає і коефіцієнту напруженого стану металу.

Для порівняння аналітичних даних можна звернути увагу на рис. 2.9, на якому зображено так саме відношення коефіцієнту напруженого стану металу к відношенню  $a/h$  за різними варіантами, які ми ще розглянемо далі в цьому

підрозділі отримані по результатам дослідження Сторожева М.В. та Попова Є.А.



**Рисунок 2.9** – Значення відношення коефіцієнту напруженого стану метала к відношенню  $a/h$  за різними варіантами [14]

2-й варіант:  $h/a \geq 2$  і  $\mu \geq 0,5$ ;

Так само, як і при розгляді попереднього варіанту, врахуємо зниження інтенсивності зростання нормальної напруги на центральній ділянці площею  $O''c'O'$ . Тоді:

$$p = 2l \left[ \int_0^{0.5a} \sigma_T \left( \frac{0.5a-x}{h} \right) dx - \frac{1}{6} k_\sigma h \right] \quad (2.40)$$

звідки після інтеграції і ділення на площу отримано:

$$p = \sigma_T \left( 1 + \frac{1a}{4h} - \frac{1h}{3a} \right) h - 1/3 h a \quad (2.41)$$

Е. П. Унксов показав, що цю формулу можна отримати безпосередньо з формули (2.40) для тридільничної епюри підстановкою  $\mu = 0,5$  і  $\psi = 0$ .

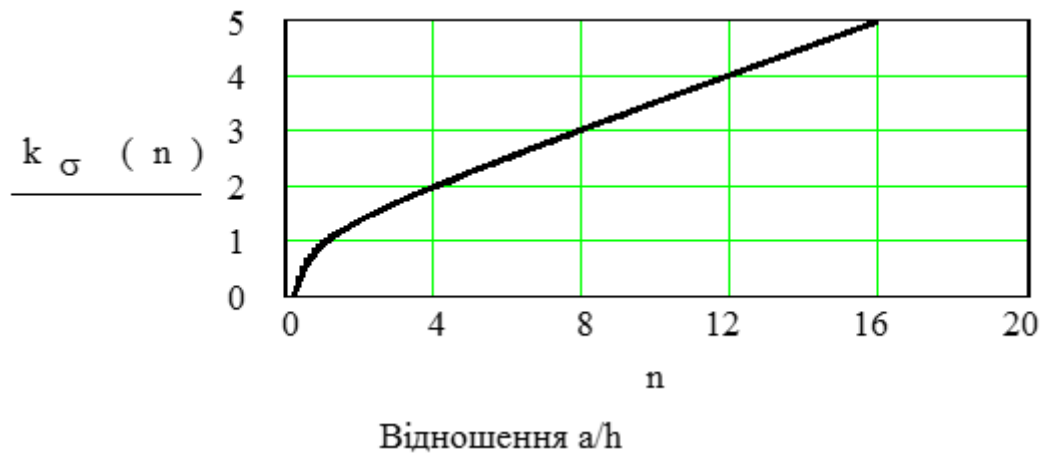
Якщо нехтувати у формулі (7.17) останнім членом в скобках, що враховує вплив падіння дотичної напруги на центральній ділянці, то отримаємо [18]:

$$p = \sigma_T \left( 1 + \frac{1a}{4h} \right) \quad (2.42)$$



Розрахунок  $p$  за формулою (2.42) навіть при  $a/h=2$  дає результат всього на 12,5% більший, ніж по формулі (2.41), і складає за абсолютною величиною  $1/6k\sigma$  що практично не має значення.

Як і в першому варіанті побудуємо графік залежності  $k\sigma$  від  $a/h$ , враховуючи при цьому різні значення коефіцієнту тертя (рис. 2.10).



**Рисунок 2.10** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану металу  $k$  відношенню  $a/h$  (2 - й варіант)

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.41) зображеного на рисунку 2.12, як і в першому варіанті можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  лінійно зростає і коефіцієнту напруженого стану металу.

3-й варіант: При  $2 \geq ah \geq 2$  і  $0 < \mu < 0,5$ ;

$$p = 2l \left\{ \int_{x_b}^{0.5a} \sigma_s \exp \frac{2\mu(0.5a-x)}{h} dx + \int_0^h -\sigma_c \left( 1 + \mu \frac{h^2-x^2}{h^2} \right) dx \right\} \quad (2.43)$$

Звідки отримано:

$$p = \sigma_T \frac{h}{\mu a} \left[ \left( 1 + 2\mu + \frac{4}{3}\mu^2 \right) \exp \left( \frac{\mu a}{h} - 2\mu \right) - 1 \right] \quad (2.44)$$

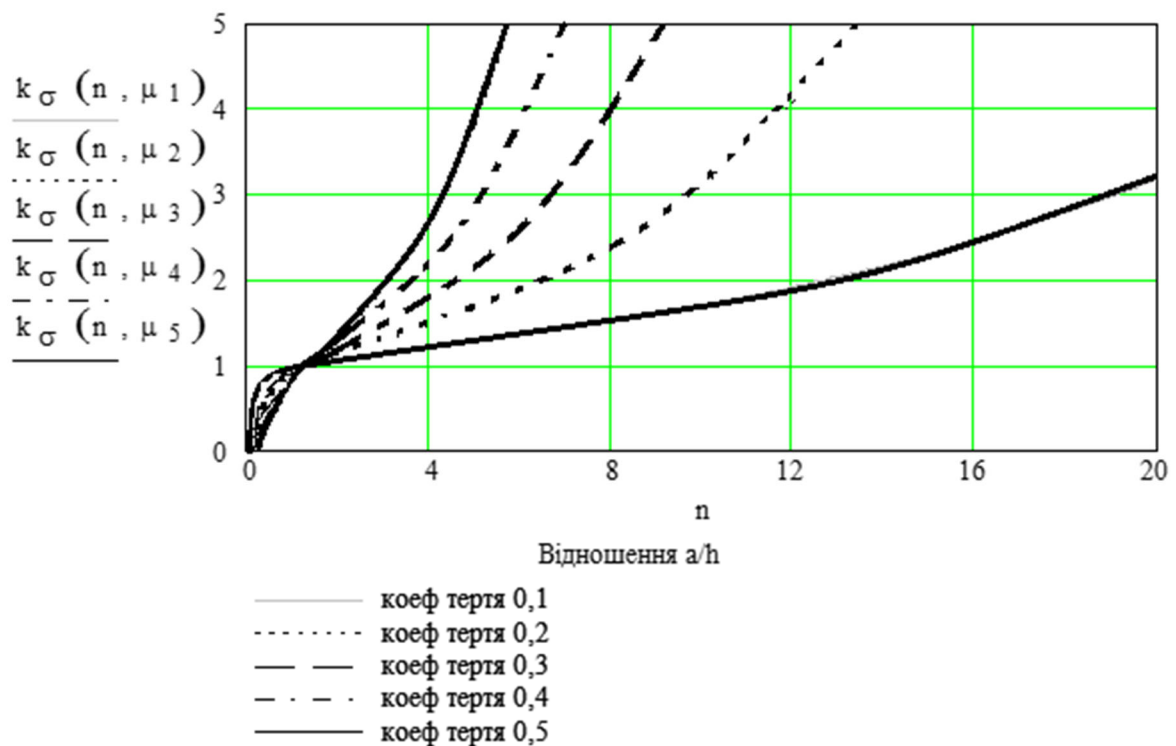
Криві, побудовані по формул і (2.38) для різних значень  $p$ , є продовженням кривих, побудованих за формулою (рис. 2.9). Якщо нехтувати менш інтенсивним зростанням нормальних напружень  $\sigma_z$  на центральній

ділянці, т. е. другий інтеграл у виразі (г) відкинути, а перший узяти в межах 0-0,5a, то формула спроститься:

$$p = \sigma_T \frac{h}{\mu a} \left( \exp \frac{\mu a}{h} - 1 \right) \quad (2.45)$$

Розбіжність результатів, вчислених по формулах (2,44) і (2.45), тим менше, чим більше відношення  $a/h$  і чим менше коефіцієнта тертя  $\mu$ . Проте навіть при  $\mu = 0,25$  максимальна помилка формули (2.45) не перевищує 11%.

Побудуємо графік залежності  $k\sigma$  до  $a/h$ , враховуючи при цьому різні значення коефіцієнту тертя (рис. 2.11).



**Рисунок 2.11** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану металу  $k$  відношенню  $a/h$  (3 - й варіант)

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.44) зображеного на рис. 2.11, як і в першому варіанті можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  інтенсивно зростає і коефіцієнту напруженого стану металу.

4-й варіант:  $2 \geq a/h \geq 1$ ;  $\mu > 0$ ;

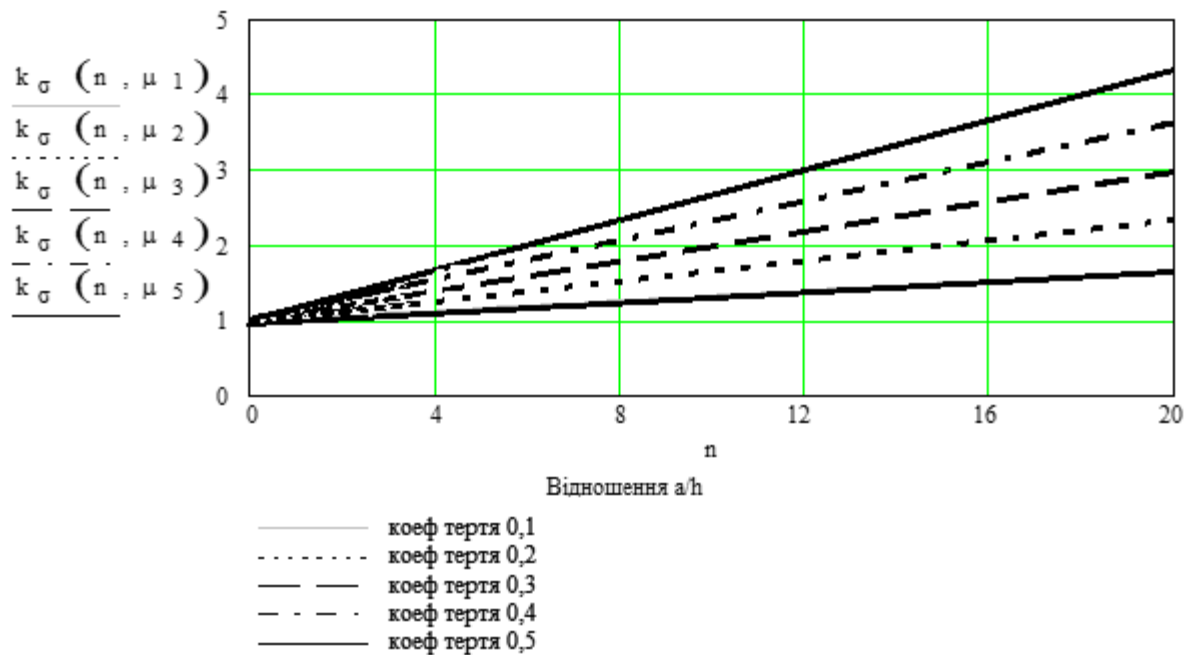
$$p = 2l \int_0^{0.5a} \sigma_T \left[ 1 + \frac{2\mu}{ah} \left( \frac{a^2}{4} - x^2 \right) \right] dx \quad (2.46)$$

Про інтегрувавши формулу (2.46) отримаємо формулу Е. Зібеля:

$$p = \sigma_T \left( 1 + \frac{\mu}{3} \frac{a}{h} \right) \quad (2.47)$$

У випадку якщо  $\mu > 0,5$  підставляється  $\mu = 0,5$ .

Підставивши різні значення коефіцієнта тертя  $\mu$  побудуємо графік залежності  $k\sigma$  до  $a/h$ , враховуючи при цьому різні значення коефіцієнту тертя.



**Рисунок 2.12** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану металу к відношенню  $a/h$  (4 - й варіант)

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.47) зображеного на рисунку 2.12, можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  лінійно зростає і коефіцієнту напруженого стану металу.

5 варіант: при  $a/h < 1$ , а також при  $\mu = 0$  при будь-яких значеннях  $a/h$ :

$$p = \sigma_T \quad (2.48)$$

Формули (2.38) і (2.44) вимагають для визначення  $p$  у кожному окремому випадку порівняльні багато арифметичних підрахунків. Тому значно зручніше користуватися графіками, які зображені на рис. 2.9.

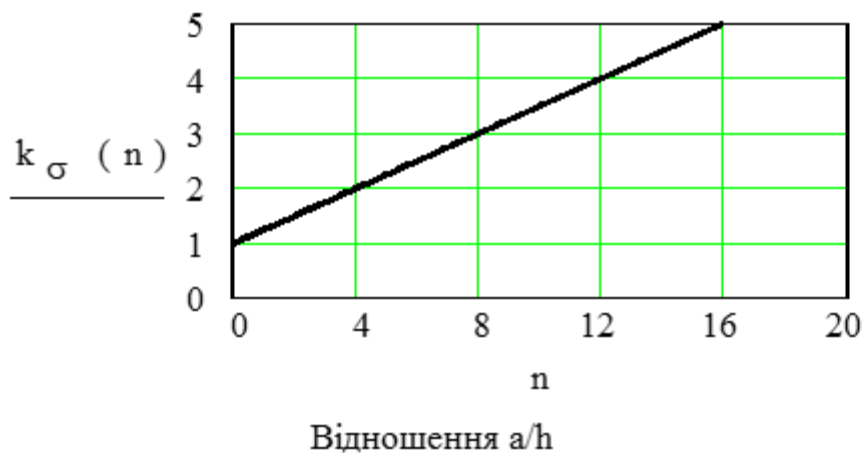
Проте при розгляді графіків (рис. 2.9) легко помітити, що вплив збільшення коефіцієнта тертя  $p$  на питоме зусилля позначається різко лише в

області зміни цього коефіцієнта в межах малих значень. При великих значеннях  $p$  (приблизно від  $\mu > 0,25$ ) криві питомих зусиль для різних  $p$  прагнуть до прямолінійної форми і лежать дуже близько до кривій для  $p = 0,5$  [19]. А оскільки при гарячому осіданні величина коефіцієнта тертя, як правило, значна (0,3-0,5), то для визначення питомого зусилля при гарячому осіданні без мастила в якості розрахункової формули можна користуватися формулою (2.41), виведеною для  $\mu = 0,5$ :

$$p = \sigma_T \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{a}{h} \right) \quad (2.49)$$

Ця формула дає при  $p \neq 0,5$  тим більшу точність, чим більше відношення  $a/h$  і чим більше  $\mu$ . Проте навіть при  $\mu = 0,25$  абсолютна помилка не перевищує  $0,3\sigma_s$  у бік перебільшення значення питомого зусилля.

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.49) зображеного на рис. 2.13, можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  лінійно зростає і коефіцієнту напруженого стану метала.



**Рисунок 2.13** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану метала  $k$  відношенню  $a/h$  (5 - й варіант)

### 2.3.3 Розрахунок енергосилових параметрів ковки та вибір основного устаткування

Вимоги, що пред'являються до кувально-штампувальних машин, та початкові дані для їх проектування.

Основними вимогами є:

- Висока міцність.
- Висока продуктивність і економічність.
- Безпека при експлуатації.
- Надійність і довговічність.

Попередній вибір пресу потрібний для визначення мінімальних технологічних параметрів поковки. Прес вибирають по наступній таблиці залежно від максимальних параметрів поковки.

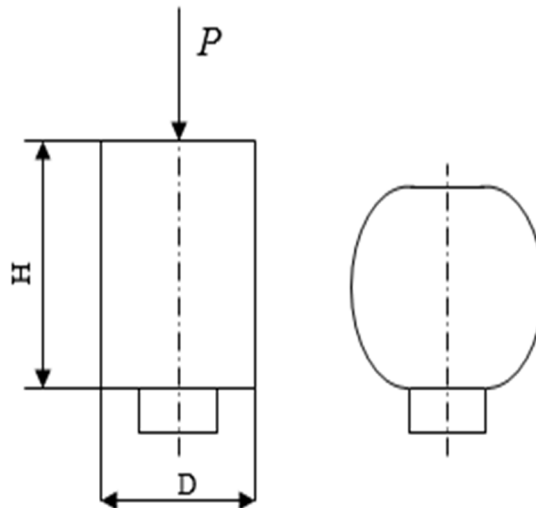
**Таблиця 2.9** – Вибір зусилля пресу залежно від параметрів поковки [12]

Зусилля пресу, МН	Максимальний діаметр поковки, мм		Максимальна маса поковки, кг		Максимальна довжина поковки, мм	
	гладка	ступінчаста	гладка	ступінчаста	гладка	ступінчаста
5	400	350	1450	1360	4000	
8	650	400	3150	2900	8000	
<b>12,5</b>	<b>720</b>	<b>500</b>	<b>5000</b>	<b>4000</b>	<b>9000</b>	
15	800	550	6600	6200	10000	
20	1300	900	17500	14300	12000	

### 2.3.3.1 Розрахунок зусилля пресу

З розрахунків технологічних переходів видно, що найбільша деформація зливка відбувається в процесі осадки, отже зусилля яке потрібне для проведення усіх операцій, під час осадки є максимальне. Якщо прес зможе виконувати операцію осадки, то він зможе виконати і усі інші операції, оскільки зусилля в процесі осадки максимальне.

Розрахуємо зусилля пресу в процесі осадки для вибраних типів технічних переходів і оброблюваних зливоків.



**Рисунок 2.16** – Схема деформації зливка в процесі осадки

Повне зусилля при осіданні  $P$  можна виразити у виді:

$$P = p \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2.50)$$

де  $p$  – середній питомий тиск.

Відомо, що тиск по контактній поверхні розподілений не рівномірно, але в технологічних розрахунках можна обмежитися розрахунком середнього по поверхні питомого тиску. Воно залежить в першу чергу від межі плинності металу, що деформується, при цій температурі, швидкості і мірі деформації і може бути представлено в наступному виді:

$$p = \sigma_T n_\sigma = \sigma_T \left( 1 + 0,17 \frac{D}{H} \right), \quad (2.51)$$

де  $n_\sigma$  – коефіцієнт напруженого стану, який враховує об'ємний характер напруженого стану у зв'язку з дією контактних сил тертя.

Для розрахунку межі плинності при осадці може бути використана методика, пропонована [12]:

$$\sigma_T = k \sigma_T, \quad (2.52)$$

де  $k = 0,8$  для зливків масою до 6 т, – поправковий коефіцієнт;

$\sigma_T$  – межа плинності, визначається за графіками і іншим джерелам залежно від середньої температури [12]

$$t_{\text{cp}} = t_{\text{пов}} + a(t_{\text{ц}} - t_{\text{пов}}) \quad (2.53)$$

де  $t_{\text{пов}}$  і  $t_{\text{ц}}$  – температура поверхні і центру зливка визначаються по графіку залежно від маси зливка і часу охолодження зливка від моменту видачі його з печі до кінця осадки ( $a$  – поправковий коефіцієнт).

**Таблиця 2.10** – Типові ділянки режимів нагріву [12]

$\tau_1 / \tau_2$	0,25	0,35	0,5	0,7
A	0,9	0,8	0,7	0,6

Розрахуємо питомий тиск для даних поковок:

1). Валок Ц - 400×500, Валок Ц - 330×1200:

Оскільки первинне кування у перших двох валків ідентичне, отже розглянемо зусилля ковки для двох поковок:

маса = 2,5 т, розміри після осадки:  $D = 750$  мм,  $H = 570$  мм.

Час осадки = 2 хвилини.

По графіку, на рис. 22 [ 12 ] знаходимо  $t_{\text{пов}} = 1050$ ,  $t_{\text{ц}} = 1230^\circ\text{C}$ ,  $\tau_2 = 65$  хв. по таблиці. 9, при  $G = 2.5$  т, маємо  $k = 0,8$ .

$$\tau_1 / \tau_2 = 15 / 65 \approx 0,25 \Rightarrow a = 0,9.$$

Умовна середня температура зливка :

$$T_{\text{cp}} = 1050 + 0,9 = 1212 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По графіку на рис. 22 знаходимо для сталі 9Х2МФ при  $\varepsilon = 40\%$  і низькій швидкості деформації  $\sigma_T = 37$  МН/м<sup>2</sup>.

В процесі осадки зливка масою 2,5 т межа плинності буде дорівнювати:

$$\sigma_T = k \sigma_T = 0,7 \times 37 = 25,9 \text{ МН/м}^2$$

Питомий тиск:

$$p = \sigma_T n_\sigma = \sigma_T \left( 1 + 0,17 \frac{D}{H} \right) = 25,9 \times (1 + 0,17 \times 485 / 1245) =$$

27,61 МН/м<sup>2</sup>

Повне зусилля:

$$P = pF = 27,6 \frac{\pi}{4} 0,75^2 = 12,18 \text{ МН.}$$

2). Валок Ц - 400×1200:

маса = 3 т, розміри після осадки: D = 800 мм, H = 600 мм.

Час осадки = 2 хвилини.

По графіку на рис. 46 [12] знаходимо  $t_{\text{пов}} = 1050$ ,  $t_{\text{ц}} = 1230^\circ\text{C}$ ,  $\tau_2 = 65$  хв. по табл. 9 [16], при G = 3 т, маємо k = 0,8.

$$\tau_1 / \tau_2 = 15 / 65 \approx 0,25 \Rightarrow a = 0,9.$$

Умовна середня температура зливка :

$$T_{\text{ср}} = 1050 + 0,9 = 1212 \text{ }^\circ\text{C.}$$

По графіку на рис. 40 [12] знаходимо для сталі 45 при  $\varepsilon = 40\%$  і низькій швидкості деформації  $\sigma_T = 37 \text{ МН/м}^2$ .

В процесі осадки зливка масою 2,5 т межа плинності буде дорівнювати:

$$\sigma_T = k \sigma_T = 0,7 \times 37 = 25,9 \text{ МН/м}^2$$

Питомий тиск:

$$p = \sigma_T n_\sigma = \sigma_T \left( 1 + 0,17 \frac{D}{H} \right) = 25,9 \times (1 + 0,17 \times 530 / 1270) = 27,6 \text{ МН/м}^2$$

Повне зусилля:

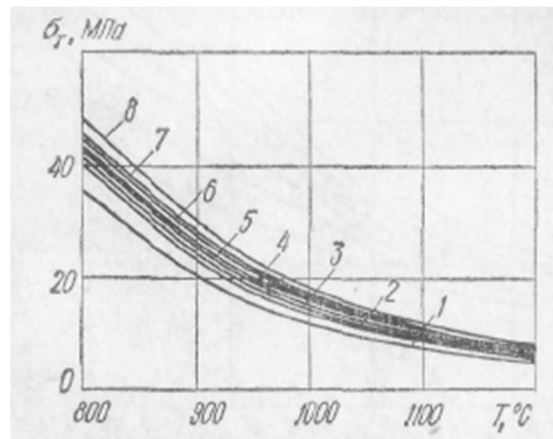
$$P = pF = 27,6 \frac{\pi}{4} 0,75^2 = 12,18 \text{ МН.}$$

Розглянемо ще декілька прикладів визначення технологічних зусиль при осадці. Для одночасної перевірки якості пропонованої методики розглядатимемо приклади осадки, в яких використовуються експериментальні дані [12].

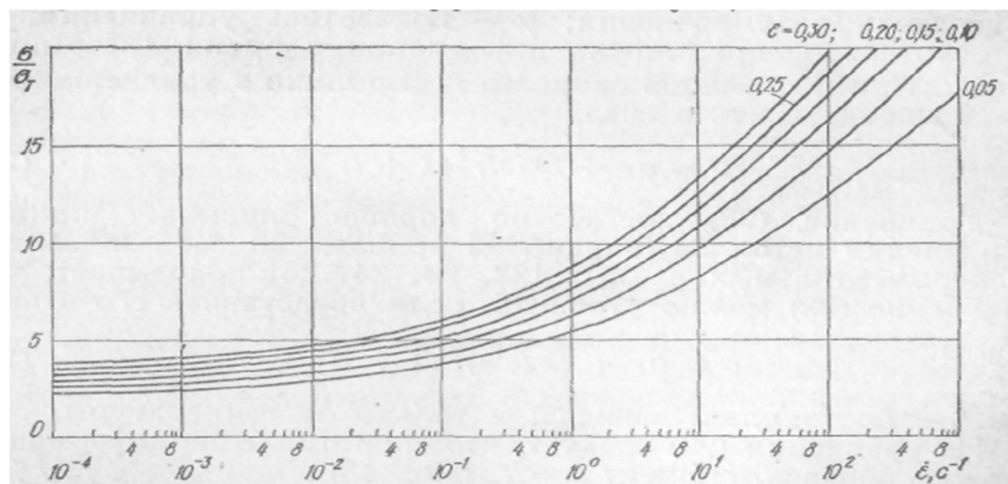
Приклад 1. Визначити повне зусилля осадки зливка з валкової сталі 9Х2МФ масою 47 т. Початкові розміри збілітованого зливка  $D_0 = 1390$  мм,  $H_0 = 3000$  мм. Розміри поковки після осадки  $D = 1520$  мм,  $h = 2190$  мм. Сумарний



час з моменту видачі зливка з печі до кінця осадки  $\tau_1 = 15,2$  хв. Середня швидкість деформації зливка  $\dot{\epsilon} = 0,03 \text{ с}^{-1}$ . Злиток нагрітий в печі до температури  $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Середня температура зливка визначається за методикою, викладеною в гл. 3 [12],  $T_{\text{ср}} = 1196 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 2.17** – Залежність плинності металу від температури [12]



а –  $900^\circ\text{C}$ ; б –  $1000^\circ\text{C}$ ; в –  $1100-1200^\circ\text{C}$

**Рисунок 2.18** – Криві відносного зміцнення сталей [12]

З рис. 2.17 для сталі 9ХФ при  $T_{\text{ср}} = 1196 \text{ }^\circ\text{C}$  знаходимо  $\sigma_T = 6,7 \text{ МН}$ . При  $T_{\text{ср}} = 1196 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\epsilon} = 0,03 \text{ с}^{-1}$ ;  $\dot{\epsilon} = 0,27$  за рис. 2.18, і відносне зміцнення  $\sigma/\sigma_T = 4,8$ . При осадці зливка масою 47 т, опір деформації буде дорівнювати:

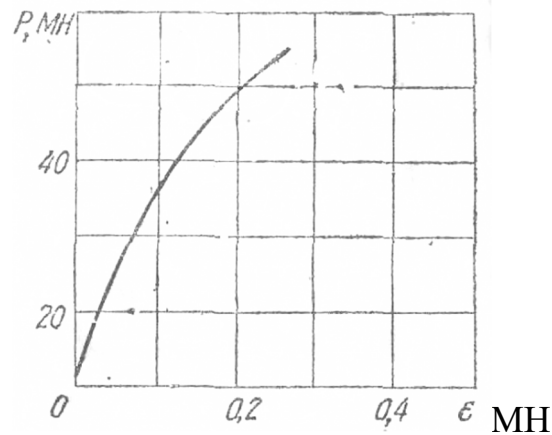
$$\sigma = 4,8 \cdot 6,7 = 32,16 \text{ МН.}$$

З рисунку 2.19 знаходимо питоме зусилля для  $\mu = 0,5$

$$p = 32,16 \cdot 1,06 = 34,09 \text{ МН.}$$

Тоді повне зусилля

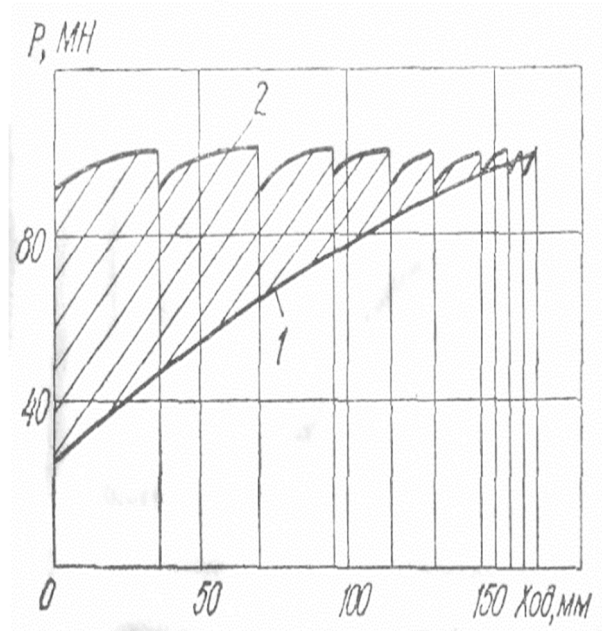
$$p = p \cdot F = 34,09 \frac{\pi}{4} = 61,8 \text{ МН}$$



**Рисунок 2.19** – Зміна зусилля осадки зливка із сталі 9ХФ масою 47 т на пресі зусиллям 150 МН

Характер зміни зусилля осадки на гідравлічному пресі із зусиллям 150 МН для даного випадку показаний на рис. 2.19. При цьому максимальне зусилля складає 54,5 МН. Отже, при розрахунку за цією методикою зусилля виходило завищеним на 13 %. Таку точність розрахунку слід вважати задовільною.

**Приклад 2.** Визначаємо повне зусилля протягання зливка з валкової сталі 9Х2МФ масою 47 т. Початковий діаметр з білетированого зливка  $D = 1390$  мм, радіальне обтискання за один хід пресу  $\Delta R = 250$  мм. Протягання велося при температурі  $T = 1200$  °С в комбінованих бойках на пресі зусиллям 150 МН. Абсолютне подання  $l = 1000$  мм. Зміна зусилля протягання за три робочі ходи показана на рис. 2.20. Середня швидкість радіальної деформації за хід  $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\varepsilon}{t_{\text{н}}} = \frac{0,18}{1,2} = 0,15 \text{ с}^{-1}$ ; міра радіальної деформації за робочий хід преса  $\varepsilon = 0,18$ .



**Рисунок 2.20** – Протягання зливка із сталі 9ХФ масою 47 т в комбінованих бойках

Відносне зміцнення за таких температурно-швидкісних умов  $\sigma/\sigma_T = 5,0$ . Межа плинності сталі 9ХВ при температурі 1200 °С,  $\sigma_T = 6,6$  МН (див. рис. 2.17). Опір деформації  $\sigma = 5 \cdot 6,6 = 33$  МН. Чинник тертя приймемо рівним 0,5. У формулу  $p = \left(1 + \frac{2}{3}\mu_s \frac{1}{D_0}\right) D_0 l$ , для визначення повного зусилля протягання в комбінованих бойках необхідно підставити замість  $D_0 l$  дійсну площу контакту, і отримуємо:

$$2 \cdot \sqrt{D_0 \cdot \Delta R - \Delta R^2},$$

Тоді розрахуємо зусилля:

$$p = 33 \left(1 + 0,67 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{1,39}\right) \cdot 1,06 \cdot 1 = 43,4 \text{ МН.}$$

Порівнявши отриманий результат з даними експерименту можна зробити висновок, що при використанні цієї методики величина повного зусилля завищується на 15 %.

## 2.4 Обробка та обговорення результатів досліджень

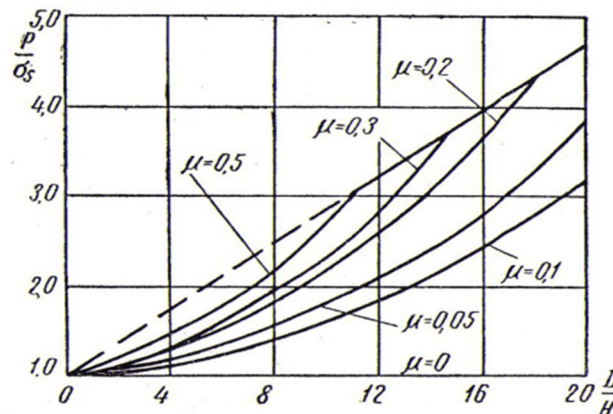
Приведені результати обчислення питомих зусиль осадки заготовки, отримані методом спільного рішення наближених рівнянь рівноваги і пластичності, досить близько співпадають з рішеннями, виконаними методом ліній ковзання, зокрема шляхом чисельної інтеграції рівнянь характеристик, застосованої і В. В. Соколовським.

Останнім часом деякі дослідники для визначення питомого зусилля при плоскій осадці застосували метод верхньої оцінки. Проте в цьому випадку користування цим методом не представляється доцільним ні з теоретичною, ні з практичної сторони, оскільки при мінімізації результатів останні неминуче співпадають з отримуваним значно простіше за методом баланс робіт.

Тарновским И. Я. Для практичних розрахунків була підібрана за допомогою графіку (рис. 2.21) наступна формула розрахунку зусилля кування з урахуванням залежності при  $a/h < 12$ ;

$$\frac{P}{\sigma_T} = 1 + 0,09 \frac{a}{h} \sqrt{\mu \frac{a}{h}} \quad (2.54)$$

де  $D$ ,  $H$  – розміри тіла в той момент деформації, для якого розраховується питомий тиск.

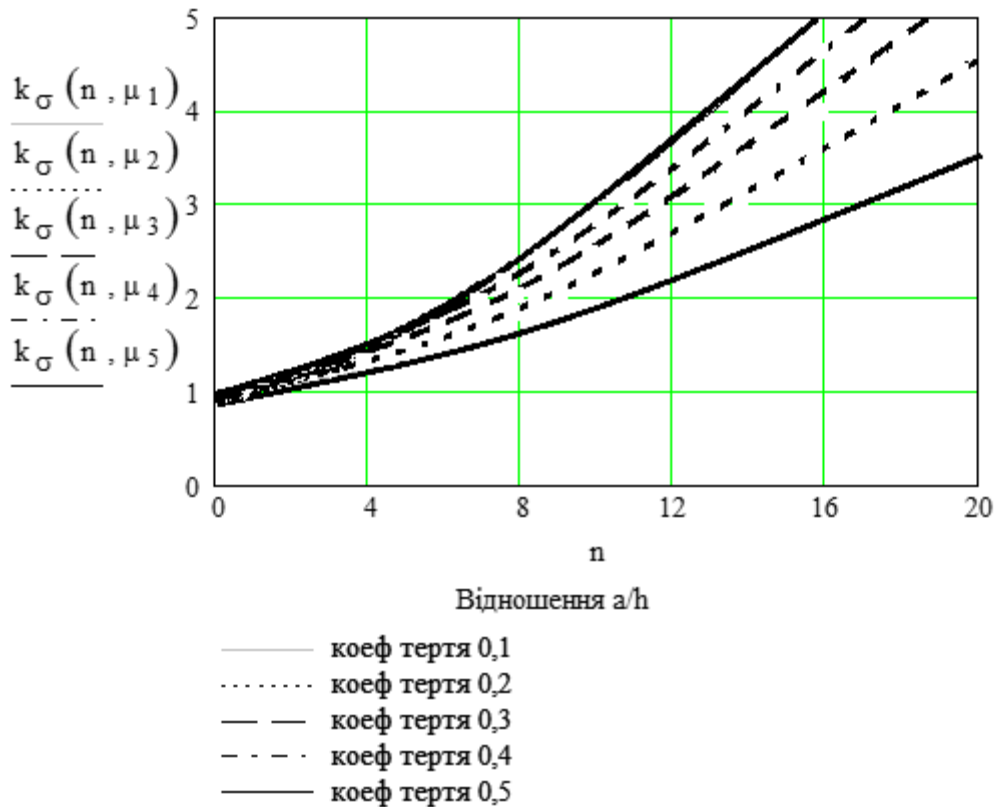


**Рисунок 2.21** – Графіки для визначення питомого тиску при осіданні циліндричних заготовок

На рисунку приведені графіки, побудовані по складнішому рівнянню (V, 22) [11]. Кожна крива відповідає певному значенню коефіцієнта зовнішнього

тертя  $\mu$ . При великих значення  $a/h$  усі криві переходять в пряму лінію, що проходить через початок координат.

По даним отриманим в результаті побудови графіка за формулою (2.54) зображеного на рисунку 2.21, можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  лінійно зростає і коефіцієнту напруженого стану метала.

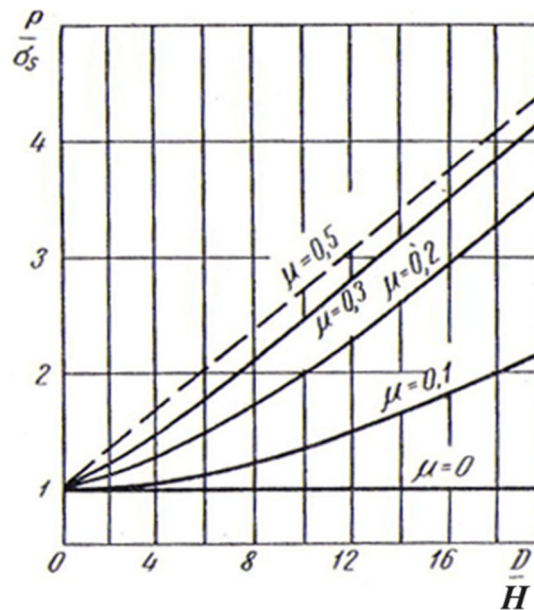


**Рисунок 2.22** – Графік залежності коефіцієнту напруженого стану метала  $k$  відношенню  $a/h$  (формула 2.54)

За даними, отриманими в результаті побудови графіка за формулою (2.54) зображеного на рис. 2.22, можна побачити, що зі збільшенням відношення  $a/h$  плавно зростає і коефіцієнту напруженого стану метала.

При виведенні формули для питомого тиску  $E$ . Зибель [15] вважає, що нормальна напруга в радіальному напрямі не залежить від висотної координати; це рівносильно допущенню про відсутність діжкоутворення і рівномірній деформації, незважаючи на наявність контактних сил тертя. Контактну напругу  $E$ . Зибель приймає постійними по усій контактній поверхні і рівними  $\mu\sigma_t$ .

Отже, виведення формули Е. Зібеля відрізняється від висновка отриманої формули (V, 22) [11] великим числом припущень.



**Рисунок 2.23** – Графік для визначення питомого тиску при осадці циліндричних заготовок

При порівнянні кривих (рис. 2.21) з кривими Є. П. Унксова (рис. 2.22) бачимо, що відношення  $p/k\sigma$  на діаграмах приблизно на 15% більше, ніж по діаграмі Є. П. Унксова [21]. Це пояснюється тим, що у виведенні максимальне контактне дотичне напруження узяті по Мізесу  $\tau_s = 0,58 \sigma_T$ , а у Е. П. Унксова  $\tau_s = 0,5 \sigma_T$ . При  $\mu = 0,5$  і  $a/h < 12$  значень  $p/\sigma_T$  за нашими даними (рис. 2.21 і 2.22), менше, ніж за даними Є. П. Унксова. Це пояснюється тим, що нами враховані нерівномірність деформації і загальмованість контактної ковзання металу в процесі осадки. У разі нерівномірної деформації витрачається менше енергії, ніж при деформації без діжоутворення і гальмування контактної ковзання.

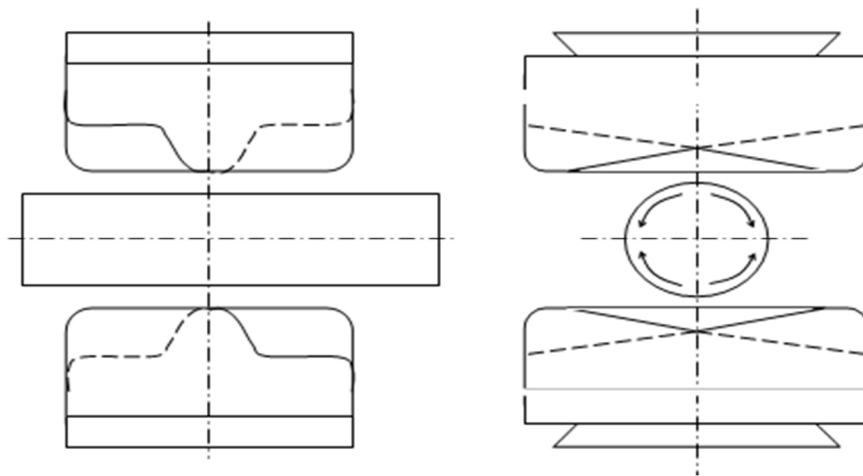
В даному підрозділі було виконано аналіз розрахункових формул залежності коефіцієнту напруженого стану металу в осередку деформації  $K\sigma$  від відношення  $a/h$ . Отримані графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення  $a/h$  коефіцієнту напруженого стану  $k\sigma$  також збільшується, що пояснюється збільшенням площі контактної поверхні і сил тертя.

## 2.5 Пропозиції та заходи щодо вдосконалення процесу, технології

### 2.5.1 Розрахунок нової технології виробництва поковок прокатних валків

З розрахованої технології ми бачимо, що самим трудомістким і енергоємним є процес осадки, який потрібний для деформації мікроструктури металу.

Переріз поковки не дозволяє зробити процес протягання традиційними методами, тому ми використовуємо в новій технології спеціальний інструмент - схрещені бойки. Випробування показали, що при застосуванні тих, схрещені бойків лита структура стає деформованою при коефіцієнті укова  $1,4 \div 1,5$ , у такому разі ми можемо не проводити процес осадки. Тому у своїй технології ми використовуємо схрещені бойки (рис. 2. 24).



**Рисунок 2.24** – Схрещені бойки [4]

Результати випробувань механічних властивостей металу в тангенціальному напрямі показали підвищення межі пропорційності до 126 – 129 МН (при нормі 120 МН). Таким чином перерозподіл анізотропії металу, досягнутий регулюванням мікротечії металу, забезпечив підвищені механічні характеристики металу, що відповідають умовам експлуатації виробів.

Позитивний вплив додаткових мікросувів при куванні у схрещених бойках (рис. 2. 24) можна використати у виробництві, маючи в розпорядженні наступні дані:

- встановлений зв'язок нормальних і мікросувових деформацій;
- наявність експериментальних залежностей мікросувових деформацій при куванні новим інструментом, кількісною оцінкою ефективності додаткових макрозрушень залежно від параметрів технологічного режиму кування.

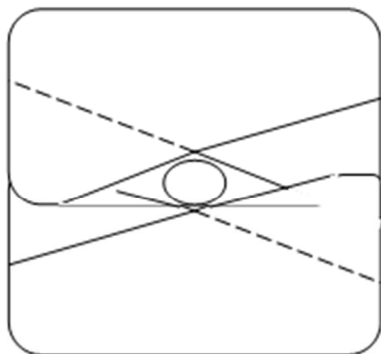
Схрещені бойки (рис. 2.25), дозволяють просувати заготовку при великій різниці діаметрів без опадання зливка; коефіцієнт укова:

$$K_{\text{у}} \geq \frac{D_{\text{ср. слитка}}^2}{d_{\text{поковки}}^2} \leq 1,4 \div 1,5$$

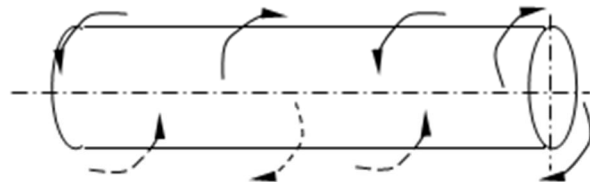
При протяганні в схрещених бойках, відбувається деформація металу в двох напрямках:

деформація зрушення (рис. 2.25 б).

Деформація стискування;



а.)



б.)

а) уков на мінімальний діаметр; б) деформація зрушення по довжині заготовки

**Рисунок 2.25** – Деформація в схрещених валках

Схрещені бойки роблять процес протягання з максимального розміру до необхідного мінімального.

Розрахунок бойків ведемо за тим же принципом, що і для ромбічних бойків, тільки обтискання при протяганні візьмемо максимальне.



Обладнення донної частини тепер не є необхідною операцією перед осадкою, оскільки процес осадки відсутній і немає ризику, що донна частина може розподілитися по робочому зливу.

Кування цапфи під осідку - процес, який потрібний тільки у разі, якщо в технологічній схемі є присутнім процес осадки. Якщо в даному випадку ми виключаємо цей процес, то кування цапфи відміняється, і ця операція проводиться в новій технології не буде.

Розрахуємо різниці в об'ємах для кожного виду поковки.

1). Валок 2Ц - 400 × 500:

$$K_z = \frac{D_{\text{ср.слитка}}^2}{d_{\text{поковки}}^2} = \frac{528^2}{440^2} = 1,44 \quad (2.55)$$

2). Валок 2Ц-330 × 1200:

$$K_z = \frac{D_{\text{ср}}^2}{d_{\text{поковки}}^2} = \frac{485^2}{375^2} = 1,47 \leq 1,5$$

3). Валок 2Ц- 400 × 1200:

$$K_z = \frac{D_{\text{ср}}^2}{d_{\text{поковки}}^2} = \frac{530^2}{440^2} = 1,45 \leq 1,4$$

Усі дані валяння ми можемо кувати протяганням без опади з максимального діаметру на мінімальний діаметр, після чого так само операція кування в міру східців на діаметр східців теж можливий в схрещених бойках.

## 2.5.2 Технологічні переходи кування за новою технологією

Розрахуємо нову технологію кування для кожного даного валка.

1). Валок 2Ц - 400 × 500:

- нагрівати до  $T = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- видати заготовлю з печі і подати під прес,

- білетування: обтиск граней на діаметр 485 мм, довжина зливка складає:  $V_{зл}$  до білетування =  $V_{зл} \Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетування:

$$V_{зл.1} = \pi r^2 h = 3.14 \times 264^2 \times 1049 = 229568866 \text{ мм}^3;$$

$$L_{зл} \text{ після білетування} = 229568866 / 3,14 \times 242^2 = 1243,25 \text{ мм.}$$

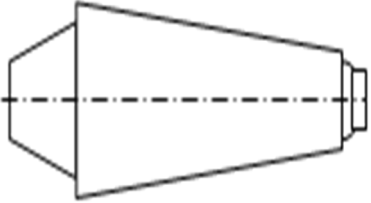
Процес білетування займає 9 хвилин робочого часу устаткування.

- час охолодження зливка 65 хвилин, отже додатковий нагрів не потрібно;
- протягання зливка на розміри заготівлі: максимальний діаметр 440 мм, довжина зливка = 1510 мм;
- розмітка зливка на діаметри і східці, розмітка частин;
- обтиснути бочку в міру, кувати східці на діаметр 250 мм;
- обрубкування надлишків;
- маркування.

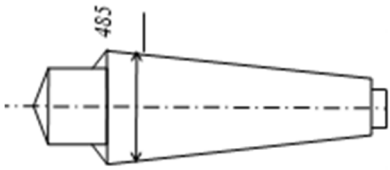
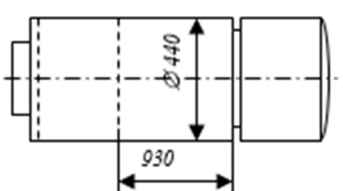
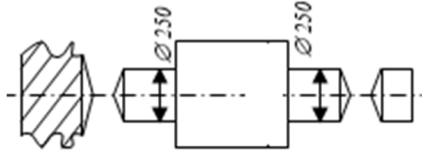
Процес протягання, кування кінців в міру і обрубкування надлишків займає 36 хвилин.

Увесь процес кування займає час:  $T = 45$  хвилин.

**Таблиця 2.11** – Технологічна схема кування валка 2Ц – 400 × 500 холодної прокатки за одне осаджування зливка

№	Назва операції	Ескіз поковки.	Інструмент
1	Нагрів зливка $T = 1230 \text{ } ^\circ\text{C}$		Нагрівальна піч.

Продовження табл. 2.11

№	Назва операції	Ескіз поковки.	Інструмент
2	білетування на діаметр 485 мм		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний.
3	Протягування зливка на діаметр 440 мм Розмітка і присікання ступенів		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений.
4	Обтиснути злиток в міру, Ковка ступенів на діаметр 250 мм, обрубка надлишків		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений. Розкатка Сокира
5	Правити Маркувати.		

## 2). Валок 2Ц-330 × 1200:

- нагріваючи до  $T = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- білетування: обтиск граней на діаметр 485 мм, довжина зливка складає:  $V_{\text{зл}}$  до білетування =  $V_{\text{зл}} \Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетування:

$$V_{\text{зл}} = \pi r^2 h = 3.14 \times 285^2 \times 1100 = 280551150 \text{ мм}^3.$$

$$L_{\text{зл}} \text{ після білетування} = 280551150 / 3,14 \times 265^2 = 1272,3 \text{ мм.}$$


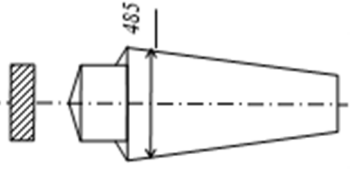
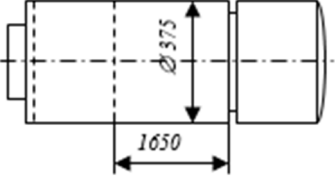
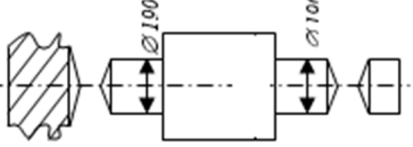
Процес білетування займає 9 хвилин, отже додатковий нагрів не потрібно:

- протягання зливка на розміри заготівлі: максимальний діаметр 375 мм, довжина зливка = 2025 мм;
- розмітка зливка на діаметри і сідці, притяла частин;
- обтиснути бочку валу в міру, обтиснути сідці на діаметр 190 мм.
- обрубкування надлишків;

- правити, маркувати.

Увесь процес кування займає часу:  $T = 45$  хвилин.

**Таблиця 2.12** – Технологічна схема кування валка холодної прокатки 2Ц – 330 × 1200 за одне осідання

№	Назва операції	Ескіз поковки.	Інструмент
1	Нагрів зливка $T = 1230$ °С		Нагрівальна піч.
2	білетування на діаметр 485 мм		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний.
3	Протягування зливка на діаметр 375 мм Розмітка і присікання ступенів		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений.
4	Обтиснути злиток в міру, Ковка ступенів на діаметр 190 мм, обрубка надлишків		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений. Розкатка. Сокира.
5	Правити. Маркувати.		

### 3). Валок 2Ц- 400 × 1200:

- нагріваючи до  $T = 1230$  °С,
- білетування: обтиск граней на діаметр 530 мм, довжина зливка складає:  $V_{зл}$  до білетування =  $V_{зл}$   $\Rightarrow$  за законом збереження об'єму знайдемо довжину зливка після білетування:

$$V_{сл.} = \pi r^2 h = 3.14 \times 285^2 \times 1100 = 280551150 \text{ мм}^3.$$

$$L_{сл.} \text{ після білетування} = 280551150 / 3,14 \times 2652 = 1272,3 \text{ мм.}$$


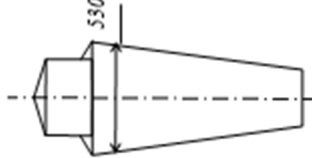
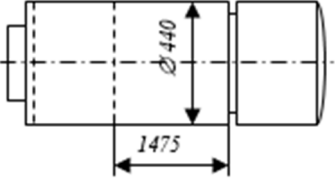
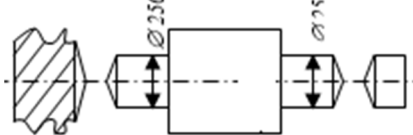
Процес білетування займає 10 хвилин, час охолодження зливка – 65 хвилин, отже додатковий нагрів не потрібно:

- протягання зливка на розміри заготівлі: максимальний діаметр 440 мм, довга зливка = 1846 мм;
- розмітка зливка на діаметри і східці, притяла частин;
- кування східців на діаметр 250 мм;
- обрубкування надлишків.
- Правити, маркувати.

Процес протягання, ковка кінців в міру і обрубкування надлишків займає 40 хвилин.

Увесь процес кування займає час  $T = 50$  хвилин.

**Таблиця 2.13** – Технологічна схема кування валка холодної прокатки 2Ц – 330 × 1200 за одне осідання

№	Назва операції	Ескіз поковки.	Інструмент
1	Нагрів зливка $T = 1230$ °С		Нагрівальна піч.
2	білетування на діаметр 485 мм		Бойки: верхній плоский, нижній вирізний.
3	Протягування зливка на діаметр 375 мм Розмітка і присікання ступенів		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений.
4	Обтиснути злиток в міру, Ковка ступенів на діаметр 190 мм, обрубка надлишків		Бойки: верхній схрещений, нижній схрещений. Розкатка Сокира
5	Правити Маркувати.		

### 2.5.3 Допоміжний інструмент

Розрахуємо допоміжний інструмент – схрещені бойки, для протягання зливка.

Розрахунок схрещених бойків, робиться ідентично вирізним ромбічним бойкам, розглянутим в розділі «Вибір і розрахунок технологічного інструменту».

Протягування призначене для збільшення довжини заготівлі за рахунок зменшення її поперечного перерізу.

Застосування вирізних схрещених бойків обмежує розширення і збільшує інтенсивність витягу, завдяки чому збільшується продуктивність кування.

Стосовно круглих заготовок використовують аналогію розрахунку квадратних заготовок: сторона квадрата, рівновеликого початковій круглій заготівки, рівна:  $H'o = B'o = R \sqrt{\pi}$ .

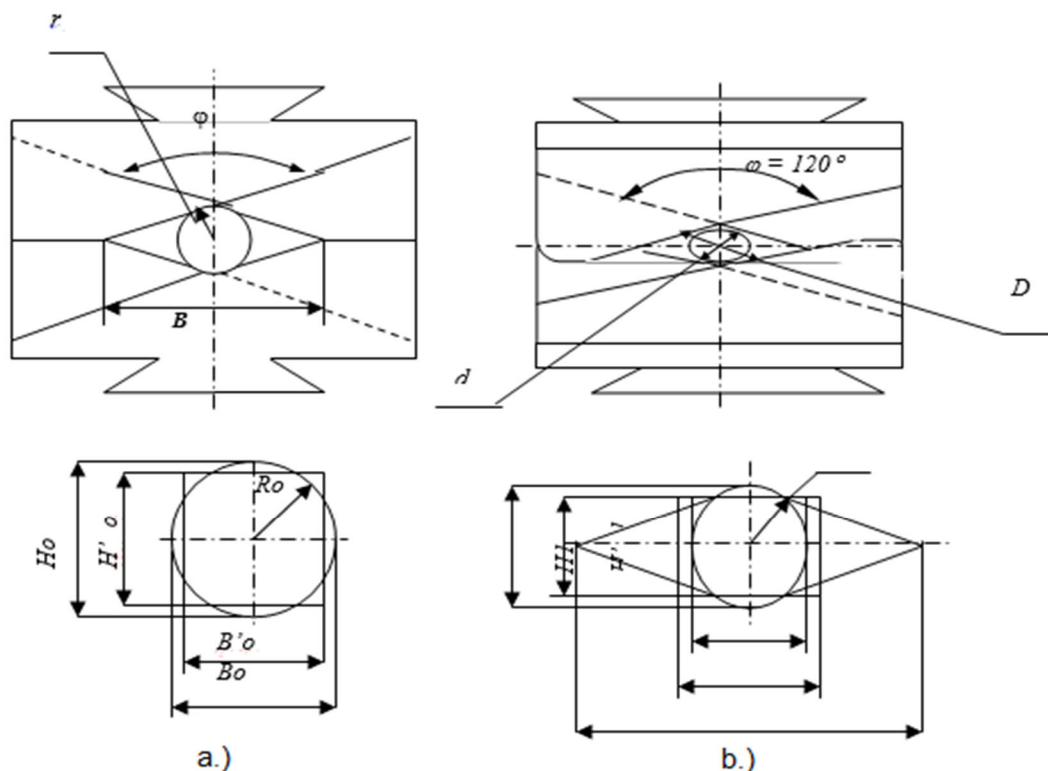


Рисунок 2.22 – (а) схрещені бойки, (б) протягування заготівки в схрещених бойках [4]

Висота приведенного прямокутника  $H_1$  рівновеликого перерізу заготівлі після обтискання приймається рівній висоті квадрата, рівновеликого кругу радіусом  $r$ ,  $H_1 = r \sqrt{\pi}$ .

Ширина прямокутника

$$B_1' = \frac{F_1'}{H_1'}$$

де  $F_1'$  – переріз заготовки після обтискання.

Приведена міра деформації визначається по формулі [8]:

$$\varepsilon'_{0H} = 1 - \frac{H_1'}{H_0'} \dots \text{або} \dots \varepsilon'_{0Y} = 1 - \frac{r}{R}$$

Коефіцієнт розширення через приведені величини виразиться формулою:

$$f = \frac{H_1' (B_1' - B_0')}{B_0' (H_0' - H_1')}$$

або при повному зімкненні бойків:

$$f = \frac{\frac{F_1}{R} - Rr}{R^2 - Rr}$$

#### 2.5.4 Розрахунок бойків зі схрещеною робочою поверхнею

Розрахуємо бойки, що схрещуються, для даних поковок валків:

1. Валок 2Ц - 400 × 500.

Сторона квадрата, рівновеликого початковій круглій заготівлі, рівна:

$$H_0 = B_0 = R \sqrt{\pi} = 242,5 \times 1,77 = 430 \text{ мм.}$$

Висота приведенного прямокутника  $H_1'$ , рівновеликого перерізу заготовки після обтискання, приймається рівній висоті квадрата, рівновеликого кругу радіусом  $r$ ,

$$H_1 = r \sqrt{\pi} = 220 \times 1,77 = 394 \text{ мм.}$$

Ширина прямокутника:

$$F_1' = \frac{\pi r^2}{2} = \frac{3,14 \times 187,5^2}{2} = 55195 \text{ мм}^2$$

$$B_1' = \frac{F_1'}{H_1'} = \frac{\pi \times r^2}{2 \times H_1'} = \frac{3,14 \times 220^2}{2 \times 390} = 195 \text{ мм}$$

де  $F_1'$  – переріз заготовки після обтискання.

Приведена міра деформації визначається по формулі:

$$\varepsilon'_{0H} = 1 - \frac{H_1'}{H_0'} = 1 - \frac{332}{430} = 0,23$$

$$\text{або} \dots \varepsilon'_{0Y} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - \frac{187,5}{242,5} = 0,23$$

Коефіцієнт розширення через приведені величини виразиться формулою:

$$f = \frac{F_1' - Rr}{R^2 - Rr} = \frac{55195 - 187,5 \times 242,5}{242,5^2 - 187,5 \times 242,5} = \frac{-21327}{13337,5} = -2,09$$

2. Валок 2Ц - 400 × 1200.

Сторона квадрата, рівновеликого початковій круглій заготівлі, рівна:

$$H'_0 = B'_0 = R \sqrt{\pi} = 265 \times 1,77 = 428 \text{ мм.}$$

Висота приведенного прямокутника  $H_1'$ , рівновеликого перерізу заготівлі після обтискання, приймається рівній висоті квадрата, рівновеликого кругу радіусом  $r$ ,

$$H_1' = r \sqrt{\pi} = 220 \times 1,77 = 390 \text{ мм.}$$

Ширина прямокутника:

$$F_1' = \frac{\pi r^2}{2} = \frac{3,14 \times 220^2}{2} = 75988 \text{ мм}^2$$

$$B_1' = \frac{F_1'}{H_1'} = \frac{75988}{390} = 195 \text{ мм} ,$$

де  $F_1'$  – переріз заготовки після обтискання.



Приведена міра деформації визначається по формулі:

$$\varepsilon'_{0H} = 1 - \frac{H'_1}{H'_0} = 1 - \frac{390}{469} = 0,17$$

$$\text{або } \dots \varepsilon'_{0H} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - \frac{220}{265} = 0,17$$

Коефіцієнт розширення через приведені величини виразиться формулою:

$$f = \frac{F_1 - Rr}{R^2 - Rr} = \frac{75988}{265^2 - 265 \times 220} - \frac{3,14}{265 \times 220} = -2,86$$

**Висновки по розділу 2:** основна увага була направлена на здійснення порівняльного аналізу формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від герметичних характеристик зразка, що осаджується.

В процесі аналізу було розглянуто шість різних варіантів формул для розрахунку середнього контактного тиску та виконано аналіз розрахункових формул залежності від коефіцієнту напруженого стану металу в осередку деформації  $K\sigma$  та відношення  $a/h$ . Отримані графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення  $a/h$  коефіцієнту напруженого стану,  $k\sigma$  також збільшується, що пояснюється збільшенням площі контактної поверхні і сил тертя.

При порівнянні кривих (рис. 2.21) з кривими Є. П. Унксова (рис. 2.22) бачимо, що відношення  $p/k\sigma$  на діаграмах приблизно на 15% більше, ніж по діаграмі Є. П. Унксова. Це пояснюється тим, що у виведенні максимальне контактне дотичне напруження узяті по Мізесу  $\tau_s = 0,58 \sigma_T$ , а у Є. П. Унксова  $\tau_s = 0,5 \sigma_T$ . При  $\mu = 0,5$  і  $D/H < 12$  значень  $p/\sigma_T$  за нашими даними (рис. 2.21 і 2.23), менше, ніж за даними Є. П. Унксова. Це пояснюється тим, що нами враховані нерівномірність деформації і загальмованість контактної ковзання металу в процесі осадки. У разі нерівномірної деформації витрачається менше енергії, ніж при деформації без діжоутворення і гальмування контактної ковзання.

З розрахунку технології ковки прокатних валків ми бачимо, що самим трудомістким і енергоємним є процес осадки, який потрібний для деформації мікроструктури металу [21].

Переріз поковки не дозволяє зробити процес протягання традиційними методами, тому ми використовуємо в новій технології спеціальний інструмент - схрещені бойки. Випробування показали, що при застосуванні схрещених бойків лита структура стає деформованою при коефіцієнті укова  $1,4 \div 1,5$ , у такому разі ми можемо не проводити процес осадки. Тому у своїй технології ми використовуємо схрещені бойки (рис. 2.24).

Результати випробувань механічних властивостей металу в тангенціальному напрямі показали підвищення межі пропорціональності до 126 – 129 МН (при нормі 120 МН). Таким чином перерозподіл анізотропії металу, досягнутий регулюванням мікротечії металу, забезпечив підвищені механічні характеристики металу, що відповідають умовам експлуатації виробів.

Позитивний вплив додаткових мікросувів при куванні у схрещених бойках (рис. 2.24) можна використати у виробництві, маючи в розпорядженні наступні дані:

- встановленим зв'язком нормальних і мікрозсуючих деформацій;
- наявність експериментальних залежностей мікрозсуючих деформацій при куванні новим інструментом, кількісною оцінкою ефективності додаткових макрозрушень залежно від параметрів технологічного режиму кування.

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК В DEFORM 3D

#### 3.1 Нерівномірність деформації при осадці циліндричних заготовок

Під нерівномірністю деформації мають на увазі міру неоднакового розподілу деформації, яка оцінюється кількісно відповідними показниками.

Велика мікронерівномірність спостерігається при гарячій деформації металу, в умовах рекристалізації, що одночасно протікає, обробки і збиральної рекристалізації. Деформація реальних сплавів ще більше нерівномірна із-за наявності різних структурних складових; їх протидія деформації, пластичності і форма також різні. Характеризуючи пластичну деформацію, необхідно звернути увагу на те, що це результат різнорідних переміщень часток пластичного тіла.

Для характеристики нерівномірності деформації істотне значення має геометрична сторона явищ. При цьому слід брати до уваги так званий геометричний чинник деформації. Нерівномірність деформації пов'язана з геометричною формою об'єкту, граничними умовами і напрямом переміщень окремих часток.

При дотриманні деяких умов в процесі деформації можна зберегти форму тіла. Наприклад, циліндр після осадки залишається циліндром, призма – призмою. Такого роду деформацію можна назвати рівномірною в геометричному відношенні. Проте, зерна, що становлять структуру металевого циліндра, який залишається циліндром після осадки зазнають нерівномірність деформації. Таким чином, однорідною у фізичних відносинах пластичної деформації не існує. Проте до рівномірної в геометричному відношенні кінцевої деформації вдається наблизитися, зокрема до усуненням контактних сил тертя.







Геометрична характеристика деформації залежить не лише від форми тіл, що деформуються, але і від співвідношення їх розмірів. Для спрощення експериментів і виключення другорядних чинників зазвичай прагнуть

використати зразки найбільш простої форми, наприклад циліндричні, стосовно яких і будуть розглянуті геометричні особливості деформації. При обтисканні квадратних або прямокутних зразків вплив ребер не вносить характерних для процесу особливостей, але існує багато рис геометрично рівномірної деформації.













Зазвичай в дослідженнях використовують ряд зразків, що включає однакові або різні по розмірах зразки. Розділення зразків ґрунтоване на обліку їх геометричних параметрів (об'єм  $V$ ; діаметр  $D_0$ ; висота  $H_0$ ; коефіцієнт контакту  $\frac{D_0}{H_0}$ ). У зв'язку з цим розрізняють наступні типи зразків (таблиця 3.1):

- 1) однакового діаметру ( $D_0 = \text{const}$ );
- 2) однакових висоти ( $H_0 = \text{const}$ );
- 3) однакові об'єми ( $V = \text{const}$ );
- 4) з однаковим коефіцієнтом контакту ( $\frac{D_0}{H_0} = \text{const}$ );
- 5) однакових розмірів ( $D_0 = \text{const}, H_0 = \text{const}, V = \text{const}, \frac{D_0}{H_0} = \text{const}$ ).

**Таблиця 3.1** – Класифікація зразків для експерименту

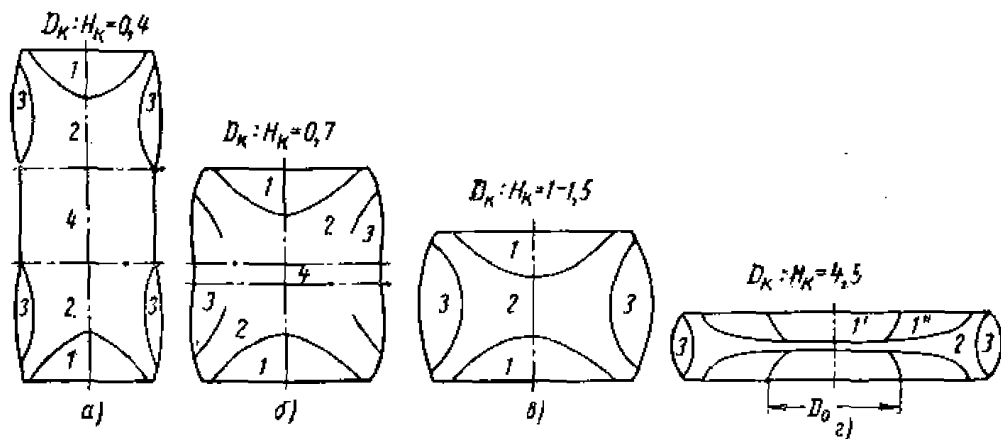
Тип зразка	Геометричні параметри зразка	Різновиди зразків		
		Високі	Перехідних розмірів	Низькі
		Характер епюр нормальних напружень		
				
		Величина контактної коефіцієнта		
		$D/H < 2$	$2 < D/H < 4$	$D/H \geq 4$
1	2	3	4	5
1.	$D = \text{const}$ $H = \text{const}$ $D/H = \text{const}$ $V = \text{const}$			

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
2.	D = const H ≠ const D/H ≠ const V ≠ const			
3.	V = const D ≠ const H ≠ const D/H ≠ const			
4.	H = const V ≠ const D ≠ const D/H ≠ const			
5.	D/H=const H ≠ const V ≠ const D ≠ const			

Нерівномірність течії металу є результатом більшої або меншої зосередженості пластичної деформації в різних місцях його об'єму. При проведенні експериментів у великому інтервалі значень  $\frac{D}{H}$  вдається виявити у зразків чотири типи різних зон (рис. 3.1). Осадка зразків з  $\frac{D}{H} \leq 0,4 - 0,7$  (рис. 3.1, а) характеризується наявністю усіх чотирьох типів зон. До контактних поверхонь примикають куполоподібні зони 1 ускладненої деформації; до них примикають зони 2 локалізованих деформації, в якій діє максимальна напруга під кутом  $45^\circ$  до осі зразка. В даному випадку є дві такі зони і дві зони 3, в яких діє кільцева напруга, що розтягує. Між зонами 2 розміщується центральна зона 4, що характеризується найбільш рівномірною деформацією. У початковій стадії осадження відбувається подвійне діжкоутворення зразка, яке при  $\frac{D}{H} = 0,7 - 0,8$  зникає (рис. 2.1, б, в). При цьому на периферії зона 4 переходить в зону 3, яка стає єдиною кільцевою зоною для усього зразка; середній частині зона 4 поглинається двома зонами 2, які об'єднуються в загальну хрестоподібну форму (рис. 2.1, в), що має в подовжньому перерізі. Подальше осідання пов'язане зі значним розвитком зони 1 (рис. 3.1, г), що має до цього часу вже деяку деформацію (але менше середньою для усього зразка).

Отже, типовою ускладненою зоною, що характеризується дуже невеликими деформаціями, є лише середня частина зони 1. У периферійній частині 1 зони ускладненої деформації до цього моменту вже є досить велика міра деформації, але як і раніше менша, ніж середня для усього об'єму. У частині 1 є метал, що перейшов із зони 3, який вже деформований більшою мірою, чим це характерно для зони ускладненої деформації. Тому зони слід виявляти в перший момент їх утворення.



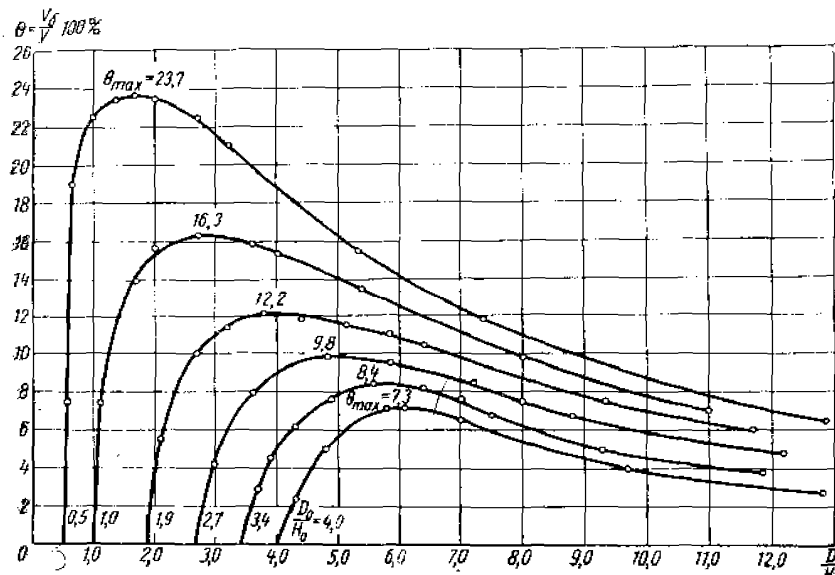
**Рисунок 3.1** – Зони деформації при осіданні циліндричних заготовок з різним співвідношенням розмірів [8]

При осадці в загальній схемі нерівномірної деформації не були виявлені причини подвійного діжкоутворення. Одинарне діжкоутворення пояснюється стримуючою поперечні деформації дією сил тертя, яке поблизу контактної поверхні максимально і убуває уздовж тієї, що утворює циліндр до його середнього поперечного перерізу. Причини утворення увігнутого профілю по висоті середньої частини зразка пояснити за допомогою цієї схеми не вдається. Для пояснення цього доводиться виходити з подвійного впливу сил тертя в процесі деформації. 1). До діжкоутворення призводить безпосередня стримуюча дія сил тертя. 2). Зони ускладненої деформації, що мають куполоподібну форму, чинять при осадці розклинюючу дію на метал, що знаходиться між ними. За наявності деякої відстані між куполоподібними зонами ( $D/H = 0,33 - 0,4$ ) метал, переміщуваний в радіальних напрямках,

призводить до утворення двох самостійних поясів опуклостей. При зближенні зон ускладненої деформації ( $D/H \geq 0,8$ ) утворюється кільцевий пояс у вигляді бочко відтворення форми опуклості у осаджуваного тіла.

Нерівномірність деформації при осіданні, яке проявляється у вигляді діжкоутворення, зазвичай небажана, оскільки призводить до витрат металу при технологічних деформаціях або втраті додаткового часу і засобів на вирівнювання бічної поверхні поковки.

На рис. 3.2 наведено сімейство кривих для різних значень  $\frac{D_0}{H_0}$  (в межах 0,5-4,0). Чим більше значення  $\frac{D_0}{H_0}$ , тим менше максимальна величина відносного об'єму діжкоутворення і тим при меншій мірі деформації воно досягається. Досягнувши максимуму при подальшому осіданні, об'єм, що характеризує діжкоутворення, поступово зменшується. Оскільки збільшення діжкоутворення свідчить про зростання нерівномірності деформації, можна зробити висновок, що осадка більшої або меншої величини, ніж що відповідає максимуму величини  $\theta$ , характеризується меншою нерівномірністю деформації.



**Рисунок 3.2** – Залежність показника діжкоутворення від співвідношення розмірів циліндричних заготовок при осіданні [8]

Ця закономірність майже не залежить від температури металу, його хімічного складу, сил тертя і навіть від швидкості деформації, якщо вона не велика.

### **3.2 Опис системи автоматизованого проектування DEFORM 3D**

DEFORM 3D – це потужна система моделювання технологічних процесів, призначена для аналізу тривимірної (3D) поведінки металу при різних процесах обробки тиском. DEFORM 3D надає важливу інформацію про течію матеріалу в штампі і розподілі температур під час процесу деформації. DEFORM 3D дозволяє моделювати такі процеси як: кування, гаряче, напівгаряче і холодне штампування, пресування, прокатки, витягання і багато інших процесів [22].

DEFORM 3D ґрунтується на методі кінцевих елементів, одному з найвідоміших, надійніших і найчастіше застосовуваних нині розрахункових методів.

Автоматичний сітковий генератор DEFORM 3D будує оптимізовану звичайно-елементну сітку, згущуючи її в найбільш критичних зонах. Завдяки цьому з системою можуть працювати навіть користувачі без досвіду роботи із звичайно-елементними системами. Крім того, користувач має можливість самостійно налаштувати щільність сітки, розподіл її елементів по перерізу і параметри її автоматичного перестроювання. DEFORM 3D дозволяє вирішувати завдання деформації, теплопередачі, а також розділові операції, такі як вирубування і прошивка. Додатково до цього є можливість підключення модуля DEFORM – HT, що дозволяє моделювати увесь технологічний ланцюжок, починаючи з розділових заготівельних операцій, операції нагріву заготовки, формотворних операцій і закінчуючи операціями остаточної термічної обробки. Основними модулями є: препроцесор, стимулятор наступних процесів.

Основна функція препроцесора - представлення досліджуваного об'єкту(деталі) в сітковому виді, тобто у вигляді безлічі кінцевих елементів.



Побудова моделі процесу ОМТ, завдання початкових параметрів досліджуваного процесу: температури об'єктів, переміщення об'єктів, контактних умов між об'єктами, швидкості і зусилля деформації, деформуючий інструмент та ін.

Вирішувач – це програма, яка збирає моделі окремих кінцевих елементів в загальну систему алгебраїчних рівнянь і вирішує цю систему одним з методів розріджених матриць.

Постпроцесор служить для візуалізації результатів рішення в зручній для користувача формі. А також аналізу отриманих результатів. Спостереження за зміною температури, інтенсивності напруги і деформації, відстежуванням переміщення точок, побудова кривої зусилля.

### **3.3 Моделювання процесу осадки циліндричних заготовок з різним співвідношенням початкових геометричних розмірів в DEFORM 3D і розрахунок показників нерівномірності деформації**

Цей експеримент проводиться для перевірки достовірності і порівняння даних, отриманих в DEFORM 3D, з даними, приведеними в літературі і даними попередніх досліджень. Суть експерименту полягає в осадці дев'яти заготовок (рис. 3.3, 3.4) з різним співвідношенням геометричних розмірів (початкової висоти і діаметру) з різною мірою деформації.

*Зміст експерименту:*

- побудова об'ємних моделей заготовок і інструменту в програмі 3D проектувань Solid Works (рис. 3.5);
- перенесення побудованих моделей в модуль DEFORM 3D Pre Processor (рис. 3.6);
- вибір матеріалу і завдання параметрів опади заготовок;
- аналіз отриманих результатів в модулі DEFORM 3D Post Processor, а саме профілі поверхні осаджених заготовок (рис. 3.7);

- розрахунок показників деформації, побудова серії графіків залежності показника діжкоутворення від міри деформації і геометричних розмірів заготовок.

Матеріал заготовок - нержавіюча сталь марки 9Х2МФ, матеріал бойків - вуглецева сталь 45. Параметри осадки, що задаються в Pre Processor: температура нагріву заготовок 1200°C температура підігрівання бойків 300°C, швидкість осадки дорівнює 25 мм/с, осідання проводиться без мастила.

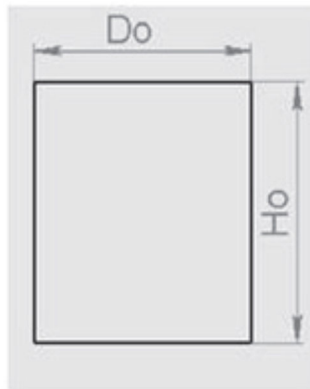


Рисунок 3.3 – Ескіз початкової заготовки

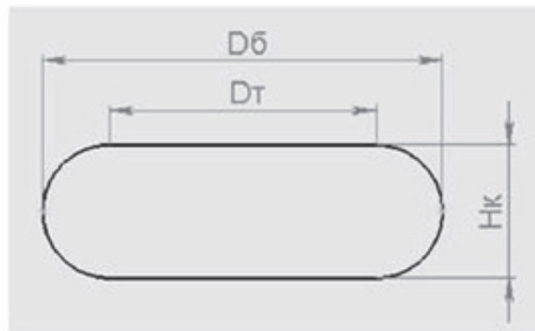


Рисунок 3.4 – Ескіз заготовки після осадження

Таблиця 3.2 – Геометричні розміри початкових заготовок

Номер заготовок	Початкова висота, $H_0$ , мм	Початковий діаметр, $D_0$ , мм	Кінцева висота, $H_k$ , мм
1	2	3	4
1	164	300	90
2	180	300	114

Продовження табл. 3.2

Номер заготовок	Початкова висота, $H_0$ , мм	Початковий діаметр, $D_0$ , мм	Кінцева висота, $H_k$ , мм
3	270	223	124
4	275	308	90
5	276	290	180
6	320	280	110
7	420	210	113
8	462	224	180
9	996	400	346

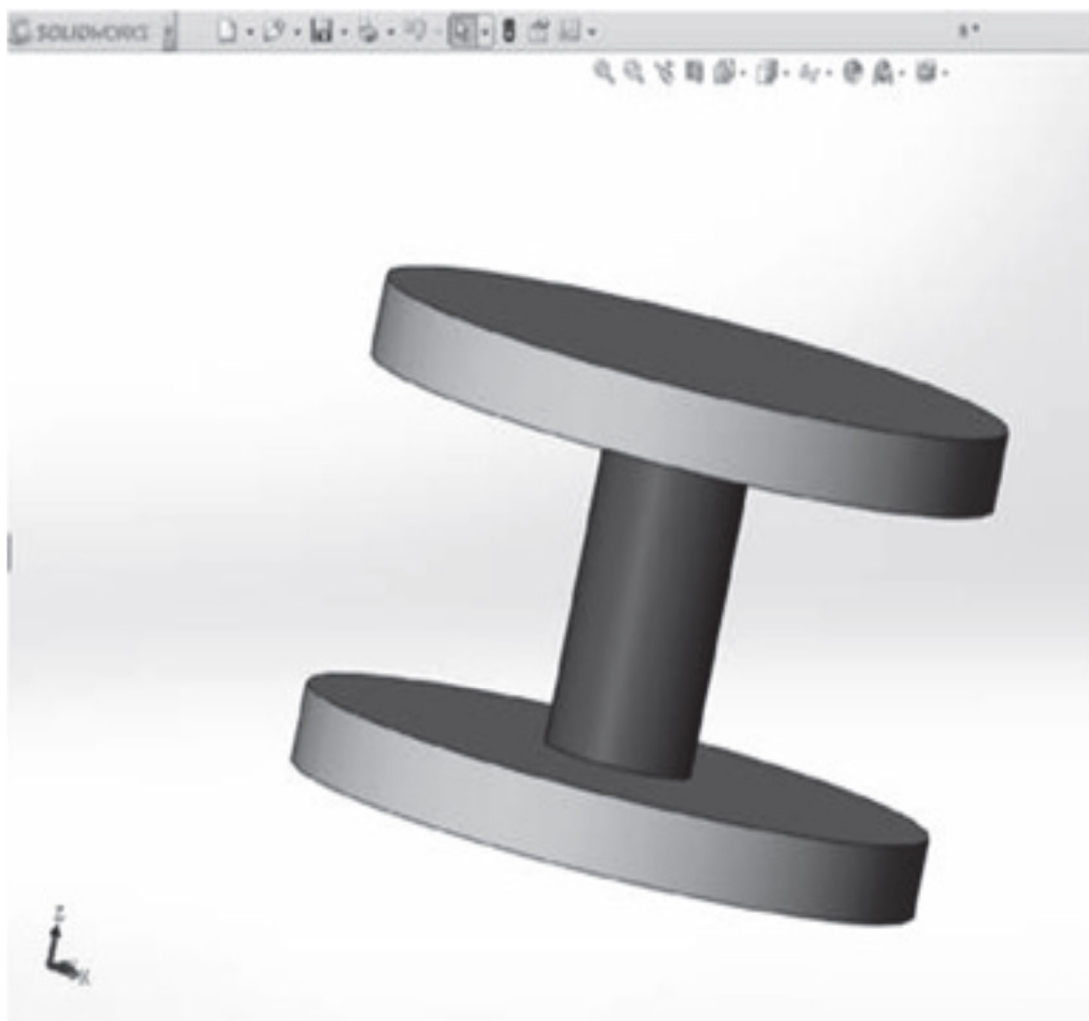


Рисунок 3.5 – Створення об'ємних заготовок в Solid Works

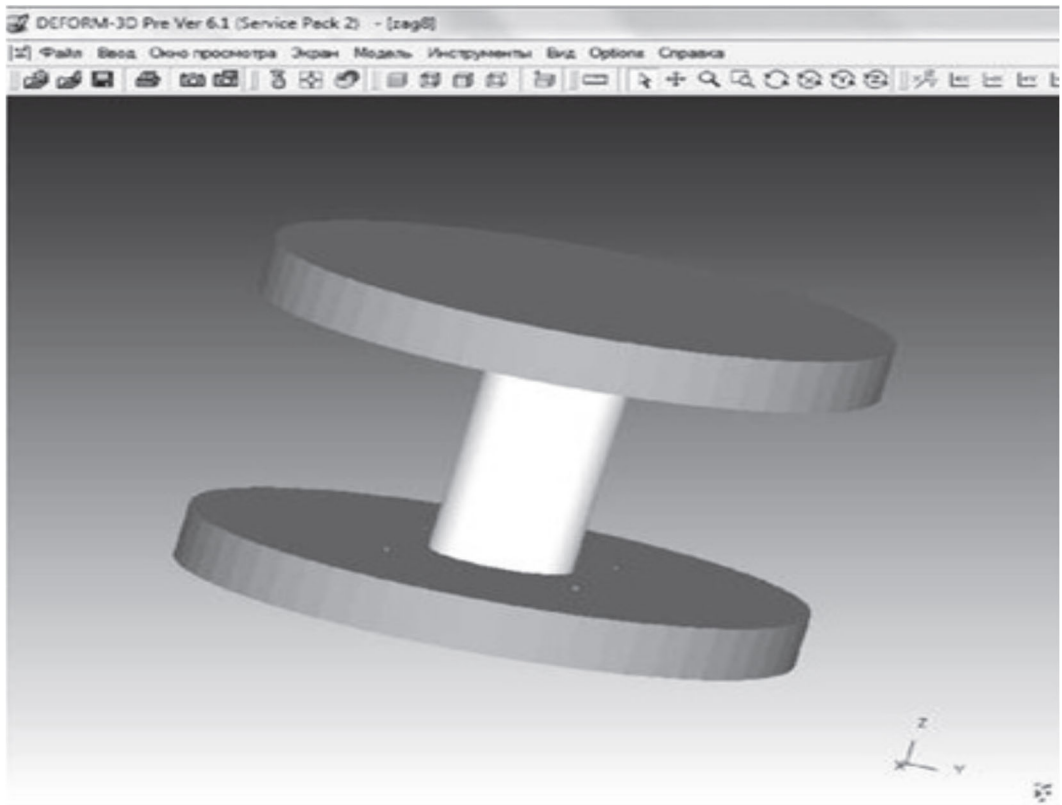


Рисунок 3.6 – Створення моделі в модулі DEFORM 3D Pre Processor

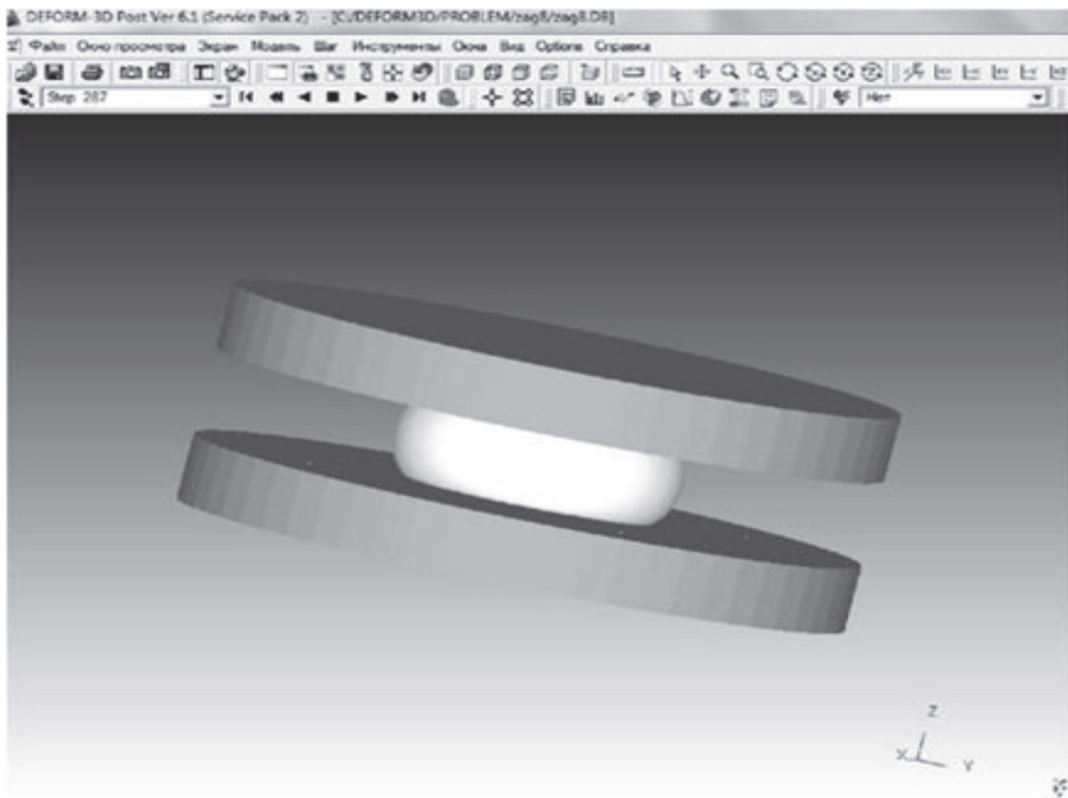


Рисунок 3.7 – Моделі в DEFORM 3D Post Processor, отримані після осадження

На практиці використовується показник відносної деформації (ступені деформації), що підраховується за початковим розміром заготовки, що деформується. Для осадження

$$\varepsilon_{он} = \frac{H_0 - H_K}{H_0} \quad (3.1)$$

При осадженні циліндричних заготовок спостерігається нерівномірність деформації, яка проявляється у вигляді діжкоутворення. Діжкоутворення при осадці циліндра відбувається за складною схемою. Об'єм металу, що бере участь у діжкоутворенні  $V_{\delta}$  можна розрахувати як різницю між об'ємом осаджуваного тіла  $V$  та об'ємом, обмеженим двома контактними поверхнями  $V_{\psi}$ :

$$V_{\delta} = V - V_{\psi} = \left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right) H_0 - \left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right) H_K \quad (3.2)$$

де  $D_m$  – діаметр торця осаджуваної заготовки.


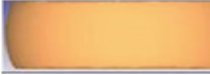



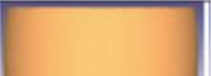
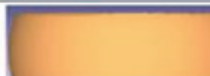


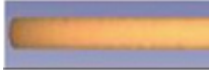






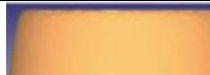




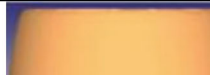








Для зіставлення різних об'ємів, що характеризують діжкоутворення, зручно користуватися відносним об'ємом діжкоутворення:

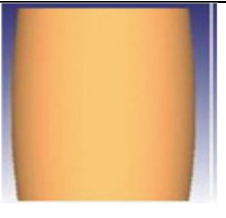







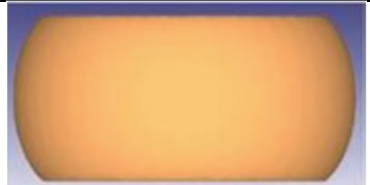






$$\theta = \frac{V_{\delta}}{V} \quad (3.3).$$

Формозмінення циліндричних заготовок при різних ступенях деформації представлено в табл. 3.3.

Як видно з рис. 3.8, чим більше значення  $\frac{D_0}{H_0}$ , тим менше максимальна величина відносного об'єму діжкоутворення, що співпадає з даними приведеними в літературі, з точністю по значеннях графіку (рис. 3.1) 85%, по формозміненню (рис. 3.2) – 95%.

Таблиця 3.3 – Профілі заготовок після осадження

№ Заготовки	Відношення геометричних розмірів $D_0/H_0$	Профілі заготовок після осадження				
		$\epsilon_{OH} = 10\%$	$\epsilon_{OH} = 20\%$	$\epsilon_{OH} = 40\%$	$\epsilon_{OH} = 60\%$	$\epsilon_{OH} = 80\%$
1	2	3	4	5	6	7
1	1,83					
2	1,67					
3	1,12					
4	1,05					
5	0,88					
6	0,83					

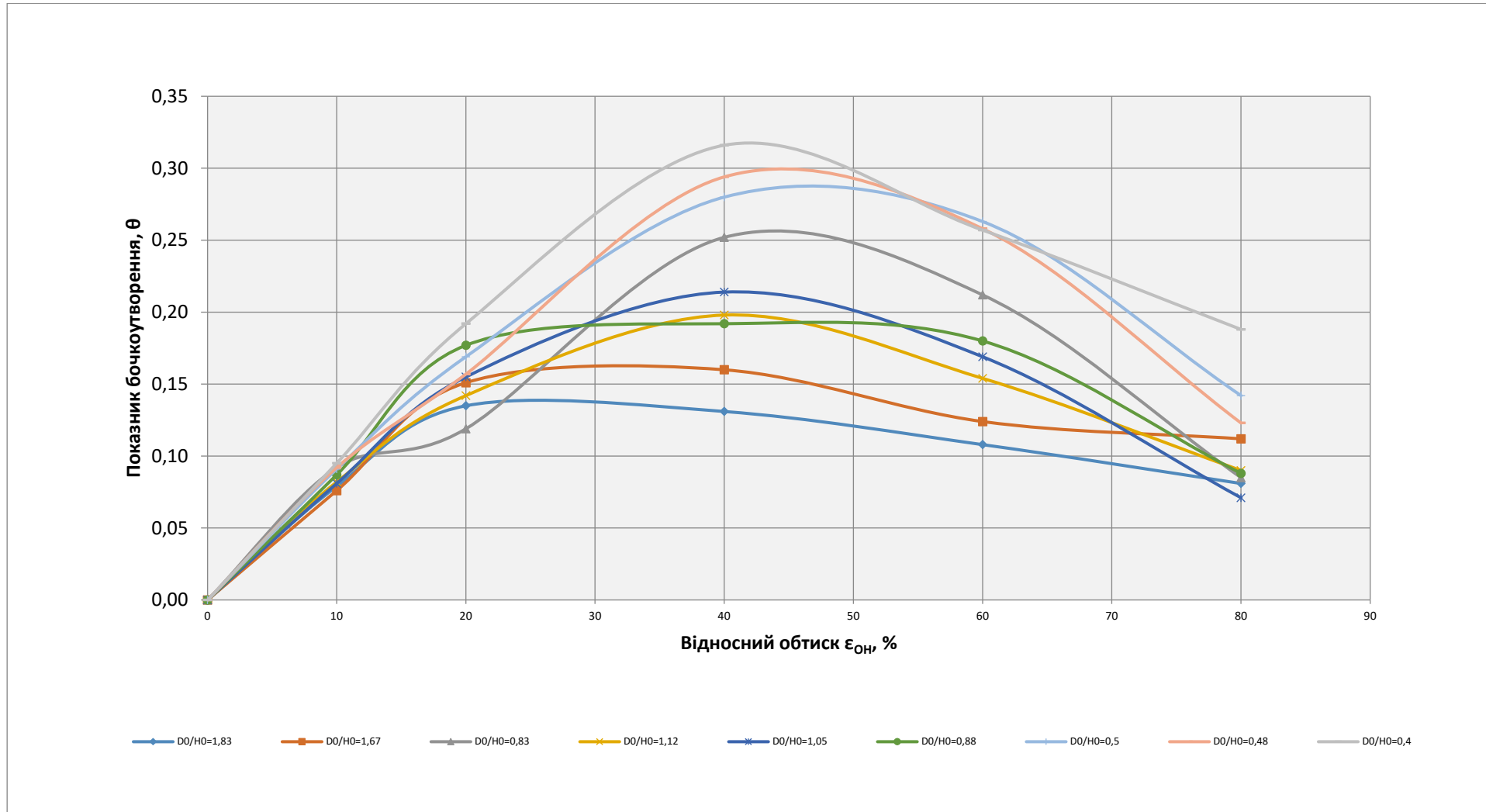
№ Заготовки	Відношення геометричних розмірів $D_0/H_0$	Профілі заготовок після осадження				
		$\epsilon_{OH} = 10\%$	$\epsilon_{OH} = 20\%$	$\epsilon_{OH} = 40\%$	$\epsilon_{OH} = 60\%$	$\epsilon_{OH} = 80\%$
1	2	3	4	5	6	7
7	0,50					
8	0,48					
9	0,40					

**Таблиця 3.4** – Показники діжкоутворення при осадці циліндричних заготовок

№ заготовки	Відношення геометричних розмірів $D_0/H_0$	Показник діжкоутворення, $\theta$				
		$\epsilon_{OH}=10\%$	$\epsilon_{OH}=20\%$	$\epsilon_{OH}=40\%$	$\epsilon_{OH}=60\%$	$\epsilon_{OH}=80\%$
1	1,83	0,079	0,135	0,131	0,108	0,081
2	1,67	0,076	0,151	0,160	0,124	0,112
3	1,12	0,092	0,119	0,252	0,212	0,085
4	1,05	0,082	0,142	0,198	0,154	0,090
5	0,88	0,081	0,155	0,214	0,169	0,071
6	0,83	0,087	0,177	0,192	0,180	0,088
7	0,50	0,091	0,169	0,280	0,263	0,142
8	0,48	0,092	0,157	0,294	0,258	0,123
9	0,40	0,095	0,192	0,316	0,257	0,188

За отриманими даними можна побудувати серію графіків залежності показника діжкоутворення від міри деформації для заготовок з різним співвідношенням початкових геометричних розмірів  $D_0/H_0$ . Ця серія графіків представлена на рисунку 3.8.





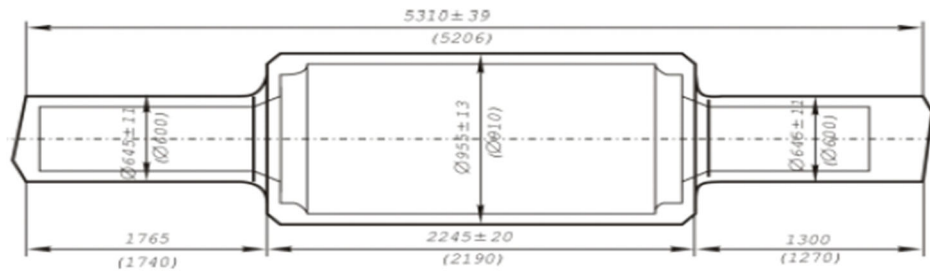
**Рисунок 3.8** – Залежність показників діжкоутворення від ступеню деформації  $\epsilon_{0H}$  при осадці заготовок з різними співвідношеннями  $D_0/H$

### **3.4 Вдосконалення технологічного процесу ковки прокатних валків на базі DEFORM-3D**

При проектуванні технологічних процесів обробки металів тиском (ОМТ) необхідно розробляти нові ресурсозберігаючі технологічні процеси, які забезпечують високу якість продукції, для конкурентоспроможності на ринках поковок. Кожну поковку вагою більше 30 тон можна вважати унікальною і розробка технологічного процесу кування великих поковок є одним з відповідальних етапів, оскільки брак або низькі механічні властивості поковок відповідального призначення не допускаються. Проведення експериментальних досліджень на великих зливках економічно нерентабельне, тому теоретичне дослідження цих процесів є оптимальним способом отримання інформації про тепловий і деформований стан заготовки і в процесі кування. Використання програмних продуктів на основі метода скінченних елементів дозволяє виключити витрати, пов'язані з виконанням промислових експериментів [22].

Операція осадки має ряд недоліків, які ставлять під сумнів, в деяких випадках, її застосування: її енергоємність, додаткове підігрівання і зміна ковальського інструменту. При цьому вона призводить до нерівномірного розподілу деформацій в об'ємі заготовки і створює несприятливий напружено-деформований стан в осьовій дефектній зоні зливка. Усе це підвищує собівартість поковок і не сприяє підвищенню їх якості.

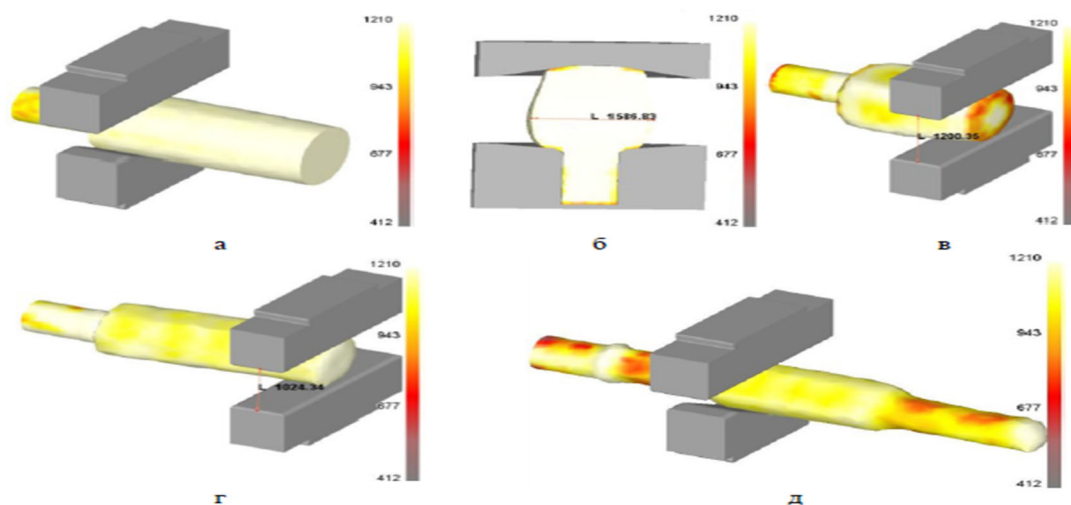
Мета цього експерименту – тестування програми DEFOR-3D на предмет можливості моделювання процесів кування великих поковок із зливків і вдосконалення цих технологічних процесів. Об'єкт дослідження - технологічний процес кування робочого прокатного валка. Предмет дослідження – вплив операції білетировки і осадки на накопичення деформацій в тілі поковки.



**Рисунок 3.9** – Креслення поковки робочого валка прокатного стану

Температурний інтервал кування для розрахунку 1200-800°C, маса поковки 20950 кг. Ескіз поковки представлений на рис. 3.9. Моделювалися і порівнювалися два технологічні процеси кування. За базовою технологією приймався звичайний ковальський зливоч масою 32000 кг, із співвідношенням  $H/D = 2,4$ ; конусність на дві сторони складає 5%, коефіцієнт виходу придатного 65,5%.

Технологічний процес складається з наступних основних операцій: за перший нагрів робиться білетування на діаметр 1170 мм при довжині - 2900 мм (рис. 3.10 а), осадка на 50% (рис. 3.10 б) до діаметру 1650 мм (уков 2), протягання плоскими бойками на квадратний переріз 1200×1200 довжина - 2400 мм (рис. 3.10 в); за другий нагрів протягання на круг діаметром 1010 мм через квадрат і восьмикутник зі зміною бойків на комбіновані довжина - 3700 мм (рис. 3.10 г), після чого підсікалися і відтягувалися донна і прибуткова шийки валка (рис. 3.10 д).



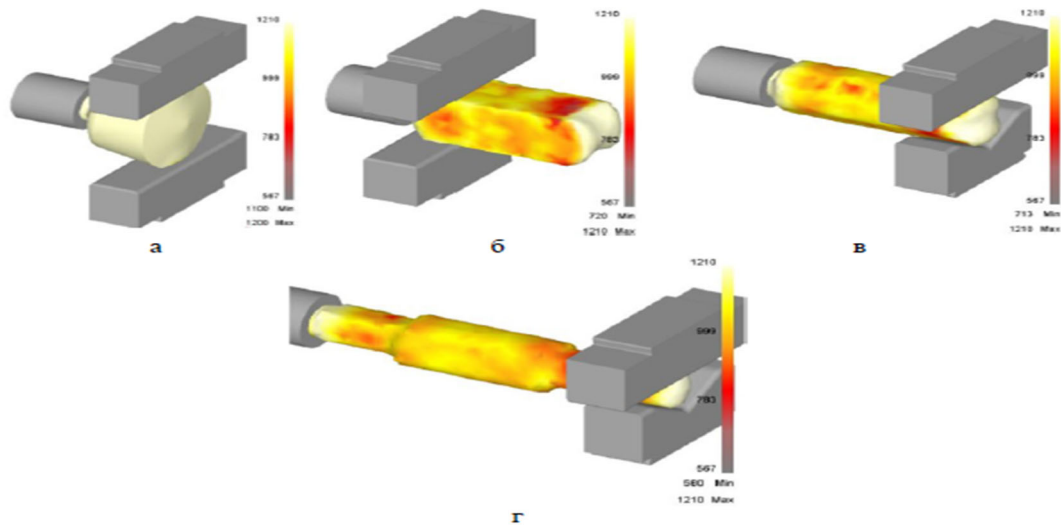
**Рисунок 3.10** – Технологічні переходи кування прокатного валка по базовій технології

Проводилися порівняння результатів моделювання процесу кування зливків з реальною виробничою технологією кування робочого прокатного валка із зливка масою 32 тони. Отримані результати по формозміненню і тепловому стану заготовки в процесі кування відповідає реальним виробничим даним. Розміри заготовки по переходах кування співпадають з реальними даними карт фіксації з точністю 3-5%. Утворення конусної бочки при осіданні (рис. 3.10 б) повністю повторює геометрію зливка масою 32 т після осадки. Отримані в результаті звичайно-елементного моделювання утяжини на переході з бочки валу на шийки були відмічені на реальній поковці. Температура реальних поковок після кування складала – 830°C, середня за результатами чисельного моделювання – 810°C. Тому можна зробити висновок про високу міру достовірності результатів моделювання програмою DEFORM-3D по формозміненню, прогнозуванню поверхневих дефектів форми, отриманню інформації про напружено-деформований і тепловий стан заготовки в процесі кування. Можливості цього звичайно-елементного програмного продукту дозволяють досліджувати і удосконалювати складні технологічні процеси кування зливків без проведення дорогих експериментів [22].

Новий досліджуваний технологічний процес припускає застосування укороченого зливка масою 25000 кг із співвідношенням  $H/D = 0,7$  конусністю на дві сторони 20%, при цьому коефіцієнт виходу придатного 83% (рис. 3.11 а). Новий технологічний процес складається з наступних операцій: нагрів зливка, протягання плоскими бойками на квадратний переріз 1010×1010 (рис. 3.11 б), через восьмигранник переходимо на круг діаметром 1010 мм (рис. 3.11 в) після чого засікали і простягали донну і прибуткову шийки поковки (рис. 3.11 г).

Пропонований технологічний процес виключає застосування таких операцій, як: відтяжка цапфи і білетитування, осадка зливка і пов'язане з цими операціями підігрівання. Усе це знижує трудомісткість і енергоємність

процесу в середньому на 25-35%, підвищується продуктивність процесів кування.



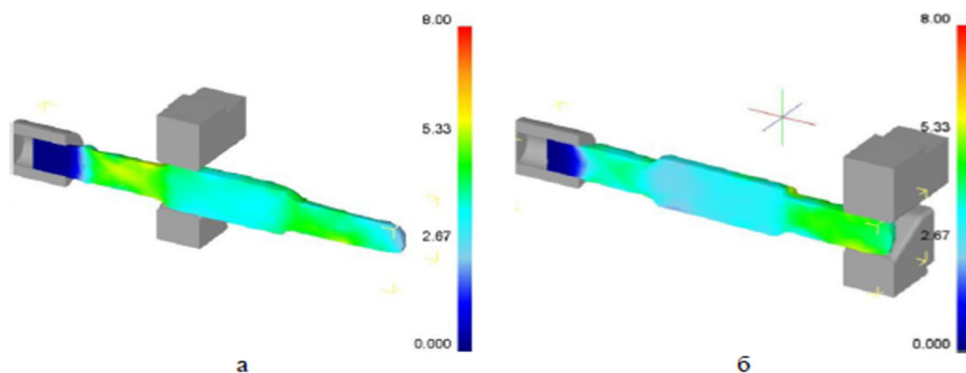
**Рисунок 3.11** – Технологічні переходи кування за новою технологією

Отримані результати показують, що реалізація нового технологічного процесу кування укороченого зливка без опади можлива за один нагрів. Середня температура поковки після закінчення кування не знижується нижче мінімальної межі температурного інтервалу кування (рис. 3.11 г).

Виключення операції опади і заміна її протяганням із застосуванням укороченого зливка може привести до зниження якості поковок, за рахунок зменшення укова і як результат - зниження опрацювання литої структури зливка від меншої міри деформації металу. Тому необхідно провести порівняння двох технологічних процесів кування за базовою і новою технологією на предмет отримання заданого опрацювання структури (якості поковки). Опрацювання структури металу можна оцінити на підставі даних про величину накопиченої міри деформації в тілі поковки на момент закінчення кування (рис. 3.12).

Для нового технологічного процесу величина міри деформації в частині поковки (бочці), що менш проковує, складає  $\sim 2,7$  одиниці (рис. 3.12 б), що відповідає рівню накопиченої деформації базової технології (рис. 3.12 а). Шийки поковки для порівнюваних варіантів отримують велику міру опрацювання в обох випадках, ніж бочка, з величиною деформації приблизно

4,5-5,3 одиниці. Для нового технологічного процесу характерна велика рівномірність розподілу деформацій в об'ємі поковки, чим для базового, що сприятиме набуттю більше рівномірних механічних властивостей, в отриманій поковці. Це дозволяє зробити висновок, що забезпечити накопичення високого рівня міри деформації в тілі поковки можливо без застосування опади, якщо застосовувати укорочені заготовки. Білетировка і осідання не сприяють значному підвищенню накопичення деформацій в поковці, тому вирішальний вплив робить операція протягання на величину і рівномірність розподілу деформацій.



**Рисунок 3.12** – Зіставлення величин інтенсивності розподілу логарифмічних деформацій для базового (а) і нового (б) технологічного процесу кування.

Порівняння отриманих результатів чисельного моделювання з реальними виробничими технологіями показало їх високу збіжність з точністю по формозміненню 3-5%. Результати DEFORM – 3D дозволили промодельовати тепловий і напружено-деформований стан заготовки в процесі кування і удосконалити технологічний процес кування прокатних валків. Моделювання дозволило уточнити норми часу на кування і зменшити кількість нагріву з двох до одного, виключити енергоємну операцію осаду. Таким чином, на даний момент DEFORM – 3D є ефективним програмним продуктом для моделювання процесів кування великих поковок із зливків і може бути рекомендованим для дослідників і технологів, працюючих в області кування великих поковок.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

Будівля цеху розташовується на рівному майданчику без ухилів, з вільними під'їзними шляхами. Будівля відноситься до підприємств металообробної промисловості. Згідно санітарної класифікації СН 245-71 клас цеху V. Санітарно-захисна зона складає 1000 метрів [23]. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища представлений в табл. 4.1.

**Таблиця 4.1** – Аналіз небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

Операції технологічного процесу	Використовуване устаткування	Небезпечні фактори	Шкідливі фактори
Нагрів металу до 1300 °С	Камерна піч	Механічні і електричні ушкодження, Вірогідність вибуху Виникнення пожежі Термічні опіки	Виділення СО і SO <sub>2</sub> Надмірне тепло Q > 84 кДж/м <sup>3</sup> · год. окалина
Транспортування зливків	Мостовий кран U=380 В	Поразки електричним струмом. Механічні травми Опіки	Високий шум > 8 дБА Вібрація Надмірне тепло від поковки, окалина.
	Маніпулятор потужністю 5 і 10МН	Механічні травми при роботі маніпулятора. Поразка електричним струмом Термічні опіки.	Надмірне тепло від переміщеної поковки Окалина.
Кувальні операції	Прес зусиллям 12,5МН	Механічні травми, від металу, що відлітає, можливо отримати при куванні. Займання олій при витоку	Теплове випромінювання Q > 84 кДж/м <sup>3</sup> · год Шум > 85 дБА Вібрація.

Загальна площа прольоту 6924 м<sup>2</sup>, об'єм прольоту при висоті 13 м складає 117700 м<sup>3</sup>.

Площа, що приходить на одного працюючого в найбільш завантажену зміну розраховується по формулі [23]:

$$S_{\text{на 1 чол.}} = \frac{S_{\text{общ.}}}{n} (1 - \eta_s), \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість працюючих чоловік

$\eta_s$  – коефіцієнт заповнення площі цеху устаткуванням ( $\eta_s = 0,6$ )

$$S_{\text{на 1 чол.}} = \frac{6924}{44} (1 - 0,6) = 63 \text{ м}^2/\text{чол.} > 4,5 \text{ м}^2,$$

що відповідає нормам СН 245-71.

Об'єм, що доводиться на одного працюючого в найбільш завантажену зміну, розраховуємо по формулі:

$$V = \frac{V_{\text{общ.}}}{n} (1 - \eta_v), \quad (4.2)$$

де  $\eta_v = 0,3$  – коефіцієнт заповнення об'єму цеху устаткуванням.

$1872,5 \text{ м}^3/\text{чол.} > 15 \text{ м}^3/\text{чол.}$ , що відповідає нормам СН 245-71.

$$V = \frac{117700}{44} (1 - 0,3) = 1872,5 \text{ м}^3/\text{чол.}$$

Відстань між устаткуванням від 3 до 8 метрів, ширина проходів  $1,5 \div 2,5$  м. У цеху обладнані 2 кімнати відпочинку. У відділенні передбачені фонтанчики для пиття і автомати газованої води. Згідно з нормами в цеху встановлено 2 питні джерела. Найбільша відстань до питних установок 75 метрів. Робітники користуються санітарно - побутовими приміщеннями цеху.

## 4.2 Заходи направлені на покращення умов праці на підприємстві

### 4.2.1 Освітлення

Проектом передбачається природне і штучне освітлення робочих місць, відповідне ДБН В.2.5-28:2006. Проектується система змішаного освітлення, що забезпечує хорошу видимість на контрольно-вимірювальних приладах, а також оброблюваних деталей [23].

Природне освітлення - через віконні отвори і аераційний ліхтар. Штучне освітлення – загальне за допомогою ламп ДРЛ в основному виробничому приміщенні і за допомогою ламп накаливання і люмінесцентних в побутових



і допоміжних приміщеннях цеху. Місцеве освітлення здійснюється світильниками з лампами накаливання, встановленими на ковальсько-пресовому устаткуванні. Лампи оснащені освітлювальною арматурою (відбивачами). Проектом передбачається аварійне освітлення, 10% нормативного працюючого освітлення, що забезпечує, і що живиться від незалежного джерела.

У характеристику мікроклімату цеху входять температура, вологість і швидкість руху повітря, теплове випромінювання.

#### **4.2.2 Теплообмін**

Технологічний процес в цеху тісно пов'язаний з виділенням надмірного тепла (більше 84 кДж/м<sup>3</sup> в годину) від працюючих нагрівальних печей, від гарячого металу при посадці і куванні на пресах. Нагрівальні печі є джерелом виділення шкідливих речовин (продуктів згорання CO, SO<sub>2</sub>).

Для підтримки оптимальних метеорологічних параметрів і санітарно-гігієнічної характеристики повітряного середовища проектом передбачається загальнообмінна вентиляція цеху (аерація). З цією метою в зовнішніх стінах будівлі цеху передбачені два ряди припливних аераційних отвори (один ряд на висоті не більше 1,8 метра, інший на висоті чотири метри). Для природного витягу на даху прольоту встановлений аераційний отвір конструкції інституту Діпромез. Для запобігання задуванню холодних мас повітря в цех в зимовий час на воротах встановлені теплові повітряні завіси. На постійних робочих місцях і в місцях відпочинку встановлені кондиціонери і вентилятори.

Для захисту повітряного середовища від продуктів згорання і пилу, що утворюються під час технологічного процесу, проектом передбачена штучна вентиляція з витягом безпосередньо від місць утворення шкідливих виділень (витяжні зони).

Спроектвана система повітрообміну дозволяє підтримувати на робочих місцях метеорологічні і санітарно-гігієнічні параметри повітряного середовища в межах ГОСТ 12.1.005-88.

Оптимальні метеорологічні параметри повітряного середовища для виконання робіт середньої тяжкості II б вказані в табл. 4.2.

**Таблиця 4.2** – Метеорологічні параметри повітряного середовища

<b>Параметри</b>	<b>У теплий період</b>	<b>У холодний період</b>
Допустима температура, °С	20-22	17-19
Оптимальна вологість, %	40-60	40-60
Швидкість руху повітря, м/с	0,4	0,3

### **4.2.3 Захист від механічних травм**

Джерелами механічного травм можуть бути практично усі ділянки технологічного процесу (нагрів, транспортування, кування, обдирання, частини устаткування, що рухаються, транспортування вантажів і так далі).

Для захисту від механічних травм передбачено застосування усіма робітниками засобів індивідуального захисту (каска, окуляри, рукавиці).

Крім того, усім зовнішнім частинам устаткування цеху надається суцільний плавний контур без гострих кутів. Небезпечні зони пресів закривають захисними кожухами, використовують блокування для захисту від механічного травмування, застосовуються захисні екрани і сітки.

Управління пресом централізоване, передбачена автоматична заміна бойків, що дозволяє видалити людей від осередку деформації. Для виконання заходів безпеки при навантажувально-розвантажувальних роботах на кранах використовується звукова і світлова сигналізація. Передбачені проходи і проїзди для безпечного виконання транспортних операцій. Також передбачені пішохідні доріжки і містки.

#### 4.2.4 Захист від надмірного теплового випромінювання

Джерелом надмірного теплового випромінювання в цеху є нагрівальні і термічні печі, нагріті до кувальної температури зливки, поковки і нагрітий інструмент.

Заходами захисту служать:

- дистанційне керування, автоматизація, механізація;
- загальнообмінна вентиляція цеху (аерація) із стислістю повітрообміну не менше 4-5 м<sup>3</sup>/год.;
- теплова ізоляція джерел випромінювання (використання теплоізоляційних матеріалів в кладці печі);
- екранування джерел тепла;
- екранування робочих місць: установка захисних екранів з альфолі, наклеєної на азбест, застосування прозорих екранів з водяним охолодженням;
- поблочне екранування. Конструкція екранів : екрануючі сітки, навіси і козирки. Екрануючий матеріал: мідь, алюміній і сталь. Щоб підвищити поглинаючі властивості екранів, їх покривають зсередини вапном;
- герметизація теплових агрегатів, найбільш щільна підгонка дверей, вікон нагрівальних печей, використання зварних конструкцій печі;
- прокладення силових кабелів проводиться далеко від теплотрас і газових комунікацій ( $l \geq 1$  м). Кабелі 1 раз на три місяці повинні перевірятися. Окрім ізоляції, кабелі повинні прокладатися в металевих трубах або броньованих рукавах;
- недоступне розташування електропроводки : проводка прихована, має огорожу, система кожухів блокується системою живлення;
- від прямих ударів блискавок використовують пристрій поглинаючий блискавки, який сприймає електричний струм і відводить його в землю;

- використання індивідуальних засобів захисту, застосування захисних світловідбивних костюмів і скляних масок.

З метою захисту електропроводки від перевантажень в схемах застосовуємо плавкі запобіжники, розраховані на силу струму, що перевищує номінальну на 25% [23].

Огородження струмоведучих частин електроустаткування досягається його розміщенням в окремій камері, укритій кожухом або сітчастою решіткою.

#### **4.2.5 Захист від шкідливих виділень**

В ході технологічного процесу можливе виділення продуктів згорання (CO, SO<sub>2</sub>), утворення пилу, FeO, витік природного газу в результаті порушення герметичності печей під час аварії або зносу. Ці шкідливі виділення видаляються за допомогою витяжних парасольок, потім, за рахунок високотемпературного допалювання (термічній нейтралізації), яке відбувається в спеціальних камерах з підмішуванням повітря, відбувається реакція:  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ , після чого ця газоповітряна суміш перед викидом в атмосферу піддається абсорбції, в результаті якої з оксидів сірки утворюється сіль, при взаємодії з абсорбентом (кислотою) і вона згодом віддаляється.

Для уловлювання пилу передбачається витяжна система. Очищення здійснюється за допомогою сітчастих фільтрів. Очищене повітря випускається в трубу Н= 50 м.

В якості індивідуальних засобів захисту в особливо запилених місцях використовуються спеціальні захисні костюми, рукавиці, окуляри, респіратори. У можливих місцях скупчення газів використовують протигазу.

#### **4.2.6 Захист від вибухів**

Вибухи в цеху можливі із-за порушення експлуатації устаткування, працюючого під тиском, із-за утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей, із-за аварійної ситуації при експлуатації нагрівальних печей.

Для запобігання вибуху необхідно:

- забезпечити суворе дотримання інструкцій і вимогам техніки безпеки;
- герметизація печі, за рахунок ущільнення дверей печі і застосування зварних конструкцій;
- контроль за газовою атмосферою печі (автоматичний контроль);
- установка противибухових клапанів, які перекривають подання газів при вибухонебезпечній ситуації;
- контроль спалювання палива;
- постійне провітрювання ділянки печі, з кратністю повітрообміну 5 – 6 м<sup>3</sup>/год.;
- для запобігання можливих витоків газу з газопроводів проводять періодичну перевірку герметичності стиків і з'єднань за допомогою газоаналізаторів.

#### **4.2.7 Захист від шуму і вібрацій**

Джерелами шуму і вібрації в цеху є преса, насосно-акумуляторна станція, вентиляція. Загальний рівень шуму перевищує 85 дБА (таблиця 1.1).

Одним з основних методів зменшення рівня шуму є зниження шуму в самих його джерелах - механізмах, вентиляторах.

У механічних пристроях часто причинами неприпустимого шуму є знос підшипників, неточне складання деталей при ремонті. Тому в процесі експлуатації усіх видів машин слід точно виконувати усі вимоги правил технічної експлуатації ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ [22].

Загальні вимоги безпеки передбачають захист від шуму будівельно-акустичними методами. При цьому, для зниження рівня шуму передбачаються наступні заходи:

- розміщення машин і механізмів (електродвигунів) в звукоізоляційних кожухах;
- звукоізоляція пульта управління, використання звукопоглинаючих матеріалів, багатошарових стін і дверей;

застосування глушників аеродинамічного шуму, звукопоглинальних облицювань в газоповітряних трактах вентиляційних систем кондиціонування повітря, використання плавних переходів, гнучких зв'язків у вентиляційній системі.

За рахунок усього цього рівень звукового тиску досягає 60 дБА.

В якості індивідуальних засобів захисту від шуму використовують навушники, вкладиші у вушну раковину, протишумові каски.

Устаткування встановлюється на окремі фундаменти.

У цеху існують спеціальні місця відпочинку для зняття як вібраційного навантаження, так і шумового навантаження.

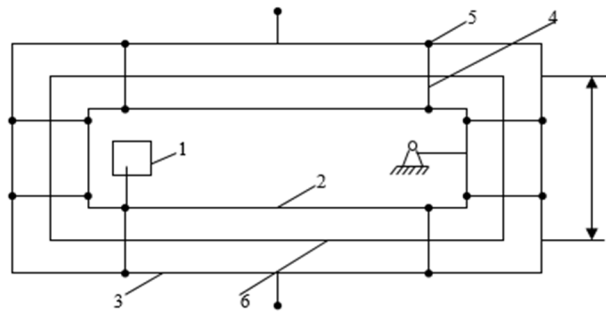
### **4.3 Електробезпека**

При небезпеці поразки електричним струмом цех відноситься до особливо небезпечних приміщень, оскільки в цьому цеху електропровідна підлога і є можливість одночасного дотику до незаземлених конструкцій електроустаткування.

По доступності електроустаткування цей цех відноситься до виробничих приміщень, оскільки доступ до електроустановок має і кваліфікований персонал і виробничі робітники.

Основна робоча напруга - 380 В, переносне електричне устаткування працює від 36 В.

Для запобігання попаданню під дію електричного струму використовується контурне заземлення, для чого в підключеному устаткуванні передбачені спеціальні гвинти заземлення з табличкою "заземлення". Опір заземлення для установок під напругою до 1000 В = 4 Ом – в усіх випадках.



1 – об'єкт, що заземляється; 2 – внутрішній заземлюючий контур; 3 – зовнішній заземлюючий контур; 4 – заземлюючі провідники; 5 – заземлювач; 6 – промислова будівля

**Рисунок 4.1** – Контурна схема захисного заземлення

Опір ізоляції  $R_{\text{ізол}} = 0,5$  мОм при напрузі до 1000 В. Проводку мережі напругою понад 200 В укладають в металеві шланги, а напругою понад 300 В - в сталеві труби.

Заземляються наступні частини електропроводок (рис. 4.1):

- корпуси розподільних щитів;
- механічна огорожа устаткування і небезпечних зон, оболонка кабелів;
- підкранові шляхи;
- металеві елементи будівлі (колони), які можуть виявитися під напругою.

Усі сполучені кабелі укладені в траншеї, які перекриті зверху бетонними плитами.

Захист від дотику до струмоведучих частин електричних установок досягається ізоляцією, недоступним розташуванням струмоведучих частин, використанням дистанційного керування, блокування і попереджувальною сигналізацією.

Захисні засоби мають призначення [23]:

електротехнічні – ізоляцію працюючого від струмоведучих частин, заземлених частин устаткування, землі; огороження небезпечних частин устаткування;

не електротехнічні – захист робітника від опіків, падіння (при роботі на висоті).

В якості індивідуальних засобів захисту від поразки електричним струмом використовуються:

- діелектричні рукавички;
- інструменти з ізольованими ручками;
- діелектричні килимки і боти;
- ізолюючі підставки;
- інструктаж по техніці безпеки первинний і періодичний.

#### **4.4 Пожежна та техногенна безпека**

Пожежній безпеці кувалдно - пресовий цех належить до категорії «Г».

Характеристика речовин, що звертаються до категорії «Г»:

речовини, що не згорають, і матеріали в гарячому, розжареному і розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскри і полум'я;

тверді, рідкі і газоподібні речовини, які спалюються при утилізації в якості палива.

Міра вогнестійкості будівельних конструкцій - II, оскільки допоміжні конструкції виконані з матеріалів, що важко згорають, межа вогнестійкості 0,75 ÷ 1 годину, а основні конструкції - з матеріалів, що не згорають, з межею вогнестійкості – 2 - 2,5 годин.

Пожежа в цеху можлива із-за короткого замикання в електроустаткуванні, при протіканні і займанні масла з систем гідроприводу, витоку газу при аварійній ситуації.

Для захисту пожежі проектом передбачені наступні заходи:



відповідальність за дотримання необхідного протипожежного режиму і своєчасного виконання протипожежних заходів;

використання протипожежних перешкод, до них відносяться протипожежні стіни і перекриття, а також отвори них, в які встановлюють протипожежні завіси. Дія цих перешкод заснована на гасінні полум'я у вузьких каналах, через які воно не може поширюватися;

система автоматичної сигналізації, включає: датчики (сповіщувачі), приймальну станцію з джерелами живлення і лінійну мережу;

спеціальні автоматичні пристрої, які підтримують на заданому рівні параметри процесу, що проводиться, сигналізують про відхилення від нормального ходу виробництва, зупиняють роботу агрегатів при виникненні небезпеки;

паливно-мастильні мастила зберігають в металевих ємностях, далеко від технологічного устаткування в кількостях, що не перевищують добової норми.

В якості вогнегасних речовин в кувально-пресовому цеху використовуються: вуглекислота, пісок, хімічна піна, інертні гази, спеціальні флюси.

Евакуаційні виходи позначені добре видимими знаками, нанесеними фарбою і співпадають вони з пішохідними доріжками і проходами.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу обмежується, і має бути не більше 75 метрів.

Протипожежні пости повинні бути обладнані ящиками з піском, ємностями з водою і пожежно-інвентарним щитом з набором інвентаря (лопати, багрів, крюків, сокир, мішків і так далі).

## 4.5 Економічні аспекти проблеми виробництва

### 4.5.1 Розрахунок капітальних витрат на реконструкцію

Капітальні витрати на реконструкцію визначаються по формулі [24]:

$$K_{рек} = K_{нов} + K_{дем} + K_{ост} + K_{доп.пл.} \quad (4.1)$$

До <sub>новий.</sub> – нові кап. вкладення, грн.

До <sub>дем.</sub> – витрати на демонтаж устаткування, грн.

До <sub>зал.уст.</sub> – залишкова вартість устаткування, грн.

До <sub>доп.пл.</sub> – вартість додаткової площі.

Вартість нового устаткування:

Прес з рухливою рамою і нижнім, що має в розпорядженні циліндрів зусилля 12,5 МН (у комплекті 3 робітників бойка) – 1130000 \$ США  
 $\approx 13305747$  грн.

Система автоматичного управління – 160000 \$ США  $\approx 1884000$  грн.

**Таблиця 4.3** – Витрати і вартість нового устаткування

Капітальні вкладення в новий агрегат, техніку, технологію, устаткування, грн.	13305747
Капітальні вкладення в демонтаж нового устаткування, грн. (12 % від До <sub>новий.</sub> )	1884000

$$До_{рек.} = 13305747 + 1884000 + 0 + 0 = 15189747 \text{ грн.}$$

### 4.5.2 Розрахунок зміни собівартості тони продукції в результаті проведення реконструкції

#### *Відхилення статей собівартості*

При зміні чинників виробництва визначаємо відхилення статей собівартості [21]:

Електроенергія в періоді після реконструкції залежить від потужності встановлених електродвигунів і т. п. І визначається по формулі:

$$\mathcal{E}_л = \frac{Д \times T \times Ц}{B_2}, \quad (4.2)$$

де, Д – додаткова потужність електроустаткування;  
 Т – фактичний час;  
 Ц – ціна за 1 кВт;  
 В<sub>г</sub> – обсяг річного виробництва після реконструкції.

Оскільки потужність нашого устаткування не міняється, то додаткову потужність візьмемо рівною 1.

$$\mathcal{E}_л = 1 \times 7265 \times 0,5 / 8403 = 0,20 \text{ грн. / тону продукції.}$$

Розраховуємо зміну основної заробітної плати по формулі:

$$\Delta Z_{\text{осн.з.}} = \frac{3 \times 11 \times n}{B_2}, \quad (4.3)$$

де, n – чисельність виробничих робітників;  
 З – середньомісячна з/п одного робітника.

$$\Delta Z_{\text{осн.з.}} / 8403 = +41,9 \text{ грн./ тону продукції.}$$

Зміни додаткової заробітної плати

$$\Delta Z_{\text{доп.з.}} = \frac{Z_{\text{осн.з.}} \times \Phi ЗП_{\text{доп.з.}}}{\Phi ЗП_{\text{осн.з.}}}$$

$$\Delta Z_{\text{доп.з.}} = \frac{41,9 \times 197575,5}{4845328,5} = 0,71 \text{ грн./ тону}$$

При реконструкції величина амортизаційних відрахувань на 1 т. поковок в проектному варіанті визначається по формулі:

$$\Delta A = \frac{K_{\text{рек}} \times H_A}{B_{2.\text{рек}}}, \quad (4.4)$$

де K<sub>рек</sub> – капітальні вкладення на реконструкцію;  
 H<sub>A</sub> – норма амортизації;  
 В<sub>г</sub> – обсяг річного виробництва після реконструкції.

$$\Delta A = 41899200 \times 0,18 / 8403 = +315,24 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт і зміст основних засобів визначається за величиною амортизаційних відрахувань, тобто. На якій % змінилися відносно базового варіанту амортизаційні відрахування, на такий же % змінюються і витрати в цій статті.

$$Z_{\text{тек.рем.}} = Z_{\text{тек.Б}} \frac{A_{\text{Б}}}{A_{\text{П}}} = 765,4 \frac{93,3}{571,98} = 24,93$$

### **Витрати на реконструкцію**

Величина витрат по відповідних статтях у разі зміни обсягу виробництва розраховується по формулі [24]:

$$Z_n = Z_o \times \frac{d}{100} \times \left( \frac{B_o}{B_n} - 1 \right) = Z_o \times \frac{d}{100} \times 0,32 ,$$

де  $Z_o$   $Z_n$  – витрати по статті при базовому і проектному обсягах виробництва відповідно;

$d$  – доля умовно-постійних витрат в загальній сумі витрат по статті;

$B_o$  і  $B_n$  – базовий і проектний об'єми виробництва.

$$\Delta \text{Эл} = 0,1 \times 87,5 = - 2,8 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ТЗР} = 0,1 \times 147,2 = - 4,71 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Зосн. з/п} = 0,3 \times 136,16 = - 13,07 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Здоп. з/п} = 0,3 \times 16,33 = - 1,57 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Фонд} = 0,3 \times 58,7 = - 5,64 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{А} = 1 \times 93,3 = - 29,86 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Спец. Облад.} = 0,25 \times 197,3 = - 15,78 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ТР} = 1 \times 765,4 = - 244,92 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ВП} = 0,1 \times 392,3 = - 125,54 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Р-ды на подг. і осв. пр-ва} = 0,1 \times 30,5 = - 9,76 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Тпаливо} = 1 \times 647,3 \times (-0,32) = -207,00 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{Тт} = 1 \times 259,5 = - 83,04 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ППР} = 1 \times 1089,2 = - 348,54 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ОЗР} = 1 \times 45,6 = - 14,59 \text{ грн. /тону.}$$

$$\Delta \text{ЗПР} = 1 \times 23,3 = - 7,46 \text{ грн. /тону.}$$

#### 4.5.3 Техніко-економічні показники

##### *Рентабельність виробництва*

Рентабельність виробництва визначається по формулі:

До реконструкції:

$$\frac{(12994,63 - 10395,7)}{10395,7} \times 100\% = 25\% .$$

Після реконструкції:

$$\frac{(12994,7 - 9999,1)}{9999,1} \times 100\% = 30\% .$$

##### *Річний економічний ефект*

Річний економічний ефект:

$$\mathcal{E}_Г = (C_B - C_{пр}) \times V_{ПР} - E_H \times K_{рек}, \quad (4.5)$$

де  $C_B$  і  $C_{пр}$  – показники собівартості відповідно базового і проектного варіантів;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ( $E_H=0,15$ );

$K_B$  – питомі капітальні вкладення проектного варіанту;

$V_{ПР}$  – річний обсяг виробництва проектного варіанту.

$$\mathcal{E}_Г \times 18162,5 - 0,15 \times 41899200 = 20517070,5 \text{ грн.}$$

##### *Термін окупності капітальних вкладень*

Термін окупності капітальних вкладень в реконструкцію [24]:

$$T_{ок} = \frac{41899200}{(10395,7 - 9936,7) \times 8403} = 5,03 \text{ років}$$

*Порівняння техніко-економічні показники*

**Таблиця 4.4** – Порівняльні техніко-економічні показники

Найменування показників	Од. вим.	До реконстр.	Після реконстр.	Змінення %
1. Річний обсяг виробництва	т/рік	5798	8403	+ 31
2. Питома продуктивність	т/година	1,57	2,5	+ 63
3. Вихід придатного	%	74	74	-
4. Річний фонд фактичного часу	година	3693	7265	+ 51
5. Чисельність робітників	чол.	44	49	+ 10
у тому числі працюючих робітників	чол.	35	40	+ 12
6. Продуктивність праці одного працюючого	т/чол.	131,77	370,66	+ 35
- в т.ч. 1 виробничого робітника	т/чол.	165,40	454,06	+ 36
7. Середньомісячна з/п виробничого працюючого	грн.	4750,2	8240,3	+ 58
10. Собівартість продукції	грн.	10395,7	9936,7	- 4
- витрати по переділу	грн.	3920,8	3526,3	- 11
11. Рентабельність	%	25	31	
12. Капітальні вкладення	млн. грн.	102,5		
13. Річний економічний ефект	млн. грн.	20,5		
14. Термін окупності капітальних вкладень в реконструкцію	років	5,03		

## ВИСНОВКИ

1. У першому розділі був проведений аналіз ковальсько-пресового виробництва інструментальних сталей на ПрАТ «Дніпроспецсталь». Була визначена одна з проблем яка полягає в тому, що обладнання яке знаходиться активно в експлуатації з 60-х років морально та фізично застаріло. В сучасній металообробній галузі особливо гостро стоять завдання енерго-ресурсозберігання і забезпечення конкурентоспроможності продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках. Рішення даних задач нерозривно пов'язане з вдосконаленням технологічних процесів ковальсько-штампувального виробництва, що забезпечують економію металу, підвищення якості виробів машинобудування, збільшення внутрішнього споживання продукції металургійних підприємств. Зроблено висновок про необхідність замінити пресу зусиллям 32 МН на новий швидкоковочний гідравлічний прес зусиллям 12,5 МН виробництва НВО «Дніпропрес», який не вимагає постійного позапланового ремонту, і, отже, при постійній роботі без простоїв, більш ніж в 2 рази збільшить продуктивність цеху.

2. У другому розділі основна увага була направлена на здійснення порівняльного аналізу формул для розрахунку середнього контактного тиску при деформуванні в залежності від геометричних характеристик зразка, що осаджується.

В процесі аналізу було розглянуто шість різних варіантів формул для розрахунку середнього контактного тиску та виконано аналіз розрахункових формул залежності від коефіцієнту напруженого стану металу в осередку деформації  $K\sigma$  та відношення  $a/h$ . Отримані графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення  $a/h$  коефіцієнту напруженого стану,  $k\sigma$  також збільшується, що пояснюється збільшенням площі контактної поверхні і сил тертя.

При порівнянні кривих (рис. 2.21) з кривими Є. П. Унксова (рис. 2.22) бачимо, що відношення  $p/k\sigma$  на діаграмах приблизно на 15% більше, ніж по діаграмі Є. П. Унксова. Це пояснюється тим, що у виведенні максимальне контактне дотичне напруження узятє по Мізесу  $\tau_s = 0,58 \sigma_T$ , а у Е. П. Унксова  $\tau_s = 0,5 \sigma_T$ . При  $\mu = 0,5$  і  $D/H < 12$  значень  $p/\sigma_T$  за нашими даними (рис. 2.21 і 2.23), менше, ніж за даними Є. П. Унксова. Це пояснюється тим, що нами враховані нерівномірність деформації і загальмованість контактного ковзання металу в процесі осадки. У разі нерівномірної деформації витрачається менше енергії, ніж при деформації без діжкоутворення і гальмування контактного ковзання.

З розрахунку технології ковки прокатних валків можна побачити, що самим трудомістким і енергоємним є процес осадки, який потрібний для деформації мікроструктури металу.

Перетин поковки не дозволяє зробити процес протягання традиційними методами, тому ми використовуємо в новій технології спеціальний інструмент – схрещені бойки. Випробування показали, що при застосуванні схрещених бойків лита структура стає деформованою при коефіцієнті укова  $1,4 \div 1,5$ , у такому разі ми можемо не проводити процес осадки. Тому у своїй технології ми використовуємо схрещені бойки (рис. 2.24).

Результати випробувань механічних властивостей металу в тангенціальному напрямі показали підвищення межі пропорціональності до 126 - 129 МН (при нормі 120 МН). Таким чином перерозподіл анізотропії металу, досягнутий регулюванням мікротечії металу, забезпечив підвищені механічні характеристики металу, що відповідають умовам експлуатації виробів.

Позитивний вплив додаткових мікрозсувів при куванні у схрещених бойках (рис. 2.24) можна використати у виробництві, маючи в розпорядженні наступні дані:

- встановленим зв'язком нормальних і мікрозсуваючих деформацій;
- наявність експериментальних залежностей мікрозсуваючих деформацій при куванні новим інструментом, кількісною оцінкою



ефективності додаткових макрозрушень залежно від параметрів технологічного режиму кування.

3. У **третьому розділі** виконано моделювання процесу осадки циліндричних зразків зі сталі 9Х5МФ в САПР DEFORM 3D. Були отримані дані про характер нерівномірності деформації у вигляді профілів заготовок і показника діжоутворення. Визначена збіжність отриманих даних по формозміненню осаджених заготовок і за показником діжоутворення з даними, приведеними в літературі.

4. У **четвертому розділі** виконано аналіз шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища, проведений розрахунок системи захисного заземлення для поліпшення умов праці на підприємстві.

5. У **четвертому розділі** після проведеного розрахунку в економічній частині було проведено порівняння техніко-економічних показників, яке в свою чергу показало, що при модернізації виробництва термін окупності капітальних вкладень складе 5 років. При цьому річний економічний ефект становив 20,5 мільйонів гривень.

**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. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головка С. М. Теорія процесів обробки металів тиском : підручник. Дніпропетровськ : «Пороги», 2008. 370 с.
4. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
5. Серeda Б. П. Обробка металів тиском : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 343 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. Ніколаєв В. О. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 112 с.

12. 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.

13. Ніколаєв В. О. Теорія прокатки штаб : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 259 с.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Серета 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.

20. 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.

21. 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).

22. 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\\_IMTСК\\_2023.pdf](https://fotius.cdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/Book_IMTСК_2023.pdf). (Дата звернення: 15.09.2023).

23. Румянцев В. Р., Кутузова І. О. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань : навч. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 132 с.

24. Проскурович О. В., Бойчук В. А. Комп'ютерні технології економічного аналізу : навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2012. 310 с.

25. 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).

26. 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).

**ДОДАТОК А****Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Запорізький національний університет**  
**Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні**



**III ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**17-20 жовтня 2023 року**



УДК 621.16.1

Проценко В.М., к.т.н., доц., Кармазін М.О., магістрант 2-го курсу,  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Проценко В.М.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ РЕЖИМІВ ВІЛЬНОЇ КОВКИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізького національного університету,  
кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

У зв'язку з безперервним підвищенням вимог до якості інструменту для обробки деталей із сталі та сплавів на машинобудівних підприємствах, перед металургійною промисловістю поставлена актуальна задача виробництва металопродукції з поліпшеними структурою та властивостями. Якість інструменту повинна забезпечувати максимальну продуктивність обробки.

Метою магістерської роботи є вдосконалення технологічного процесу вільної ковки шляхом дослідження енергосилового режиму ковки, комп'ютерного моделювання процесу, порівняльного аналізу розрахункових формул, вибору високоефективного обладнання.

При куванні деформування заготовки здійснюється за допомогою універсального підкладного інструменту, або бойків.

Виконано дослідження процесу осадки циліндричних заготовок плоскими бойками з осьовим отвором. По експериментальним даним встановлено вплив на затікання матеріалу зразка в отвори бойків ступені обтиску і співвідношення «діаметр отвору/ діаметр зразка». Побудовано поля (топограми, ізолінії) місцевих деформацій для трьох співвідношень «діаметр отвору/ діаметр зразка» і трьох ступенів обтиску, що дозволило отримати данні про знаходження нейтральних поверхонь, а також про розподіл ділянок найбільших місцевих деформацій потоншення і потовщення в залежності від геометричних співвідношень зразків і інструмента та ступеню обтиску.

Виконано розрахунок енергосилових параметрів (зусилля деформування і продуктивності пресу) і вибір основного обладнання вільної ковки інструментальної сталі. Виконано розрахунок на міцність станини кувального пресу та робочих циліндрів.

Отримані в роботі експериментальні дані можуть бути застосовані як при подальших теоретичних дослідженнях, так і для використання у промисловості.

### Список використаних джерел

1. 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.*