МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
___Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки__

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему **_Розробка методу кількісного опису технологічного процесу кування–протягування порожньої круглої заготовки**

Виконав: студент __II_ курсу, групи 8.1364-омт

Г.І. Таранов _____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності _____136 Металургія_____
(код і назва спеціальності)

освітньо-професійна програма
___Обробка металів тиском__
(код і назва освітньої програми)

Керівник

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

Рецензент
проф. каф. МТЕТБ, проф., д.т.н. С.М. Григор’єв

Запоріжжя – 2025 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. Бєлоконь

“_05_” ___09_____2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____Таранову Геннадію Ігоровичу_____
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) ***Розробка методу кількісного опису технологічного процесу кування–протягування порожньої круглої заготовки_____***

керівник роботи (проєкту)__Проценко Віктор Максимович, к.т.н., с.н.с.____,
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “27” 02 25 р. № 319-с

2. Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2025 року_____

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

4. Зміст кваліфікаційна робота магістра (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина. Механічна частина. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки.

Мета кваліфікаційної роботи – оптимізація технологічного процесу кування-протягування круглої порожнистої заготовки шляхом математичного

моделювання цього процесу з урахуванням зміцнення, розширення і без розширення.

Надати характеристику і призначення процесу кування-протягування круглої порожнистої заготовки; навести схеми процесу; дослідити фактори, що впливають на характер формозміни заготовки і схеми течії матеріалу заготовки; оцінювати напружено-деформований стан металу в осередку деформації за допомогою методу ліній ковзання враховуючи деформаційне зміцнення металу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Схеми до розрахунку контактної площадки з оправкою, схема до вибору функції переміщення, схеми осередків деформації та ліній розділу при протягуванні на оправці, епюри нормальних дотичних напружень тощо.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання __05.09.2025 року.__

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, розділ 1.	08.09.25 – 30.09.25	
2.	Розділи 2 - 3	01.10.25 – 30.10.25	
3.	Охорона праці (розділ 4), висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	01.11.25 – 30.11.25	

Студент _____ **Таранов Г.І.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи **Проценко В.М.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер _____ **Бєлоконь Ю.О.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Кваліфікаційна робота магістра містить: _85_ с., _19_ рис., _13_ табл.; використано літературних джерела _15_.

КРУГЛА ПОРОЖНИСТА ЗАГОТОВКА, НАПРУЖЕННЯ, КУВАННЯ-ПРОТЯГУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕЖА МІЦНОСТІ МЕТАЛУ, ЕПЮРИ, ДЕФОРМАЦІЯ.

Об'єкт дослідження – процес кування–протягування круглої порожньої заготовки.

Метою магістерської роботи є оптимізація технологічного процесу кування-протягування круглої порожнистої заготовки шляхом математичного моделювання цього процесу з урахуванням зміцнення, розширення і без розширення.

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків у програмних комплексах Mathcad Prime 11, Excel. Аналітичні розрахунки на основі математичних моделей і комп’ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical.Отримані результати і їх новизна – при стисненні круглої порожнистої заготовки плоскими, ромбічними або комбінованими бойками в металі можуть виникати розтягуючі напруження. Якщо рівень розтягуючих напружень перевищить межу міцності металу, то утворюється тріщина. Величину напружень, що виникають в об’ємі поковки, можна регулювати, змінюючи геометричні розміри осередку деформації.

Для фактичних умов кування, при діаметрі заготовки D = 300 мм і діаметрі оправки d = 120 мм, зі сталі 20 при температурі 900ºС оптимальними технологічними параметрами кування, при яких напружений стан металу найбільш сприятливий, є: відносна подача 0,9 – 1,2; одиничне стиснення 3,5-10 %. Отримані результати рекомендуються для впровадження у ковальсько-пресовому цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь» для оптимізації технологічного процесу кування-протягування круглої порожнистої заготовки шляхом математичного моделювання цього процесу з урахуванням зміцнення, розширення і без розширення.

ЗМІСТ

ВСТУП …….. 7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ ОПЕРАЦІЙ КУВАННЯ – ПРОТЯГУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ ЗАГОТОВКИ ..……..... 8
1.1 Характеристика операції кування – протягування …..…… 8
1.2 Характеристика протяжки на оправці ……..… 13
1.3 Бойки для протяжки …….. 17
1.3.1 Розподіл напружень в осередку деформації при куванні плоскими бойками порожнистих заготовок …….……..….. 22
1.3.2 Кування–протягування комбінованими бойками …… 30
2 МЕТОДИ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОЇ ЗАГОТОВКИ …….. 32
2.1 Інженерні методи оцінки напружено-деформованого стану …. 32
2.2 Метод ліній ковзання ……..…….. 33
2.2.1 Внутрішні геометричні властивості ліній ковзання …….. 38
2.2.2 Перетини лініями ковзання меж тіла …….. 40
2.2.3 Відображення особливостей напруженого стану сіткою ліній ковзання …….. 40
2.2.4 Чисельний метод розрахунку ліній ковзання (друга крайова задача) …….. 41
2.2.5 Рівнокутна сітка ліній ковзання …….. 43
3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА …….…….. 44
3.1 Вплив зміцнення металу на напружено-деформований стан при куванні–протягуванні круглої порожнистої заготовки ……..….. 44
3.2 Оцінка поля ліній ковзання при куванні–протягуванні круглої порожнистої заготовки …….. 51
3.3 Розрахунок напружень при куванні–протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням розширення і без розширення 55
3.3.1 Основи математичної моделі розрахунку напружень і деформацій …….. 55
3.3.2 Розрахунок напружень у осередку деформацій ……..….. 57
3.4 Алгоритм розрахунку напружень при куванні–протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням зміцнення ……..….. 61

3.5 Оптимізація технологічних параметрів при куванні–протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням зміцнення ……..…….. 63
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННІ БЕЗПЕКА ……..…….. 68
4.1 Загальні заходи безпеки праці при виконанні дослідницької роботи ……... 68
4.2 Характеристика пожежної небезпеки …….. 74
4.3 Вимоги охорони праці при роботі в лабораторії обчислювальної техніки ……..…….. 75
4.4 Розрахунок заземлення ……..…… 77
ВИСНОВКИ ……. 79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ……...…… 81
ДОДАТОК 1 Тези доповіді на конференції «Молода наука – 2025»… 83

ВСТУП

В даний час не існує досить точного експериментального методу оцінки напружено-деформованого стану металу без руйнування об'єкта. До того ж експериментальні методи проводяться в особливих умовах і спроби перенести отримані дані на реальні процеси вносять з собою велику похибку. У цьому плані вигідніше використовувати математичні методи.

Застосування математичного моделювання технологічних процесів дозволяє визначати напружено-деформований стан металу в різних умовах без руйнування об'єкта моделювання і вирішувати при цьому широке коло завдань (в тому числі з оптимізації технології). При цьому точність результатів буде залежати від точності припущень при постановці задачі.

При обтисканні круглої порожнистої заготовки плоскими, ромбічними або комбінованими бойками в металі можуть виникати напруги, що розтягують. Якщо рівень розтягуючих напруг перевищить межу міцності металу, то утворюються тріщини. Величину напруги, що виникає в об’ємі поковки, можна регулювати, змінюючи геометричні розміри осередку деформації.

При малих деформаціях зі зростанням значення відносної подачі в осьовий зоні утворюються тільки стискаючі напруги. При деформаціях у межах від 15% до 20% вплив подачі на зміну розподілу напруги в поперечному перерізі поковки не суттєвий.

У даній роботі описується створення методу досить точного кількісного опису технологічного процесу кування-протягування круглої порожнистої заготовки з урахуванням розширення, без розширення і з урахуванням зміцнення, математичне моделювання цього процесу і, в кінцевому підсумку, його оптимізація. Процес відноситься до ресурсозберігаючих та високоефективних за деформаційним впливом на структуру металу, що обумовлює актуальність даної роботи.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ ОПЕРАЦІЙ КУВАННЯ – ПРОТЯГУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ ЗАГОТОВКИ

1.1. Характеристика операції кування – протягування

У найпростішому уявленні кування є процесом металообробки тиском з використанням універсальних інструментів та обладнання зворотно-поступальної періодичної дії. Кування – складний процес, оскільки зазвичай складається з низки послідовно чергуються самостійних операцій, в загальному випадку супроводжуються поздовжніми переміщеннями і поворотами заготовки навколо осі. Різноманітні і численні операції кування дозволяють отримувати поковки простих різних і складних форм, номенклатура яких обчислюється десятками тисяч найменувань.

Технологія кування має ряд значних переваг, завдяки яким цей процес протягом багатьох століть залишається в числі передових. Безперервний розвиток процесів кування забезпечує їм надійне місце серед інших видів металообробки. Головна перевага кування полягає в неперевершеній і єдиній можливості обробляти тиском великі злитки сталі, маса яких обчислюється десятками і сотнями тон. Не менш важливою перевагою кування є можливість не тільки надавати поковці задану форму і поліпшувати структуру та механічні властивості оброблюваного металу, але й виправляти (повністю або значною мірою) дефекти литого металу. Це особливо важливо для великих злитків, які відрізняються великою кількістю бульбашок, плівок та інших несуцільностей, а також підвищеною зональною ліквідацією.

До числа найважливіших переваг кування відноситься підвищена турбулентність деформації, яка забезпечує руйнування литої (дендритної) структури при стисканнях, в кілька разів менших, ніж при прокатці, пресуванні та інших процесах, що відрізняються ламінарним характером деформації.

Тільки куванням виготовляють великі поковки для роторів і дисків турбін, котлів високого тиску, гарматних стволів, колон гідравлічних пресів, валків блюмінгів та інші великогабаритні, важкі поковки відповідального призначення, деталі з яких працюють при динамічному знакозмінному і т. п. складному навантаженні.

В якості універсальних машин-знарядь для кування застосовують преси і молоти. На пресах кують переважно великі злитки, а на молотах дрібні злитки і катані профілі (болванки і прутки). Ковані поковки відрізняються високою якістю металу, але мають тільки наближену до деталей форму при відносно низькому коефіцієнті використання металу, і невисокою в порівнянні зі штампуванням продуктивністю праці.

Удосконалення процесів кування ґрунтується на використанні більш швидкохідного обладнання, застосуванні механізмів, що полегшують і прискорюють допоміжні операції (маніпуляторів, кантувачів, поворотних столів тощо), а також на розробці конструкцій більш досконалого ковальського інструменту і точному регулюванні величини стиснення заготовок. Зазначені удосконалення дозволяють збільшити продуктивність, знизити собівартість поковок, підвищити їх точність і полегшити працю ковалів.

Процес кування складається з декількох етапів: нагрівання металу; виконання ковальських операцій (як правило, на одному пресі або молоті); первинної термічної обробки поковки (відпал, нормалізація тощо); контролю якості поковок.

Для поковок простої форми кількість ковальських операцій невелика, і процес кування здійснюється після одного нагрівання заготовки (за один винос з печі). Більш складні поковки вимагають збільшеної кількості операцій, серед яких однойменні можуть повторюватися два і більше разів. У випадках багатоопераційного кування напівфабрикат поковки надходить в піч на підігрів (один або більше разів, залежно від складності поковки), і таким чином кують при декількох виносах металу з печі [1].

Основними операціями кування є осадка, протяжка, прошивка, видавлювання.

Операція протяжки найбільш поширена і призначена для збільшення довжини заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу. Якщо осадка здійснена за одне стискання при повному перекритті заготовки, то для протягування необхідні послідовні стискання суміжних ділянок заготовки, причому з одного або двох боків стискаємої ділянки заготовки знаходяться не стискаємі ділянки (зовнішні ділянки заготовки). Значна тривалість кування пояснюється в значній мірі численністю обтиснень, необхідних при протягуванні. На підставі цього іноді неправильно розглядають весь процес кування як технологічно недосконалий.

Однак не можна забувати, що саме періодичність обтисків, наявність великої кількості стиків обтиснутих ділянок, а також дуже сприятливі умови для зсувної деформації забезпечують куванню високу турбулентність деформації, що сприяє швидкому і різноспрямованому руйнуванню дендритів, що супроводжується інтенсивним підвищенням механічних властивостей металу. Якщо при пресуванні і прокатці необхідні для цієї мети коефіцієнти деформації, рівні відповідно 7-10, то для протягування вуглецевої сталі достатній коефіцієнт кування 1,5-2,0 і тільки для легованої сталі він повинен дорівнювати 3-4.

Розрахунки зміни форми при протягуванні значно спрощуються при використанні середньої (приведеної) величини розширення. В основу розрахунку протягування покладено принцип підсумовування головних деформацій. Протягування — це операція, що складається з багатьох обтиснень, причому одиничні обтиснення по суті являють собою поперечну осадку при наявності зовнішніх по відношенню до осередку деформації частин заготовки. Таким чином, головною найбільшою деформацією кожного одиничного стиснення є висотна деформація, яка більша за будь-яку з двох інших головних деформацій: у напрямку протягування і напрямку розширення. Однак суміжне розташування обтиснень при подачах уздовж

одного напрямку протягування призводить до підсумовування тільки деформацій уздовж осі заготовки, так що деформація уздовж осі заготовки у багато разів перевищує деформацію уздовж двох інших осей.

$$L_k - L_o = \Delta L = \sum_n \Delta L_a = n\Delta L_a, \qquad (1.1.)$$

де n – число обтиснень; ΔL_a - збільшення довжини заготовки за одно обтиснення.

Додатково збільшити довжину заготовки, що протягується можна обтисками з кантовкою, після якої знаки деформації по ширині і висоті змінюються відносно попередніх на зворотні, тоді як знак величини ΔL_a не змінюється і деформація продовжує підсумовуватися, збільшуючи загальну довжину заготовки. Кількісне обмеження протягування обумовлюється небезпекою втрати стійкості заготовки при черговому стисненні після кожного кантування. Тому необхідно, щоб відношення колишньої ширини (тепер розміру заготовки по висоті) до колишньої висоти (тепер до ширини) було в межах

$$\eta = \frac{B_o + \Delta B}{H_o - \Delta H} \le 2{,}5; \qquad (1.2.)$$

Величина η називається коефіцієнтом переходу. Коефіцієнтом переходу до $\eta = 3{,}0 \div 3{,}2$ можна збільшити, якщо спочатку протягувати на частинах бойків, що мають великий кут вирізу (наприклад, 160˚). Після кантування овальна в перерізі заготовка має підвищену стійкість. Крім збільшення продуктивності цей прийом дозволяє домогтися кращого опрацювання металу, більш раннього роздроблення карбідів литої структури, закриття і заварювання порожнин злитка.

Важливим є також вибір величини подачі при протягуванні. Для збільшення продуктивності величину подачі слід було б приймати максимально можливою, при цьому слід виходити з того, що при стисненні

метал не повинен витікати за межі ширини бойка $L_a \le b$. Однак із збільшенням подачі зростає розширення, яке обмежує протягування.

Протягування з невеликими подачами призводить до збільшення кількості обтиснень, що збільшує тривалість протягування, і до зниження продуктивності. Зазвичай прагнуть встановити таку величину подачі, при якій протягування здійснюється в найменший час.

На практиці величину відносної подачі найчастіше приймають в межах 0,4 - 0,7. При багатоперехідній протяжці найменша кількість обтиснень і переходів і підвищена продуктивність відповідають великим подачам. Протягування з невеликими подачами призводить до збільшення кількості стискань, що збільшує тривалість протягування, і до зниження продуктивності. Зазвичай прагнуть встановити таку величину подачі, при якій протягування здійснюється в найменший час.

На практиці величину відносної подачі найчастіше приймають в межах 0,4-0,7. При багатоперехідному протягуванні найменша кількість стиснень і переходів та підвищена продуктивність відповідають великим подачам, але при цьому поверхня заготовки виходить нерівною. Для прискорення протягування (особливо на початку процесу) величину подачі можна приймати рівною $a_o = (1{,}2 \div 1{,}8)B_o$.

При цьому слід мати на увазі, що протяжка з великими подачами збільшує нерівномірність деформації і витрачувану енергію. Крім того, при збільшенні подачі і збереженні тих же величин обтисків зусилля преса або енергія молота повинні бути збільшені. Протягування з великими подачами супроводжується значним розширенням, але призводить до зменшення коефіцієнта кування, необхідного для досягнення високих механічних властивостей при куванні литого металу.

Для зменшення загального коефіцієнта кування з метою отримання високих механічних властивостей при куванні литого металу можна протягувати на непарних проходах (без кантування) з великими подачами

(a_o/B_o= 1,2÷1,8), а на чотирьох проходах — зі звичайними подачами (a_o/B_o = 0,4 ÷ 0,7).

Оскільки від величини подачі залежать продуктивність праці, мінімальний коефіцієнт уковки, якість прокованого металу і витрата енергії (економічність процесу), то в основу оптимізації процесу протягування може бути покладено будь-який з перерахованих критеріїв в залежності від постановки завдання.

Допустиму величину стиснення визначають виходячи з пластичних властивостей деформованого металу. Якщо метал витримує дуже великі деформації, то критерієм служить коефіцієнт переходу, який враховує втрату стійкості при стисненні неприпустимо високої заготовки і для плоских бойків відповідає величині відношення висоти заготовки (після кантування) до її ширини [1].

1.2. Характеристика протяжки на оправці

Протягуванню заготовки в довжину на круглоконічній оправці піддають попередньо прошиті круглі заготовки. Якщо при розкочуванні збільшують діаметр порожнистої заготовки, то при протягуванні на оправці збільшують довжину такої заготовки. Порожнисту заготовку, надіту на оправку впритул до її бурту, кують з кантуванням по колу і поздовжніми подачами. Кування починають з боку більш товстого кінця оправки кільцевими ділянками при обертальному русі заготовки разом з оправкою. Потім слідує поздовжня подача і обробляється наступна ділянка аналогічно попередній. Відомі й інші варіанти протягування. Цю операцію застосовують для виготовлення порожнистих деталей великої довжини — котельних барабанів, порожнистих колон, гарматних стволів тощо. У процесі протягування (рис. 1.1) заготовка значно подовжується і зменшується по зовнішньому діаметру $D_н$, тоді як внутрішній діаметр $D_{вн}$

заготовки залишається практично рівним вихідному (після прошивки) або трохи зменшується (до розміру оправки).

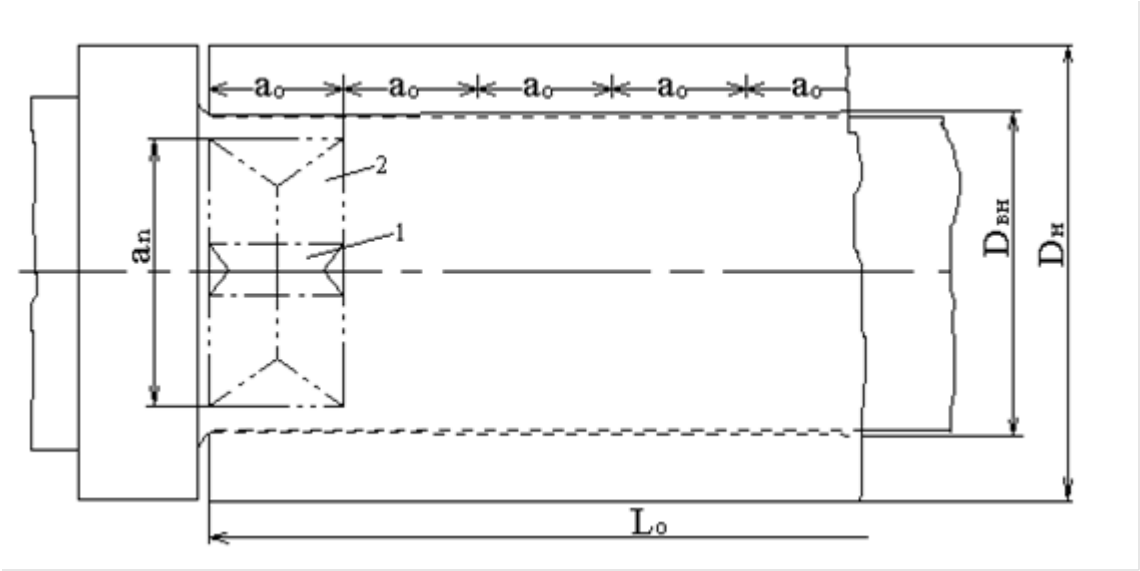


Рисунок 1.1 – Схема осередків деформації та ліній розділу при протягуванні на оправці плоским верхнім бойком при малому (1) і великому (2) стисканнях

Оправки суцільні або мають отвори для охолодження водою, упорний бурт і невеликий ухил (1:100) для полегшення видалення поковки. При протягуванні на оправці використовують вирізні, комбіновані і рідше — плоскі бойки. При протягуванні на оправці відповідно до типу бойків виникає одночасно чотири, три або два осередки деформації, що відрізняє цю операцію від інших. Відповідно до двох і більше осередків деформації при витягуванні на оправці є мінімум дві пари контактних поверхонь, між якими метал піддається стисненню: під верхнім бойком і оправкою, над нижнім бойком і оправкою. Для переважного подовження заготовки L_o (тобто колишньої висоти заготовки при прошивці) без збільшення її діаметра необхідне збіг напрямку найменшого опору течії металу з віссю прошитої заготовки.

Цього досягають, застосовуючи вузькі бойки і встановлюючи їх великою стороною перпендикулярно осі заготовки. Однак у початковий

момент стиснення утворюється несприятлива форма осередку деформації 1 у плані (позначена штриховими пунктирними лініями), що сприяє збільшенню діаметра заготовки. При збільшенні стиснення виходить необхідна контактна прямокутна площадка 2, велика сторона якої перпендикулярна осі заготовки (позначена штриховими лініями з двома крапками). Тому дуже малими стисненнями протягувати на оправці не можна, так як замість протяжки можна отримати розкатку. Значні стискання, що забезпечують велику величину поперечної подачі ап і відносно невеликі осьові подачі a_o, сприяють швидкому протягуванню. Розрахунок цієї операції спрощується завдяки фіксованому розміру внутрішнього діаметра $D_{вн}$ — діаметра поковки. При даному обсязі заготовки достатньо контролювати тільки один розмір поковки (зовнішній діаметр або довжину), при цьому інші розміри витримуються автоматично.

В кінці протягування поковка може виявитися посадженою на оправку. Ослабити посадку можна невеликими стисканнями при великій осьовій подачі, тобто створюючи форму осередку деформації, що сприяє збільшенню діаметра. На практиці використовують і інші прийоми. Наприклад, підігрівають поковку разом з оправкою, а потім пропускають через її осьовий отвір велику кількість води для охолодження, що викликає зменшення діаметра оправки і полегшує зняття з неї поковки.

На пресах з рухомим столом для зняття поковок можна використовувати бурт на оправці і який-небудь виступ на поковці; між ними розміщують бойки (по обидва боки оправки) і рухом столу преса долають сили тертя, що утримують поковку на оправці. Оскільки оправка має ухил, достатньо зрушити поковку з місця посадки, як сили тертя будуть подолані. Для зменшення сил тертя оправки повинні бути без забоїн, ретельно оброблені і покриті термостійким мастилом.

Порожнисті вироби (труби, що працюють під високим тиском, бурильні труби, ніпелі тощо) отримують або гарячим, або холодним куванням.

При гарячому куванні з суцільної вихідної заготовки отримують суцільну поковку з подовженою віссю [5], яку в подальшому піддають глибокому свердлінню. За іншим варіантом технологічного процесу для кування використовують вихідну порожнисту заготовку, отриману прокаткою, пресуванням або свердлінням. Порожнисту заготовку кують з оправкою [6] або без оправки в осьовій порожнині, отримуючи порожнистий виріб. При такому варіанті технологічного процесу переваги прокатного обладнання, що відрізняється високою продуктивністю, використовуються не в повній мірі через малі партії виробів ковальського виробництва. Крім того, прокатне обладнання має порівняно вузький інтервал типорозмірів виробів. Продуктивність верстатного обладнання для свердління отвору в вихідній заготовці значно нижча за продуктивність кувального обладнання, що призводить до необхідності мати численний парк дорогих верстатів, значні виробничі площі, утримувати висококваліфікований персонал верстатників і витрачати додаткові кошти на ріжучий інструмент. Крім того, операція свердління призводить до значних втрат металу в стружку. Вартість вихідної заготовки значно підвищується, з'являється залежність від суміжного виробництва, розташованого поза ковальським цехом, де встановлена радіально-обтискна машина (РОМ).

Можливості РОМ значно розширилися з розробкою технології виготовлення з суцільної заготовки порожнистої поковки. Процес протікає в кілька стадій: розкриття, потім розкриття осьової порожнини, а потім, при необхідності, її редукування або експонування. За такою технологією радіального кування можна отримувати порожнину діаметром 0,45 від зовнішнього діаметра поковки (при незмінному діаметрі суцільної вихідної заготовки, тобто кувати «без укова»).

Отриману порожнисту поковку можна використовувати як порожнисту заготовку і кувати далі без оправки. Різниця в товщині готових

поковок менша, ніж різниця в товщині аналогічних виробів, отриманих прокаткою.

Крім зазначених позитивних якостей радіального кування суцільних заготовок для отримання порожнистих поковок, вдається економити до 60 – 80% металу, що втрачається стружкою, за рахунок виключення з технологічного процесу трудомістких операцій глибокого свердління поковок з подовженою віссю. Підвищення продуктивності при виготовленні порожнистого виробу радіальним куванням в порівнянні з механічною обробкою (глибоким свердлінням) супроводжується високоякісною деформаційною обробкою металу по всій товщині стінки порожнистого виробу. В результаті значно підвищуються механічні властивості виробу. Наприклад, пластичні характеристики металу в поперечному напрямку приблизно однакові з пластичними характеристиками металу в поздовжньому напрямку, чого не вдається досягти при використанні традиційних технологій (свердління відкованих суцільних поковок, кування на оправці попередньо просвердлених заготовок).

1.3. Бойки для протяжки

Для протягування застосовують наступні варіанти бойків:

- плоскі для протягування на квадрат і смугу); верхній плоский, нижній вирізний, обидва вирізні (для протягування на коло) і обидва опуклі (для попереднього протягування);
- плоскі бойки є найбільш універсальними, оскільки дозволяють кувати заготовки будь-яких діаметрів з широким діапазоном ступеня стиснення. Вони дозволяють використовувати підкладний інструмент при здійсненні попередніх, допоміжних і оздоблювальних ковальських операцій. Однак при куванні плоскими бойками виникають ряд труднощів:

- при куванні круглої порожнистої заготовки з малими стисканнями в осьовій зоні поковки виникають розтягуючі напруження, що сприяють появі розривів і несуцільностей [2, 3];

- при куванні з відносними подачами 1,0-1,8 розвинене розширення металу, що становить 27-50%, що істотно зменшує продуктивність процесу [1].

При необхідності відкувати заготовку круглого перетину використовують вирізні бойки. При куванні у вирізних бойках в осередку деформації реалізується схема напружень стиснення. Цей інструмент забезпечує переважне витіснення зміщеного обсягу металу в осьовому напрямку. При цьому в результаті інтенсивного односпрямованого течії металу в заготовці інтенсивно формується волокниста структура, орієнтована уздовж її поздовжньої осі. Але і ці бойки мають особливості, що обмежують сферу їх використання:

- недостатня універсальність, після моменту зміщення неробочих поверхонь бойків подальше кування на менший діаметр стає неможливим без зміни інструменту;

- практично виключена можливість застосування підкладного інструменту, що унеможливлює здійснення таких операцій, як рубка, розмітка тощо.

Проте, вирізні бойки доцільно використовувати в разі кування недостатньо пластичних матеріалів, а також, якщо потрібно досягти високої інтенсивності протягування.

Конструкція, що займає проміжне положення між плоскими і вирізними бойками – комбіновані бойки (верхній - плоский, нижній - вирізний). Завдяки наявності верхнього плоского байка вони більш універсальні, ніж вирізні, тому що дозволяють обтискати заготовку в більш широких межах (по діаметру), а також дають можливість використовувати підкладний інструмент. Нижній вирізний бійка спільно з верхнім плоским, що створює триосередкову схему деформації, обмежує перебіг металу в

ширину, що сприяє розвитку процесу волокноутворення і підвищує продуктивність процесу кування.

Найбільша ширина зони розтягування має місце під плоским бойком при куванні за схемою: максимальний градієнт розтягуючих напружень виходить при куванні під плоскими бойками. Дуже сприятливими є умови у висічних радіальних бойках з кутом охоплення 120о, що характеризуються незначною протяжністю зони розтягуючих напружень. За абсолютною величиною розтягуючі напруження значно менші за межу плинності металу, тому вони не можуть мати вирішального впливу на появу в ньому тріщин і внутрішніх несуцільностей.

На багатьох заводах з успіхом застосовують комбіновані бойки з кутом вирізу 135^{o} для кування восьмигранних злитків, профіль яких добре вписується у виріз бойка, забезпечуючи необхідний бічний підпір при куванні. Різниця між ромбічними і кругловирізними бойками в тому, що перші забезпечують переривчастий контакт металу з інструментом, тоді як у других є суцільні ділянки контакту на певній стадії стиснення. При куванні в ромбічних бойках метал обтискається по висоті і тече вздовж вирізу, збільшуючи довжину заготовки, а також поперек вирізу, утворюючи розширення і частково заповнюючи його кути, в напрямку, протилежному обтиску по висоті. Кування в радіусних бойках характеризується стисканням по висоті і течією металу в розширення, причому протяжка здійснюється більш інтенсивно, ніж в ромбічних бойках. Якщо заготовка обрана так, що $D_{заг} > D_{о}$, то на початку стиснення між найбільш глибокою частиною вирізу і заготовкою є просвіт, який швидко заповнюється металом і процес продовжується нормально.

Ромбічні бойки характеризуються кутом вирізу φ, а радіусні – кутом охоплення γ. Уздовж площини вирізу діють сили Р і Т, причому течія металу в кут вирізу і в розширення відбувається при різноспрямованих силах тертя Т. Поблизу роз'єму бойок горизонтальні складові P_x і T_x односпрямовані, забезпечуючи бічний підпір металу, а поблизу вершини вирізу ці сили

різноспрямовані і бічний підпір ослаблений. Уздовж радіальної поверхні кругловирізного бойка діють нормальні неоднакові сили і односпрямовані сили тертя Т з горизонтальною складовою T_x односпрямовані, забезпечуючи бічний підпір металу, а поблизу вершини вирізу ці сили різноспрямовані і бічний підпір ослаблений. Уздовж радіальної поверхні кругловирізного бойка діють нормальні неоднакові сили і односпрямовані сили тертя Т з горизонтальною складовою T_x, що стримує розширення і підсилює бічний підпір, який змінюється в межах кута охоплення. Важливою є та обставина, що чим більше розширення, тим більші розтягуючі напруження виникають на бічній поверхні заготовки.

При встановленні типу і форми необхідних бойків виходять з інтенсивності протягування або продуктивності кування, можливості забезпечення найбільшої деформації (уковки), отримання схеми яскраво вираженого об'ємного напруження стиснення, обмеження розширення і т.д. Для кожного преса за його номінальним зусиллям визначають розміри перетину злитка для протягування (після білетування або осадки). Діаметр цього злитка визначає найбільшу ширину вирізу $b_в$. Для ромбічних бойків виріз виконують під одним з кутів ряду: 135, 120, 110, 105, 90°. Залежно від прийнятого кута вирізу φ при даній його ширині виходить та чи інша глибина вирізу $h_в$. Кут вирізу φ пов'язаний з відношенням $b_в/h_в$ тригонометричною залежністю, за якою отримуємо

φ^o ……..	135	120	110	105	90
$b_в / h_в$…….	2.4	1.7	1.4	1.3	1.0

Крім кута вирізу, ромбічний бойок, так само як і радіальний, характеризується кутом γ охоплення заготовки і радіусом $R_к$ в зімкнутому положенні бойків. Цей радіус характеризує найменший перетин протягнутої заготовки. Кути вирізу і охоплення пов'язані між собою залежністю

$$\gamma + \varphi = 180^o. \qquad (1.3)$$

Чим більший кут вирізу, тим менший кут охоплення. Зазвичай виріз має заокруглення $r_в \le R_к$.

Максимальна глибина вирізу кожного бійка при $r_в = 0$ становить

$$\frac{h_в}{2} = \frac{R_к}{\sin\frac{\varphi}{2}} = \frac{R_к}{\sin\left(90 - \frac{\gamma}{2}\right)}. \qquad (1.4.)$$

При $r_в = R_к$ найбільша глибина вирізу $h_в/2 = R_к$.

У загальному випадку найбільша глибина вирізу залежить від величин γ або φ і $R_к$ (зі збільшенням кута φ глибина вирізу зменшується). Можлива деформація при протягуванні визначається наступним чином. Умовно приймаємо, що вихідна заготовка R_o не перевищує половини ширини вирізу ($b_в = h_в \operatorname{tg} \varphi/2$), тоді найбільший коефіцієнт уковки

$$K_L = K_{пр} = \frac{R_0^2}{R_к^2} = \frac{h_в^2 tg^2\frac{\varphi}{2}}{h_в^2 \sin^2\frac{\varphi}{2}} = \frac{1}{\cos^2\frac{\varphi}{2}}. \qquad (1.5.)$$

що відповідає таким його величинам:

φ^o ……..	90	110	120	135
$К_{пр}$ ……	2.0	3.0	4.0	6.9

Чим більший кут вирізу, тим більша можлива уковка. Саме в цьому перевага бойків з великим кутом вирізу. Однак, чим більший кут вирізу, тим більше розширення і менше бічна підпора.

Робочий простір комбінованих бойків тієї ж ширини $b_в$ залишається незмінним на початку стиснення, але значно меншої глибини вирізу, так як при даному φ $h_к = h_в/2$. З цієї причини аналогічний попередньому розрахунок показує, що для комбінованих бойків максимальні коефіцієнти уковки складають:

φ^o ……..	90	110	120	135
$К_{пр}$ ……	5.8	10.7	13.0	25.0

Через можливість забезпечення таких великих коефіцієнтів уковки при протягуванні комбіновані бойки отримали широке поширення.

Збільшення максимального коефіцієнта уковки при даних величинах кута вирізу і його ширини можливо тільки за рахунок зменшення глибини вирізу в зімкнутому положенні бойок.

При куванні в комбінованих бойках високопластичної сталі можливе кантування на 180° з переходом до кантування на 90°. При дослідному куванні таких злитків з вплавленими для контролю поздовжніми стрижнями при середньому куванні 1,3 деформація осьової зони становила 71 %, тоді як в досліді зі злитком звичайної (восьмигранної) форми при куванні 1,5 деформація осьової зони — тільки 56%.

1.3.1. Розподіл напружень в осередку деформації при куванні плоскими бойками порожнистих заготовок

При гарячому куванні з вихідної суцільної заготовки отримують суцільну поковку з подовженою віссю [5], яку в подальшому піддають глибокому свердлінню. За іншим варіантом технологічного процесу для кування використовують вихідну порожнисту заготовку, отриману прокаткою, пресуванням або свердлінням. Порожнисту заготовку кують з оправкою [6] або без оправки в осьовій порожнині, отримуючи порожнистий виріб. При такому варіанті технологічного процесу переваги прокатного обладнання, що відрізняється високою продуктивністю, використовуються не в повній мірі через малі партії виробів ковальського виробництва. Крім того, прокатне обладнання має порівняно вузький інтервал типорозмірів виробів.

Продуктивність верстатного обладнання для свердління отвору в вихідній заготовці значно нижча за продуктивність кувального обладнання, що призводить до необхідності мати численний парк дорогих верстатів,

значні виробничі площі, утримувати висококваліфікований персонал верстатників і витрачати додаткові кошти на ріжучий інструмент. Крім того, операція свердління призводить до значних втрат металу в стружку. Вартість вихідної заготовки значно підвищується, з'являється залежність від суміжного виробництва, розташованого поза ковальським цехом, де встановлена радіально-обтискна машина.

Можливості РОМ значно розширилися з розробкою технології виготовлення з суцільної заготовки порожнистої поковки.

Процес протікає в кілька стадій: розкриття, потім розкриття осьової порожнини, а потім, при необхідності, її редукування або експонування. За такою технологією радіального кування можна отримувати порожнину діаметром 0,45 від зовнішнього діаметра поковки (при незмінному діаметрі вихідної суцільної заготовки, тобто кувати «без укова»).

Отриману порожнисту поковку можна використовувати як порожнисту заготовку і кувати далі без оправки. Різниця товщини стінок отриманих готових поковок менше різниці товщини стінок аналогічних виробів, отриманих прокаткою.

Крім зазначених позитивних якостей радіального кування суцільних заготовок для отримання порожнистих поковок, вдається економити до 60 – 80% металу, що втрачається на стружку, за рахунок виключення з технологічного процесу трудомістких операцій глибокого свердління поковок з подовженою віссю. Підвищення продуктивності при виготовленні порожнистого виробу радіальним куванням в порівнянні з механічною обробкою (глибоким свердлінням) супроводжується високоякісною деформаційною обробкою металу по всій товщині стінки порожнистого виробу. В результаті значно підвищуються механічні властивості виробу. Наприклад, пластичні характеристики металу в поперечному напрямку приблизно однакові з пластичними характеристиками металу в поздовжньому напрямку, чого не вдається досягти при використанні

традиційних технологій (свердління відкованих суцільних поковок, кування на оправці попередньо просвердлених заготовок).

Вивчення структури осередків деформації при стисненні плоскими бойками дозволяє вважати локалізацію деформацій постійно діючим фактором кування. Графоаналітична побудова осередків деформації для ідеально пластичного середовища з урахуванням можливості розриву швидкостей на межі пластичної з жорсткої зон дозволяє отримати уявлення про можливі адекватні характеристики осередку деформації для подальшого прогнозування оптимальних параметрів кування-протягування порожнистих циліндричних заготовок.

Досліджуємо вплив розвантаження осьової частини заготовки шляхом створення внутрішнього отвору і навантаження шляхом введення оправки в процесі одиничного стиснення.

Метод ліній ковзання дозволяє вирішувати складні завдання пластичної течії металу, проте застосування цього методу обмежується рядом умов, таких як однорідність, ізотропність, неукріпність деформованого металу.

Для того, щоб застосувати метод ліній ковзання, необхідно мати уявлення про контур поперечного перерізу деформованої заготовки до і після деформації.

Плоска задача зміни форми порожнистої циліндричної заготовки складається з двох підзадач:

- зміна зовнішнього контуру поперечного перерізу заготовки;
- зміна внутрішнього контуру.

У подальших розрахунках припускаємо, що бічні зони заготовки, прилеглі до вільної поверхні, знаходяться в жорсткому стані і не піддаються пружній деформації.

Перше із зазначених підзавдань вирішують шляхом вибору відповідної функції, що описує горизонтальні зміщення в будь-якій точці

осередку деформації (рис. 1.2). В якості відповідної функції вибираємо наступну:

$$U_x = a_1 \blacktriangledown x + a_2 \blacktriangledown x \blacktriangledown (1 - 3y^2/ H^2) \blacktriangledown (1 - x^2/ 3B^2), \qquad (1.6.)$$

де a_1, a_2 – параметри, що варіюються; H і B – висота і максимальна ширина заготовки після деформації (для ¼ поперечного перерізу).

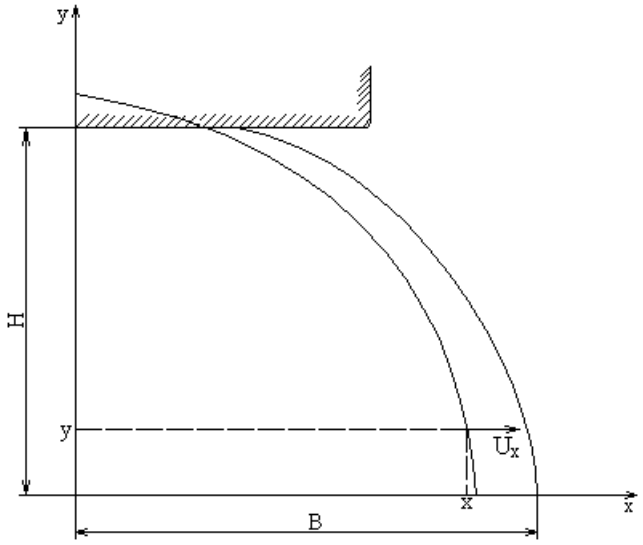


Рисунок 1.2 - Схема до вибору функції переміщення

Згідно з роботою [15], $a_1 = \varepsilon$, а параметр a_2 можна визначити, виходячи з принципу мінімуму повної енергії деформації.

Друге підзавдання можна вирішити, виходячи з припущення, що при деформації заготовки поперечний переріз внутрішньої порожнини приймає форму, близьку до форми еліпса деформації (рис. 1.3). Ширину контактних майданчиків у поперечному перерізі приймаємо рівною

$$e = f(\varepsilon), \qquad (1.6.)$$

де ε – величина одиничного стиснення.

Поперечний переріз оправки має форму кола з радіусом *r*.

Згідно з прийнятими позначеннями, e = 2x^{I} (див. рис. 1.3). Для знаходження x^{I} вирішимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{x^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} = 1; \\ x^2 + y^2 = r^2, \end{cases} \qquad (1.7.)$$

де a, b – напіввісь еліпса внутрішньої поверхні після одиничного стиснення.

Після перетворень отримаємо:

$$e = 2\sqrt{\frac{r^2 - b^2}{1 - \dfrac{b^2}{a^2}}}. \qquad (1.8.)$$

Знайдемо залежність a і b від ступеня деформації ε.

З умови сталості периметра поперечного перерізу внутрішньої порожнини заготовки

$$\pi \cdot \left[1.5(a+b) - \sqrt{a \cdot b}\right] = 2\pi \cdot R, \qquad (1.9.)$$

де R – початковий радіус внутрішньої порожнини.

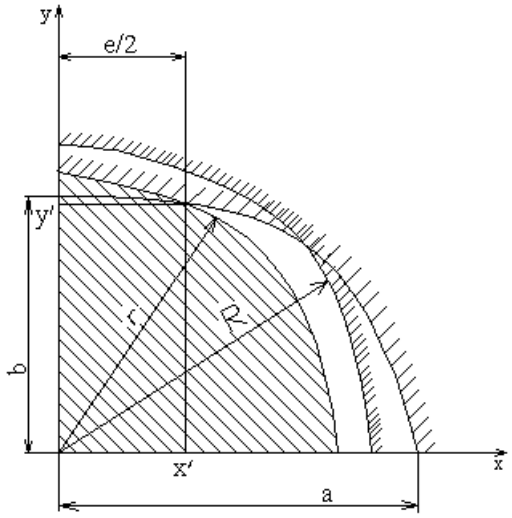


Рисунок 1.3 - Схема до розрахунку контактної площадки з оправкою

Після перетворень, враховуючи що ε = ΔR/R, ΔR = ε ♥ R, отримаємо:

$$a = \frac{R}{9}\left[4\sqrt{(1-\varepsilon)\cdot(1+2\varepsilon)} + 7\varepsilon + 5\right]; \qquad (1.9.)$$

$$b = R - \Delta R = R(1-\varepsilon). \qquad (1.10.)$$

Підставивши рівняння (1.9), (1.10) у вираз (1.8), отримаємо:

$$e = 2\sqrt{\frac{r^2 - R^2\cdot(1-\varepsilon)^2}{\left[1 - \frac{9R\cdot(1-\varepsilon)^2}{4\sqrt{(1-\varepsilon)\cdot(1+2\varepsilon)} + 7\varepsilon + 5}\right]}}. \qquad (1.11.)$$

Алгоритмізація графічного побудови поперечного перерізу внутрішньої порожнини здійснюється за допомогою циклу з параметром, що змінюється від a до e/2, що включає рівняння еліпса.

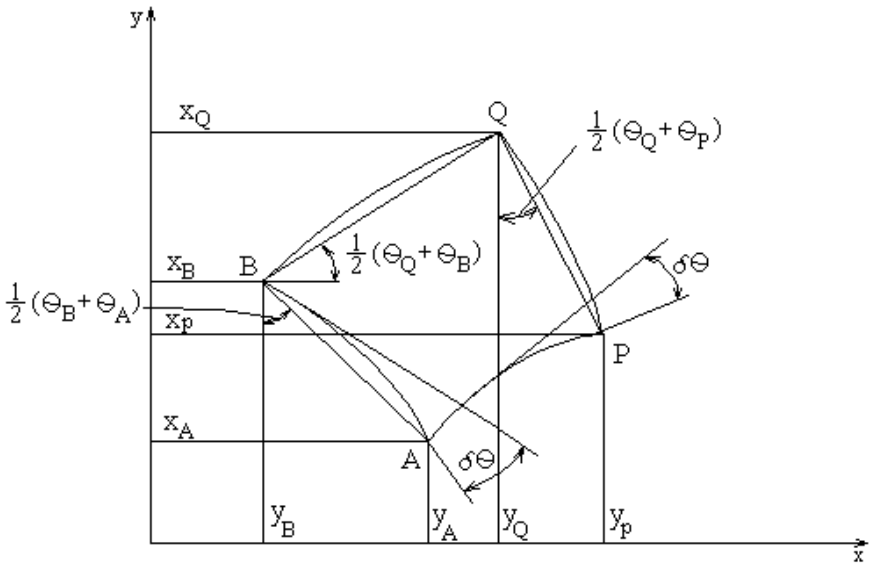
Розрахувавши контур поперечного перерізу деформованої заготовки, переходимо до розрахунку поля ліній ковзання.

Для алгоритмізації побудови сіток ліній ковзання найбільш зручний метод чисельного інтегрування (чисельний метод). Чисельний метод дозволяє вирішити так звану другу крайову задачу, яка полягає в побудові сітки ліній ковзання по двох заданих пересічних лініях ковзання (рис. 1.4, а). Передбачається, що лінії ковзання A-P і A-B відомі. Потрібно побудувати лінії ковзання, що проходять через точку Q.

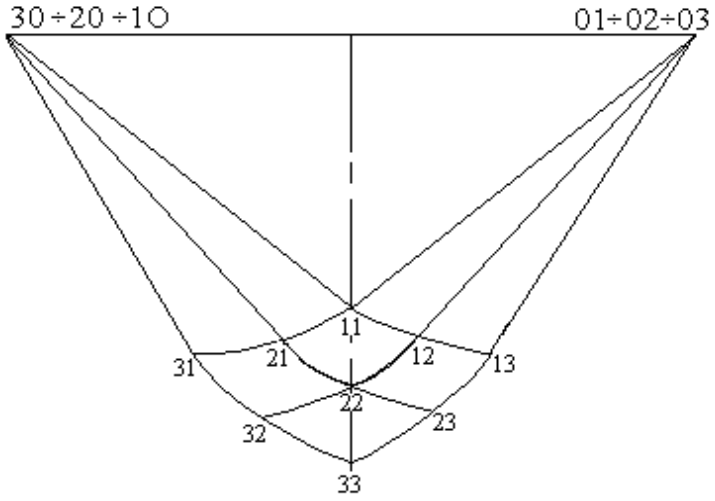
Для алгоритмізації побудови сіток Генкі – Прандтля необхідно ввести систему індексації вузлів (рис. 1.4, б). Запишимо рівняння для чисельного методу побудови сіток ліній ковзання [14] в індексній формі:

$$\begin{cases} -ctg\dfrac{1}{2}\cdot\left(\Theta_{i,j} + \Theta_{i-1,j}\right) = m; \\ tg\dfrac{1}{2}\cdot\left(\Theta_{i,j-1} + \Theta_{i,j}\right) = n; \\ x_{i,j} = \dfrac{y_{i,j-1} - y_{i-1,j} + mx_{i-1,j} - nx_{i,j-1}}{m-n}; \end{cases} \qquad (1.12.)$$

$$y_{i,j} = \frac{my_{i,j-1} - ny_{i-1,j} + mnx_{i-1,j} - mnx_{i,j-1}}{m-n}.$$



а)



б)

Рисунок 1.4 – Чисельний метод побудови ліній ковзання (а) та індексація вузлів сітки ліній ковзання (б)

Згідно з теоремою Генкі, кут між дотичними до двох ліній ковзання одного сімейства в точках перетину їх з кожною лінією другого сімейства є постійним. Оскільки два сімейства ліній ковзання ортогональні, то при

переміщенні вздовж лінії ковзання з одного вузла в сусідній вузол кут нахилу дотичної до характеристики змінюється на величину кута розбиття.

Завдяки даним властивостям ліній ковзання, можна розрахувати кут нахилу дотичної до характеристики в будь-якому вузлі сітки ліній ковзання (рис. 1.5):

$$\begin{cases} \Theta_{ij}^{oj} = \alpha - (i-j)\cdot\varphi; \\ \Theta_{ij}^{io} = \Theta_{ij}^{oj} + \dfrac{\pi}{2}, \end{cases} \qquad (1.12.)$$

де φ – кут розбиття.

Координати вузлових точок сітки ліній ковзання у вигляді двоцентрового віяла розраховують за відомою відстанню між характеристичними точками, кутом розбиття і двома граничними лініями ковзання (див. рис. 1.5). При відсутності контактного тертя (α= 45°)

$$\begin{cases} x_{1j} = \dfrac{e}{2}\left[1 - \sqrt{2}\cos\pi/4 + (j-1)\varphi\right]; \\ y_{1j} = \dfrac{e}{\sqrt{2}}\sin(\pi/4 + (j-1)\varphi). \end{cases} \qquad (1.13.)$$

Проводячи розрахунок послідовно за формулами (1.13.), (1.12.), (1.11.), можна обчислити координати всіх точок двоцентрового віяла ліній ковзання. Алгоритмізація даного розрахунку здійснюється за допомогою циклів з параметрами i, j. Маючи координати всіх вузлів сітки ліній ковзання з достатньо малим кутом розбиття, легко побудувати її з будь-яким необхідним кутом розбиття.

Оскільки з формул (1.12.) відомі кути нахилу дотичних до характеристик у вузлах сітки ліній ковзання, а з формул (1.13.) – координати цих вузлів, то за формулами Генки можна розрахувати напруження в осередку деформації:

$$\begin{cases} \sigma_x = -p + k \cdot \sin 2\Theta; \\ \sigma_y = -p - k \cdot \sin 2\Theta; \\ \tau_{xy} = -k \cdot \cos 2\Theta. \end{cases} \qquad (1.14.)$$

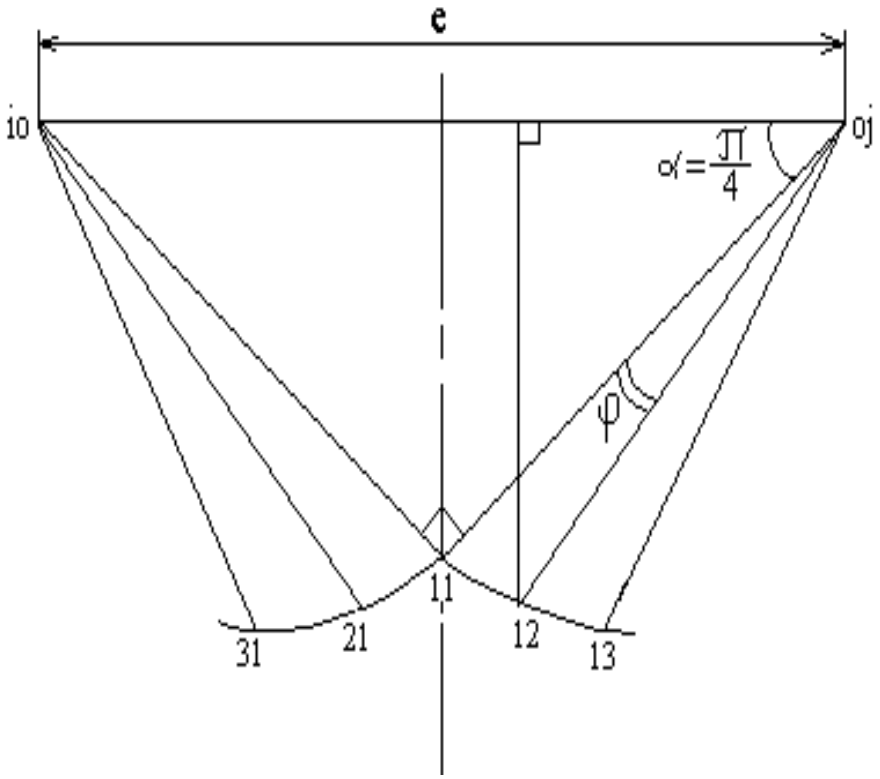


Рисунок 1.5 – Схема до розрахунку сітки ліній ковзання у вигляді двоцентрового віяла

1.3.2. Кування–протягування комбінованими бойками

При куванні круглої порожнистої заготовки в комбінованих байках зовнішня сила передається на заготовку через три контактні поверхні. Причому через одну з них, що сходиться під плоским бойком, передається сила, рівна P, а через кожну з 2-х інших контактних поверхонь сила, рівна P_1 (рис. 1.6):

$$P_1 = P \blacktriangledown \sin \alpha / 2. \qquad (1.15.)$$

Сумарний вплив нормальних напружень верхнього і нижнього бойків призводить до виникнення розтягуючих напружень. Сумарна дія нормальних напружень верхнього і нижнього бойків призводить до виникнення розтягуючих напружень. Сумарна дія нормальних напружень осередків деформації нижнього вирізного бойка призводить до виникнення знімаючих напружень, які дещо знижують рівень розтягуючих напружень. Цим пояснюється більш сприятливе зняття напруженого стану при куванні на комбінованих бойках в порівнянні з куванням на плоских бойках.

Слід зазначити, що при досить великих одиничних стисканнях, коли стискаюча дія зон загальмованої деформації досягне осьової зони деформованої заготовки, внутрішні радіальні розтягуючі напруження можуть не утворюватися. Однак при куванні малопластичних сталей такі значні одиничні стискання частково неможливі внаслідок малого запасу пластичності металу і утворення розривів на поверхні заготовки.

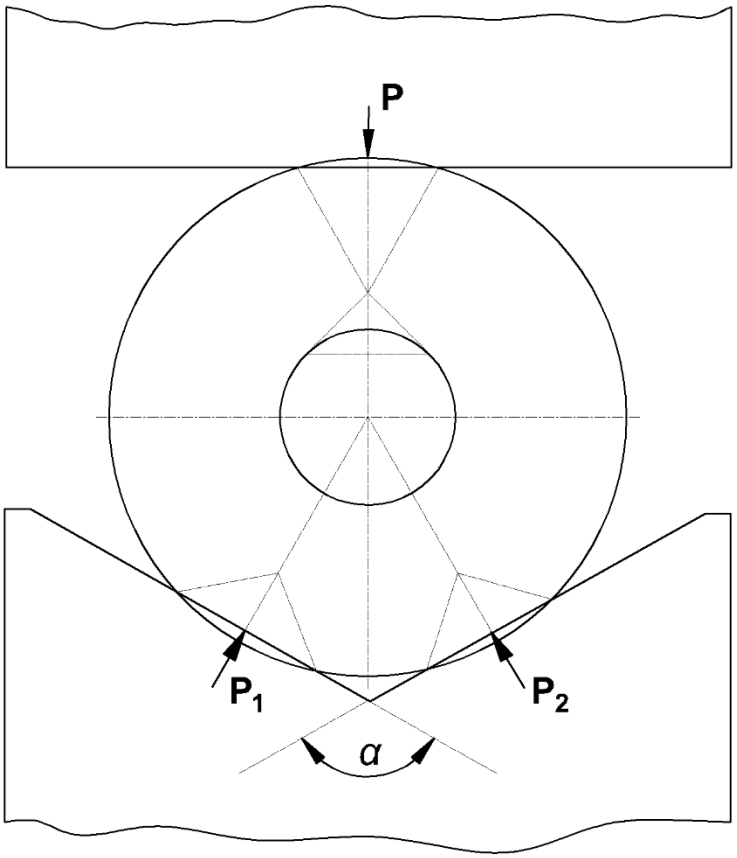


Рисунок 1.6 - Схема протягування круглої заготовки комбінованими бойками

2 МЕТОДИ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОЇ ЗАГОТОВКИ

З метою знаходження оптимальних параметрів при куванні на оправці необхідно провести дослідження методів оцінки напружено-деформованого стану металу.

2.1 Інженерні методи оцінки напружено-деформованого стану

1) Метод спільного вирішення наближених рівнянь рівноваги та умови пластичності.

Цей метод дозволяє знаходити напруження на контактній поверхні дотику металу з інструментом. В якості спрощуючого припущення в даному випадку приймається, що напружено-деформований стан є симетричним відносно осі або плоским. При різанні вираженої неоднорідності деформації тіло розділяють на обсяги, щоб в кожному з них напружено-деформований стан можна було прийняти плоским або симетричним відносно осі. Складаючи диференціальне рівняння рівноваги, зазвичай припускають, що нормальні напруження в даному перерізі не змінюються, а приймають усереднене значення і залежать тільки від однієї координати. Хороші результати отримують, коли розміри заготовки в напрямку усереднення малі в порівнянні з іншими [1, 5].

2) Метод опору матеріалів пластичній деформації.

Цей метод розроблений Г.А. Смирновим-Аляєвим. Метод дозволяє знаходити зусилля при великих пластичних деформаціях, якщо вони монотонні або наближено монотонні. При цьому головні осі напружень збігаються з головними осями деформацій. Отже, між напруженнями і справжніми деформаціями можна приймати співвідношення, аналогічні співвідношенням при малих деформаціях. За деформованим станом

визначають девіатор напружень і потім з наближених рівнянь рівноваги знаходять напруження.

3) Варіаційний метод.

Цей метод заснований на енергетичному принципі, тобто на положенні, що сума робіт усіх зовнішніх і внутрішніх сил при можливих переміщеннях біля положення рівноваги дорівнює нулю. Отже, задача зводиться в даному випадку до знаходження такої функціональної залежності переміщень то координат, при якій повна енергія приймає мінімальне значення.

2.2 Метод ліній ковзання

Увагу багатьох дослідників здавна привертав своєрідний природний малюнок, що виникає на поверхні металу, підданого деформації. Опис фігур деформації був даний В. Людерсом, Д. К. Черновим, Л. Гартманом.

Подальші теоретичні дослідження показали, що природні малюнки збігаються з лініями, вздовж яких відсутні деформації розтягування або стиснення. Такі лінії називаються лініями ковзання і збігаються з характеристиками системи диференціальних рівнянь плоскої задачі. У разі плоскої деформації лінії ковзання збігаються і з траєкторіями максимальних дотичних напружень. За умови пластичності Сен-Венана лінії ковзання збігаються з траєкторіями максимальних дотичних напружень в стиснуто-розтягнутих частинах заготовок і в разі плоского напруженого стану. Швидкий розвиток методу ліній ковзання, або методу характеристик, пояснюється тим, що на відміну від одновимірних наближень цей метод дозволяє не тільки обчислювати деформуючі зусилля, але і повністю визначати поля напружень і швидкостей в перерізах деформованого металу і аналізувати локальні явища, які зазвичай є основними у вирішенні технологічних задач.

У будь-якій точці перерізу тіла, що знаходиться в стані плоскої пластичної деформації, є два ортогональних напрямки, вздовж яких дотичні напруження приймають найбільше значення.

Поле цих напрямків утворює ортогональну сітку, що складається з двох систем ліній, дотичні до яких збігаються з напрямками найбільших дотичних напружень [5].

Сітка ліній ковзання повинна задовольняти умовам на межах розглянутого перерізу деформованого тіла. Ці умови випливають з того, що напрямок лінії ковзання в кожній точці, в тому числі і на зовнішньому контурі, повинен збігатися з напрямком головної дотичної напруги. Таким чином, при відсутності тертя на поверхні контакту або на вільній поверхні лінії ковзання перетинають контур перерізу деформованого тіла під кутом $\pi/4$. Якщо тертя на поверхні контакту досягає найбільшої величини, допустимої фізичними властивостями деформованого металу ($\tau_{max} = \pm \kappa$), то одне сімейство ліній ковзання перетинає контур перетину під кутом $\pi/2$, а для другого сімейства лінія контуру є огинаючою.

На початкових стадіях пластичної деформації при розтягуванні циліндричного зразка на його поверхні виявляється сітка ліній, що перетинаються під кутом 45^o до осі зразка. Ці лінії (їх називають лініями Чернова-Людерса) є слідами перетину поверхні зразка площинами максимальних дотичних напружень. Лінії ковзання можна спостерігати також на поверхні листів, покритих окалиною, поблизу кромки при різанні, пробиванні отворів тощо. Дослідження показали, що лінії ковзання збігаються з траєкторіями найбільших дотичних напружень.

Лінії ковзання мають ряд важливих властивостей, що дозволяють використовувати їх для знаходження напружень по об'єму тіла при плоскій і осі симетричній деформації. Знаючи напруження в будь-якій точці тіла, можна визначити напруження на контактній поверхні і тим самим визначити повне зусилля деформації.

Оскільки лінії ковзання є траєкторіями найбільших дотичних напружень і при плоскій деформації є дві рівноправні площини максимальних дотичних напружень, отримуємо два сімейства ортогональних ліній ковзання, що перетинаються з траєкторіями головних нормальних напружень під кутом $\pi/4$.

Отже, основні властивості ліній ковзання такі:

1) лінії ковзання складають два взаємно перпендикулярні сімейства кривих, що перетинають траєкторії головних напружень під кутом $\pi/4$;

2) зміна середнього нормального напруження при русі вздовж лінії ковзання дорівнює добутку кута її повороту на 2π;

3) кут між дотичними до двох ліній одного сімейства в точках перетину їх кожною лінією іншого сімейства залишається постійним;

4) лінії ковзання виходять на вільну поверхню під кутом $\pi/4$ [5].

При пластичному деформуванні на поверхні металів виникає сімейство природних взаємно ортогональних ліній, які називаються лініями ковзання, і в разі плоскої деформації вони збігаються з траєкторіями максимальних дотичних напружень. Широкий розвиток методу ліній ковзання для дослідження пластичної зміни форми металів обумовлений тим, що він дозволяє визначити поле напружень і швидкостей течії в перерізах деформованого металу і проводити дослідження в окремих зонах. Метод ліній ковзання дозволяє вирішувати складні задачі пластичного течії металу шляхом знаходження можливого поля ліній ковзання і виявлення епюр розподілу напруги і швидкостей деформації.

Застосування цього методу обмежується деякими умовами, якими є однорідність, ізотропність і незміцнюваність деформованого металу.

Метод ліній ковзання отримав в останні роки значний розвиток завдяки зусиллям багатьох дослідників, які з успіхом застосовували його для вирішення практичних завдань. Однак він не є універсальним, яким його деякі вважали. Метод ліній ковзання, строго кажучи, застосовний тільки для

задач плоскої деформації, в яких швидкості деформації і напруження змінюються в одній площині і не залежать від третьої осі координат.

Сітки ліній ковзання складаються з двох сімейств ліній максимальних дотичних напружень, що перетинаються під прямими кутами в полі пластичного течії. Ці лінії зсуву мають властивість задовольняти рівнянню статичної рівноваги, умові пластичності і можливому полю течії всюди в пластичній області металу.

Сітки ліній ковзання можна в багатьох випадках будувати аналітично як характеристики диференціального рівняння, отриманого із спільного розв'язання рівнянь рівноваги та умови пластичності, при цьому ніяких умов на швидкості деформації не накладається. Метод ліній ковзання дозволяє вирішувати складні задачі пластичної течії металу шляхом знаходження можливого поля ліній ковзання і виявлення епюр розподілу напруги і швидкостей деформації.

Застосування цього методу обмежується деякими умовами, якими є однорідність, ізотропність і неукріпність деформованого металу.

Аналіз ліній ковзання в разі плоско-деформованого стану дозволяє отримати якісні значення напружень і деформацій. З теорії напружень відомо, що в будь-якій точці деформованого тіла існують взаємно перпендикулярні майданчики, на яких діють екстремальні дотичні напруження. Ці майданчики ділять навпіл кути між головними майданчиками, на яких діє найбільше σ_1 і найменше σ_3 головні напруження. Якщо з'єднати майданчики з максимальними дотичними напруженнями плавними кривими, отримаємо ортогональну сітку ліній ковзання. Якщо з'єднати майданчики з максимальними дотичними напруженнями плавними кривими, отримаємо ортогональну сітку ліній ковзання. Для того, щоб встановити основні закономірності, розглянемо рівновагу елементарної призми, утвореної двома координатними площинами і площиною, нахиленою під кутом α до осі X, на якій діють максимальні дотичні напруження $\tau_{max} = к$ (рис. 2.1.).

Осі t_1 і t_2 є дотичними до ліній ковзання в даній точці.

З умови рівноваги всіх сил, прикладених до тетраедра, випливає:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} + \frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} * \cos 2\alpha - \tau * \sin 2\alpha \qquad (2.1.)$$

$$\kappa = \frac{\sigma_X - \sigma_Y}{2} * \sin 2\alpha + \tau * \cos 2\alpha \qquad (2.2.)$$

Використовуючи сітку ліній ковзання як природну систему координат і диференціюючи рівняння (2.1, 2.2.) по α, отримаємо:

$$\frac{d\sigma_0}{d\alpha}_{t2=const} = -\left(\sigma_x - \sigma_y\right) * \sin 2\alpha - 2 * \tau * \cos 2\alpha \qquad (2.3.)$$

Підставивши в це рівняння відомі співвідношення, отримаємо:

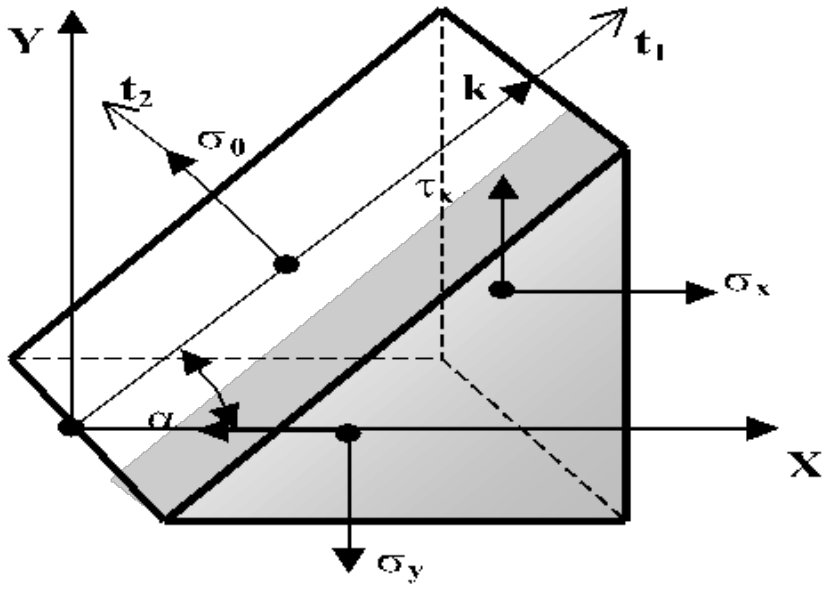


Рисунок 2.1 - Напруги, що діють на похилому майданчику

$$\sigma_y = \sigma_0 + k * \sin 2\alpha \qquad (2.4.)$$

$$\sigma_x = \sigma_0 - k * \sin 2\alpha$$
$$\tau = k * \cos 2\alpha \qquad (2.5.)$$

Остаточно матимемо:

$$(d\sigma_0)_{t_2 = const} = -2k * d\alpha \qquad (2.6.)$$

Для ортогонального сімейства ліній приріст середнього нормального напруження дорівнює:

$$(d\sigma_0)_{t_1 = const} = 2k * d\alpha . \qquad (2.7.)$$

Можна показати, що ці рівняння є диференціальними рівняннями рівноваги елемента, вирізаного лініями ковзання.

Якщо в будь-якій точці «а» відома величина середнього напруження, то в точці «б», що лежить на тій же лінії ковзання, напруження може бути визначено інтегруванням рівняння (2.6.):

$$(\sigma_0)_б = (\sigma_0)_a \pm 2k(\alpha_a - \alpha_б), \qquad (2.8.)$$

де α_a і $\alpha_б$ - кути нахилу дотичної до лінії ковзання в точках «а» і «б».

Таким чином, для жорстко-пластичного середовища, знаючи напруження стану в будь-якій точці (наприклад, на вільному контурі) і маючи сітку ліній ковзання, можна визначити компоненти тензора напружень в будь-якій точці досліджуваної області. Після визначення компонентів напружень можна дізнатися деформації, використовуючи рівняння теорії пластичного течії.

2.2.1 Внутрішні геометричні властивості ліній ковзання

Внутрішня геометрія ліній ковзання, що не залежить від граничних умов, визначається 2 теоремами Генки.

Перша теорема Генки: кут між дотичними до двох ліній ковзання одного сімейства в точках їх перетину лініями ковзання іншого сімейства залишається постійним.

Друга теорема Генки: при переміщенні вздовж лінії ковзання одного з сімейств радіуси кривизни ліній ковзання іншого сімейства змінюються на пройдені відстані.

Внутрішні геометричні властивості сітки ліній ковзання:

А. Лінії ковзання безперервні в пластичних областях. Вони починаються і закінчуються або на поверхні тіла, або на межі пластичної і жорсткої зони.

Б. Якщо будь-який відрізок лінії ковзання даного сімейства являє собою відрізок прямої, то всі інші відрізки ліній ковзання цього сімейства, відсікаються лініями ковзання іншого сімейства – прямі.

В. Відсічені прямі відрізки ліній ковзання одного сімейства мають однакову довжину.

Г. Радіуси кривизни ліній ковзання будь-якого сімейства при русі в бік їх увігнутості по пересічних лініях ковзання іншого сімейства безперервно зменшуються і можуть обернутися в нуль.

Особливим випадком сітки ліній ковзання, що має властивості Б, В і Г, є центроване віяло, утворене пучком прямих і концентричних кіл.

Д. Огинаюча ліній ковзання одного сімейства (крива, якої торкаються всі лінії ковзання сімейства) являє собою геометричне місце точок повернення ліній ковзання іншого сімейства (точок, в яких радіуси кривизни ліній дорівнюють нулю).

Е. Огинаюча ліній ковзання будь-якого сімейства є межею розв'язання задачі (аналітичного розв'язання задачі), оскільки через неї не можна продовжити лінії ковзання іншого сімейства.

Ж. Якщо лінія ковзання перетинає лінію розриву напружень, що представляє собою слід від поверхні розриву напружень, то в точці перетину змінюються стрибком її кут наклепу і радіус кривизни.

2.2.2 Перетини лініями ковзання меж тіла

Лінії ковзання перетинають межу деформованого тіла під кутами, які визначаються поверхневими дотичними напруженнями $\tau_к$ [7].

Часткові умови перетину меж тіла лініями ковзання:

А. Контур контактної поверхні тіла, на якому дотичні напруження (сили тертя) постійні, перетинаються лініями ковзання під постійними кутами.

Б. Контур вільної поверхні тіла, а також контактної поверхні, де тертя відсутнє, перетинається лініями ковзання під кутами. При цьому $\tau_к = 0$.

В. При граничних за величиною питомих силах тертя, рівних максимальному дотичному напруженню ($\tau_к$ = к), контур контактної поверхні тіла є огинаючою лінією ковзання одного з сімейств.

2.2.3 Відображення особливостей напруженого стану сіткою ліній ковзання

Сітка ліній ковзання є специфічною координатною системою в перерізі деформованого тіла. Вона несе в собі всю основну інформацію про напружений стан тіла і відображає його особливості. У розрахунках найбільш вживаним є використання наведених нижче властивостей такого відображення.

А. Кут повороту дотичної до лінії ковзання змінюється пропорційно зміні середнього нормального напруження вздовж розглянутої лінії ковзання.

Б. При переході від однієї лінії ковзання до іншої того ж сімейства вздовж будь-якої лінії ковзання іншого сімейства середнє нормальне напруження змінюється на одну і ту ж величину.

В. Уздовж прямолінійного відрізка лінії ковзання будь-якого сімейства всі компоненти напруженого стану є постійними. Однак при

переході від одного прямолінійного відрізка лінії ковзання до іншого відрізка лінії ковзання того ж сімейства з іншим кутом нахилу напруження змінюються. Такий напружений стан називається міцним. Він має місце, наприклад, якщо сітка ліній ковзання являє собою центроване віяло. Якщо в будь-якій області сітка ліній ковзання складається з відрізків ортогональних прямих, тут всі компоненти напружень є постійними. Подібний напружений стан називають рівномірним однорідним. У загальному випадку сітки ліній ковзання мають «клаптиковий» вигляд, що відображає неоднорідність напруженого стану матеріалу в процесі деформації. Сітки складаються з відрізків різних аналітичних кривих, тобто кривих, що мають неперервну похідну.

Г. Ізольовані точки в площині течії, в яких нормальне розривно-середнє напруження, є особливими точками сітки ліній ковзання. Це точки повернення ліній ковзання одного з сімейств. Їх радіуси кривизни дорівнюють нулю.

Особливими точками є, наприклад, сліди ребер, по яких стикуються поверхні контакту деформованого тіла і його вільні поверхні. На таких ребрах нормальні до поверхні тіла напруження змінюються стрибком від нуля на вільній поверхні до деяких кінцевих значень на поверхні контакту. Відповідно змінюються стрибком нормальні середні напруження.

2.2.4 Чисельний метод розрахунку ліній ковзання (друга крайова задача)

Чисельне рішення другої крайової задачі (про початкові характеристики) починають з розбиття дуг ліній ковзання, що представляють собою початкові характеристики, на малі відрізки. Початкові характеристики приймають за нульові лінії ковзання α_o і β_o, а кінці відрізків позначають: (0,0), (1,0), (2,0), на лінії α_o і (0,1), (0,2), на лінії

β_o. Встановлюють координати кінців відрізків: (x_{oo}, y_{oo}), (x_{10}, y_{10}), (x_{01}, y_{01}) і кути нахилу у них α – ліній до вісі x: θ_{oo}, θ_{10}, θ_{20},… и θ_{01}, θ_{02},…

За першою теоремою Генки знаходять кут нахилу α–лінії в першій шуканій внутрішній точці сітки (1.1), утвореній перетином ліній ковзання, що проходять через точки (1,0) і (0,1):

$$\theta_{11} = \theta_{01} + \theta_{10} - \theta_{00}. \qquad (2.9.)$$

Використовуючи це значення, знаходять координати x_{11} і y_{11} точки (1,1) з рівнянь, що замінюють диференціальні рівняння різницевими відношеннями:

Уздовж лінії α_1:

$$Y_{11} - Y_{01} = (X_{11} - X_{01}) \cdot tg \cdot \frac{\theta_{11} + \theta_{01}}{2}, \qquad (2.10.)$$

Уздовж лінії β_1:

$$Y_{11} - Y_{10} = -(X_{11} - X_{10}) \cdot ctg \cdot \frac{\theta_{11} + \theta_{10}}{2}, \qquad (2.11.)$$

За значеннями θ_{11}, x_{11}, y_{11} знаходять кут нахилу лінії α в точці (2,1) і координати точок (2,1) з різницевих співвідношень

$$Y_{21} - Y_{11} = (X_{21} - X_{11}) \cdot tg \cdot \frac{\theta_{21} + \theta_{11}}{2}, \qquad (2.12.)$$

$$Y_{21} - Y_{20} = -(X_{21} - X_{20}) \cdot ctg \cdot \frac{\theta_{21} + \theta_{20}}{2}, \qquad (2.13.)$$

Таким же чином знаходять координати інших точок на лінії ковзання α_1, потім на лінії α_2 і т.д.

У розрахунках багатьох технологічних операцій за початкові характеристики, що утворюють сітку ліній ковзання між ними, можуть бути прийняті кругові дуги однакові або різних радіусів. У цих випадках рішення другої крайової задачі здійсненне аналітичними методами.

2.2.5 Рівнокутна сітка ліній ковзання

Спрощення розрахунків методом ліній ковзання досягається застосуванням рівнокутної сітки ліній ковзання. У такій сітці кути між дотичними до сусідніх ліній ковзання всюди однакові. Для побудови рівнокутної сітки дуги початкових ліній ковзання розбивають на відрізки з однаковою зміною кута нахилу дотичної так, що

$$\theta_{00} - \theta_{10} = \theta_{10} - \theta_{20} = ... = \theta_{01} - \theta_{00} = \theta_{02} - \theta_{01} = ... = \gamma = const \qquad (2.14.)$$

Тоді в точках (m,0) і (n,0) на початкових лініях ковзання α_0 і β_0 мають місце співвідношення:

$$\theta_{mo} = \theta_{00} - m\gamma, \qquad (2.15.)$$

$$\theta_{on} = \theta_{00} + n\gamma, \qquad (2.16.)$$

За першою теоремою Генкі в точці (m, 0) рівнокутної сітки кут нахилу лінії ковзання α до осі X:

$$\theta_{mn} = \theta_{0n} + \theta_{mo} - \theta_{oo} = \theta_{oo} + (n-m)\cdot\gamma, \qquad (2.17.)$$

Координати вузлової точки (m, n) визначають за координатами найближчих точок (m-1, n) і (m, n-1) різницевими співвідношеннями, що замінюють диференціальні рівняння ліній ковзання:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Y}_{mn} - \mathrm{Y}_{m-1,n} = (\mathrm{X}_{mn} - \mathrm{X}_{m-1,n})\cdot tg \cdot \frac{\theta_{mn} + \theta_{m-1,n}}{2} = \\ &= (\mathrm{X}_{mn} - \mathrm{X}_{m-1,n})\cdot tg \cdot \theta_{oo} + (n-m+0.5)\cdot\gamma), \end{aligned} \qquad (2.18.)$$

$$\mathrm{Y}_{mn} - \mathrm{Y}_{m,n-1} = -(\mathrm{X}_{mn} - \mathrm{X}_{m,n-1})\cdot ctg\cdot(\theta_{oo} + (n-m+0.5)\cdot\gamma). \qquad (2.19.)$$

Середнє нормальне напруження в точці (m, n) визначається за середнім нормальним напруженням σ_{oo} в точці (0,0)

Тоді:

$$\sigma_{mn} = \sigma_{on} + 2\cdot k\cdot(\theta_{mn} - \theta_{on}), \qquad (2.20.)$$

$$\sigma_{on} = \sigma_{oo} - 2\cdot k\cdot(\theta_{on} - \theta_{oo}). \qquad (2.21.)$$

Звідси з урахуванням (2.20.):

$$\sigma_{mn} = \sigma_{oo} - 2K \bullet (m + n) \bullet \gamma \,, \qquad (2.22.)$$

Напруження в точці (m, n):

$$\sigma_{x\,mn} = \sigma_{oo} - 2K * (m + n) * \gamma - K * \sin(\sigma_{oo} + (n - m)\,\gamma) \;; \qquad (2.23.)$$

$$\sigma_{z\,mn} = \sigma_{oo} - 2K * (m + n) * \gamma + K * \sin(\sigma_{oo} + (n - m)\,\gamma) \;; \qquad (2.24.)$$

$$\tau_{zx} = K * \cos 2(\sigma_{oo} + (n - m)\,\gamma) \;; \qquad (2.25.)$$

3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Вплив зміцнення металу на напружено-деформований стан при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки

Основними механізмами пластичної деформації є: ковзання, подвоєння, відносне переміщення самих зерен, а також такі види пластичної нестабільності, як скидання, пластинкування, смуги деформації. Згідно з класифікацією І.А. Одінга, всі види механізмів пластичної деформації можна розділити на 3 групи: зсувні, дифузійні та граничні.

У процесі пластичної деформації металів відбувається їх деформаційне зміцнення або підвищення опору деформації, яке спостерігається внаслідок утруднення руху дислокацій, їх взаємодії, і продовження деформації можливе лише при збільшенні прикладеного напруження [9].

Існуючі гіпотези і теорії деформаційного зміцнення значною мірою базуються на теорії Тейлора. За теорією Тейлора величина миттєвої межі плинності (опору деформації) визначається внутрішніми напруженнями, які перешкоджають руху дислокацій. Дислокації, затримуючись у кристалах, поступово створюють внутрішні напруження, утворюються дислокаційні стінки і ковзання, підвищується величина опору деформації даного металу.

Пластична течія металів і сплавів описується різними моделями деформаційного зміцнення:

1) Подоланням бар'єру Пайерлса – Набарро, що характеризує власний опір решітки руху дислокацій;

2) Подоланням у процесі деформації різного роду перешкод руху дислокацій (бар'єрів Ломера – Котрелла або сидячих дислокацій та ін.);

3) Перетином ковзних дислокацій з дислокаціями «лісу» та взаємодією дислокацій з плоскими межами;

4) Поперечним ковзанням гвинтової складової дислокації з переповзанням крайової складової дислокації;

5) Зародженням (розмноженням) дислокацій.

Найбільшого розвитку теорія деформаційного зміцнення чистих металів набула в роботах Орлова А.Н., Іванової В.С., Мотта, Коттрелла і Стокса, Фріделя, Гілмана, Басінського та ін. Всі автори деформаційне зміцнення пов'язують з дислокаційним механізмом пластичної деформації, проте поки не ясно, які види взаємодії дислокацій між собою або з іншими дефектами і в якій мірі визначають зміцнення матеріалів.

При аналізі впливу домішок на зміцнення металів і сплавів використовуються моделі зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, моделі утворення впорядкованої структури, впорядкування за рахунок виділення другої фази, деформаційного старіння, моделі відриву дислокацій від домішок тощо. (моделі Коттрелла, Судзукі, Мотта, Орована, Хірма, Хонікомба, Харта та ін.). Моделі деформаційного зміцнення пов'язують зміну напруги течії металів через зміну щільності дислокацій: $\sigma = A \cdot G \cdot в \cdot \sqrt{\rho}$, де G – модуль зсуву; *в*- вектор Бюргерса рухомих дислокацій; ρ – щільність дислокацій; А – розмірний фактор, що вимірює ефективність дислокаційного зміцнення.

За моделлю Зегера напруження течії залежить також від кількості дислокацій у скупченні $\sqrt{h}$:

$$\sigma = A \cdot G \cdot в \cdot \sqrt{q} \cdot \sqrt{\rho} \qquad (3.1.)$$

У відпалених чистих металах щільність дислокацій становить 10^6 - 10^8 на 1 см^2, в деформованих 10^9 - 10^{11} на 1 см^2, а в сильно наклепаному металі - до 10^{12} на 1 см^2.

Для визначення залежності щільності дислокацій від ступеня деформації використовуються різні залежності, зокрема рівняння Рейда:

$$\rho = \rho_0 + c\varepsilon^p \qquad (3.2.)$$

де ρ_o - деяка т.зв. початкова щільність дислокацій; с, р - параметри даного матеріалу.

В даний час в літературі поки мало даних про зміну щільності дислокацій в металах при гарячій деформації.

Зміцнення металів і сплавів призводить до зміни їх структури і фізико-хімічних властивостей: змінюється форма і орієнтація зерен, утворюються смуги деформації, зростає хімічна активність і електроопір матеріалу, зменшуються магнітна сприйнятливість і проникність. Зміцнення підвищує рівень внутрішньої енергії в металі, а, отже, і суцільності наклепаного металу до протікання процесів розм'якшення при подальшому нагріванні.

Процес гарячої деформації матеріалів описується за допомогою кривих плинності (діаграм деформацій) у координатах σ - ε, (Т – Г), форма і значення параметрів яких залежать від типу кристалічної решітки, фізико-хімічних властивостей і стану металу, температури, швидкості і ступеня деформації, історії і передісторії навантаження, методів випробувань, масштабного фактора.

У класичному вигляді криві плинності σ - ε для монокристалів чистих металів з БКР решіткою в умовах статичного навантаження складаються з трьох ділянок (рис. 3.1):

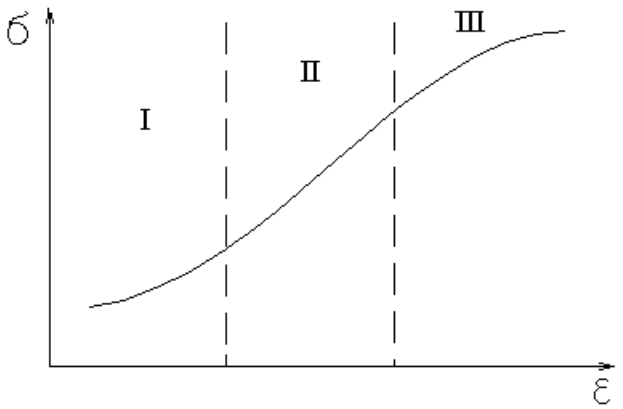


Рисунок 3.1 - Крива плинності монокристалів чистих металів з ГЦК решіткою в умовах статичного навантаження.

На ділянці I спостерігається полегшене ковзання, при якому зміцнення металу незначне. Протяжність цієї ділянки залежить від орієнтації кристала відносно прикладеної напруги, температури, швидкості деформації і чистоти металу.

Зі зростанням ступеня деформації відбувається перехід до множинного ковзання, спостерігається рух дислокацій в пересічних площинах з утворенням додаткових перешкод на шляху руху дислокацій. Коефіцієнт зміцнення на початку II стадії різко зростає і досягає максимуму (області лінійного зміцнення). У міру підвищення щільності дислокацій і зростання числа їх утворень в металі інтенсивно розвивається комірчаста дислокаційна структура; в кристалах спостерігаються короткі смуги ковзання і утворення плоских скупчень дислокацій.

На III стадії деформації відбувається деяке змішування спотворень кристалічної решітки, дислокації при своєму русі обходять перешкоди і бар'єри, спостерігається реакція між дислокаціями протилежних знаків з

взаємним їх знищенням і зменшенням поля внутрішніх напружень в металі. Ця стадія зазвичай називається областю параболічного зміцнення; поступово відбувається зниження коефіцієнта зміцнення і розвиваються процеси динамічного розм'якшення, пов'язані з перерозподілом дислокацій під впливом високих напружень, і часто з'являються грубі смуги ковзання, що складаються з близько розташованих ліній ковзання.

Щодо характеру кривих зміцнення металів з ОЦК-ґраткою поки що немає єдиної думки. У ранніх роботах ці криві наводилися у вигляді парабол.

При пластичній деформації полікристалів спостерігається складний характер напруженого стану в окремих зернах з неоднорідною деформацією різних об'єктів матеріалу. Для кривих плинності полікристалів найчастіше не спостерігається I стадії плинності (полегшеного ковзання), тому що в металі вже при невеликих деформаціях починається множинне ковзання.

Для реальних металів і сплавів на кривих зміцнення також не спостерігається стадії легкого ковзання, і характер кривих σ - ε значною мірою визначається температурно-швидкісними умовами деформації [9, 10].

На рис. 3.2. показані найбільш характерні криві деформаційного зміцнення металів і сплавів. На початковій ділянці всіх кривих відбувається інтенсивне деформаційне зміцнення, зростає щільність дислокацій і в металі відбувається формування комірчастої субструктури гарячого наклепу. Найбільш сильне деформаційне зміцнення характерне для аустенітних сплавів, сплавів нікелю, титану. Слабким деформаційним зміцненням характеризуються α – залізо, феритні сплави.

Зі зростанням ступеня деформації ($\varepsilon > 0{,}1$) починає проявлятися динамічне розм'якшення, причиною якого можуть бути:

а) динамічне повернення, динамічна полігонізація і рекристалізація, які вносять основний внесок в розм'якшення;

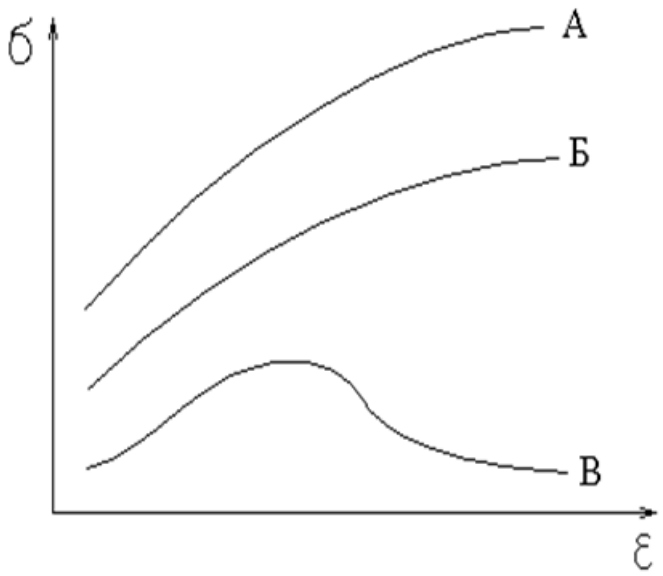


Рисунок 3.2 - Криві плинності металів і сплавів.

b) прояв теплового ефекту пластичної деформації, який підсилює процеси динамічного розм'якшення;

c) зміна в процесі деформації орієнтації площин ковзання на більш сприятливі;

d) зміна других фаз у сплавах: сфероїдизація пластичних структур і укрупнення дрібнодисперсних виділень.

Для кривих типу А із зростанням ступеня деформації коефіцієнт зміцнення знижується за рахунок процесу динамічного повернення і теплового ефекту пластичної деформації. Подібний вигляд кривих зміцнення характерний для більшості металів при динамічному навантаженні в умовах теплої, а іноді і гарячої деформації, коли метал руйнується раніше, ніж на кривих σ – ε досягається область стійкої течії. Криві плинності типу А зазвичай описуються рівнянням виду:

$$\sigma = к \blacktriangledown \varepsilon^{m}, \qquad (3.3.)$$

де к и m – константи даного матеріалу, що залежать від умов деформації.

У кривих типу Б опір деформації поступово досягає стабільної стадії, в металі інтенсивно проходить динамічний повернення з формуванням

полігонізованої субструктури. В області значних деформацій відбувається формування повністю полігонізованої структури, тобто в металі проходять процеси реполіголізації. Криві плинності типу Б згідно з моделлю Селларса описуються за допомогою рівняння:

$$\sigma = \left(\frac{BZ}{A}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-A^{I} \varepsilon^{kn^{I}}\right)\right], \qquad (3.4.)$$

де $Z = \varepsilon \blacktriangledown \exp(Q / RT)$; $B = m \blacktriangledown k^{1/m} \blacktriangledown k = M + (1/m) - 1$.

(3.5.)

Тут M – константа, A^I і n^I є функцією Z (параметра Зенера – Холломона).

Криві плинності типу Б спостерігаються у α–заліза і феритних сталей з низьким вмістом вуглецю.

Найбільш характерним видом кривої текучості металів в умовах гарячої деформації є крива типу В з яскраво вираженим максимумом значень опору деформації. Подібні криві характерні для більшості металів і сплавів в умовах гарячої деформації. Для аустенітної фази при різному вмісті вуглецю величина σ до максимуму зростає помірно; для сталей з перлітом і феритом при високому вмісті вуглецю спостерігається різке зростання опору деформації до гострого максимуму з подальшим зниженням σ до стабільної стадії.

З підвищенням температури максимум на кривих σ – ε зміщується в область менших значень деформацій, оскільки стадія деформаційного зміцнення скорочується і динамічне розм'якшення починається раніше. Збільшення швидкості деформації зміщує максимум в область великих значень ступеня деформації, оскільки при високих швидкостях початок динамічної рекристалізації затримується, хоча потім із зростанням ε цей процес проходить більш інтенсивно, ніж при низьких швидкостях. У той же час зменшенням швидкості деформації можна загальмувати динамічну рекристалізацію навіть при великих ступенях деформації.

3.2 Оцінка поля ліній ковзання при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки

При аналізі осередку деформації при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки в якості методики використовуємо метод ліній ковзання. Оцінка пластичного осередку деформації: зміна форми, розміри та напружено-деформований стан.

Метод ліній ковзання дозволяє вирішувати складні завдання пластичного течії металу шляхом знаходження можливих полів ковзання і виявлення епюр розподілу напруги і швидкостей деформацій. Застосування цього методу для задач плоскої деформації обмежується деякими умовами, якими є однорідність, ізотропність і неукріпність деформованого металу.

При побудові ліній ковзання передбачається наявність жорстко-пластичного металу, причому до жорстких областей відносяться як деформуючий інструмент, так і метал поза пластичною зоною. Приймається також, що жорсткий метал при перетині граничної лінії ковзання стрибкоподібно переходить у пластичний стан. Гранична лінія ковзання, як і будь-яка інша в полі пластичного течії, має постійне значення дотичного напруження, яке задовольняє умові пластичності.

Багато завдань пластичного формозміни можуть бути вирішені шляхом побудови ліній ковзання.

Одним з методів побудови використовується графічний метод.

Розглянутий метод графічного побудови сіток ліній ковзання дає задовільну для інженерних розрахунків точність вирішення тих задач, де застосовується рівнокутна сітка ліній ковзання. При побудові використовують викладені нижче положення. Рівнокутна сітка ліній ковзання з безперервною зміною кутів нахилу дотичних до ліній замінюється рівнокутною сіткою з ламаних ліній. Її елементарною коміркою служить чотирикутник, з якого 2 протилежних кути – прямі, а 2

інші рівні $\pi/2+\gamma$ і, де γ - малий кут. Якщо $\gamma \leq 15^{o}$, помилки в положенні вузлових точок сітки при графічному побудові менше 2 %.

Побудову ведуть на початкових ламаних з хорд, що замінюють відрізки пересічних кругових дуг з центральними однаковими кутами. Використовується індексація точок сітки двома цифрами, як і в рівнокутній сітці.

Зміна кутів нахилу ламаних в кожній точці однакова і рівна $\gamma/2$. Вісь симетрії перетинається ламаними під кутами $\pi/2 \pm \gamma/2$. Вище зазначалося, що стрибкоподібна зміна кута нахилу лінії ковзання відбувається, якщо вона перетинає лінію розриву напружень. Тому заміна сітки ліній ковзання з безперервною зміною кутів нахилу дотичних на сітку з ламаних відповідно до системи вихідних рівнянь рівнозначна введенню безлічі ліній розриву напружень. Вважають, що при малих значеннях кутового периметра сітки вплив цих розривів на напружений і деформований стан матеріалу несуттєвий.

Одним з найбільш зручних з графічного методу є «метод січної» (рис. 3.2).

Передбачається, що лінії ковзання A-P і A-B відомі і значення δQ постійно. Щоб знайти вузлову точку Q, необхідно з точок B і P провести хорди з відхиленнями від нормалей до криволінійних характеристик, рівних $1/2\delta Q$.

Знак кутів відхилень залежить від кривизни ліній ковзання, як показано на малюнку. Перетин таких хорд, проведених від точок B і P, визначає точку Q, тобто точку перетину наступної пари ліній ковзання кутового інтервалу δQ.

У нашому випадку розглядаємо операцію протягування круглої порожнистої заготовки, яка деформується ковальськими бойками: верхній плоский, нижній вирізний, з кутом вирізу 120°. (рис. 3.2).

В якості вихідної заготовки приймаємо заготовку з діаметром D = 300 мм і діаметром оправки d = 120 мм. Величина деформації дорівнює 3,5 % і граничні умови:

- в нашому випадку приймаємо контактні сили тертя на поверхні $\tau = 0$;
- необхідно задати розміри контактних поверхонь, тобто розміри комбінованих бойків. З умови сумісності переміщень для комбінованих бойків з кутом вирізу 120^o, співвідношення деформацій приймаємо $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 3/1$.

Знаходимо величини відносних деформацій від робочої поверхні верхнього плоского бойка - ε_1, і від робочої поверхні нижнього вирізного бойка - ε_2, ε_3, де $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$, оскільки задача осі симетрична.

1) Знаходимо величини абсолютних деформацій – ΔH.

$$\varepsilon_{ср} = 0{,}035 = 4 \text{ частини}$$

$$\varepsilon_{ср} = \Delta H/D; \qquad (3.6)$$

$$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 3/1 \; ; \; \varepsilon_1 = ¾ \; ; \; \varepsilon_3 = \varepsilon_2 \; ; \; \varepsilon_2 = ¼$$

Відносна деформація від робочої поверхні верхнього плоского бойка:

$$\varepsilon_1 = 3/4 \cdot 0{,}035 = 0{,}02625 = 2{,}625 \text{ \%}.$$

Абсолютна деформація від верхнього плоского бойка:

$$\Delta H_1 = 0{,}02625 \cdot 300 = 7{,}875 \text{ мм};$$

Абсолютна деформація від нижнього вирізного бойка:

$$\Delta H_2 = \Delta H_3 = 1/4 \cdot 0{,}035 \cdot 300 = 2{,}625 \text{ мм} ;$$

$$\Delta h_1 = 0{,}02625 \cdot 120 = 3{,}15 \text{ мм} ;$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_3 = 1{,}05 \text{ мм} ;$$

1) Знаходимо ширину контактних поверхонь:

$$a_1 = a_{1г} + \Delta a_1 \; ; \qquad (3.7)$$

де Δa_1 - величина розширення (подача), яка виникає за рахунок збільшення пластичної деформації;

$a_{1г}$ - геометричний осередок деформації

$$a_{1г} = \sqrt{R^2 - (R - \Delta H_i)^2} \quad (3.8)$$

Δa_1 – знаходимо, вирішуючи систему рівнянь

$$x^2 + y^2 = R^2 \text{ - рівняння кола} \quad (3.9)$$

$$x^2/a^2 + y^2/в^2 = 1 \text{ - рівняння еліпса} \quad (3.10)$$

$$y = R - \Delta H_i \text{ - рівняння прямої} \quad (3.11)$$

$$\Delta a_1 = AB = \sqrt{(x_в - x_а)^2 + (y_в - y_а)2}; \quad (3.12)$$

$$a_3 = a_2$$

$$a_{1г}/2 = \sqrt{R^2 - (R - \Delta H_1)^2} = 150^2 - (150 - 7.875)^2 = 47.96 \quad (3.13)$$

$$a_{1г} = 96 \text{ мм}$$

$$a_{2г}/2 = \sqrt{22500 - (150 - 2.625)^2} = 27.9$$

$$a_{2г} = a_{32} = 56 \text{ мм}$$

$$\begin{cases} x_a^2 + y_a^2 = 22500 \\ y_a = 142.125 \end{cases}$$

$$x_a = 47.96;\ y_a = 142.125$$

$$\begin{cases} x_в^2 / 178.8^2 + y_{в2} / 150^2 = 1 \\ y_в = 142.125 \end{cases}$$

$$x_в = 57.17;\ y_в = 142.125$$

$$AB = \Delta a_1 = \sqrt{(57.17 - 47.96)^2} = 9{,}21 \text{ мм}$$

$$\begin{cases} x_a^2 + y_a^2 = 22500 \\ y_a = 147.375 \end{cases}$$

$$x_a = 27.9;\ y_a = 147.4$$

$$\begin{cases} x_в^2 /178.8^2 + y_{в2} /22500 = 1 \\ y_в = 147.375 \end{cases}$$

$$x_в = 33.3;\ y_в = 147.375$$

$$\Delta a_2 = \Delta a_3 = 5.37 \text{ мм}$$

Аналогічно знаходимо ширину контактної поверхні для d=120 мм:

$$a_{1г}' = 38 \text{ мм};$$

$$\Delta a_{2г}' = \Delta a_{3г}' = 22 \text{ мм};$$

$$\Delta a_{1г}' = 1.5 \text{ мм}$$

$$\Delta a_2' = \Delta a_3' = 0.9 \text{ мм}$$

$$a_1' = a_{1г}' + \Delta a_1' \qquad (3.14)$$

$$a_2' = a_{2г}' + \Delta a_2' \qquad (3.15)$$

1) розширення ΔВ знаходимо із співвідношення:

$$\Delta В/Д = 0.08; \qquad (3.16)$$

$$\Delta в/Д = 0.04; \qquad (3.17)$$

$$\Delta в = 120 \cdot 0.04 = 4.8;$$

$$\Delta В = 0.08 \cdot 300 = 24 \text{ мм}$$

$$\Delta В_{общ} = 4.8 + 24 = 28{,}8 \text{ мм}$$

3.3 Розрахунок напружень при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням розширення і без розширення

3.3.1 Основи математичної моделі розрахунку напружень і деформацій

Завдання вивчення пластичного течії металів, що володіють відомими механічними властивостями, вирішуються методами, що дозволяють розраховувати параметри процесів деформування.

Теорія двовимірного пластичного течії дозволяє аналізувати розподіл напружень і деформацій в перерізах заготовки, проте подальше інтегрування цих явищ не виконано, і зворотна задача переходу до технологічних усереднених параметрів Ме вирішена. При невідомій формі осередку деформації, а також невідомих граничних умовах напружень і швидкостей корисним виявляється графоаналітичний метод дослідження.

Для оцінки повноти отриманого графічного рішення достатньо обчислити напруження в жорсткій області, які не повинні перевищувати межі плинності даного матеріалу.

З сукупності можливих кінематичних допустимих полів переміщень не можна виділити дійсне поле, користуючись лише положеннями теорії ідеального жорстко-пластичного тіла. У зв'язку з цим розглядають фізичні лінії ковзання. Єдине рішення системи рівнянь з класу кінематичних допустимих допомагає вибрати також експериментальне дослідження граничних умов. При вирішенні практичних завдань метод ліній ковзання дозволяє поєднувати фізичні передумови з високою математичною точністю, особливо коли в заготовці багато пластичних зон, і аналітичні розрахунки стають громіздкими. В даний час метод ліній ковзання – це єдиний метод, що дозволяє аналізувати розподіл напружень по перетину тіла. Повна система рівнянь плоского течії металу для напружень і швидкостей тільки в деяких випадках вирішується в замкнутому вигляді зазвичай чисельними або графічними методами. Якщо граничні умови задані в напруженнях, то поле напружень визначається незалежно від швидкостей. Коректне дослідження напружено-деформованого стану при об'ємному пластичному плині в даний час неможливо. Деформаційна теорія дозволяє застосувати метод послідовних наближень: знайти поле напружень, по ньому – деформаційні параметри, а потім скорегувати поле

напружень. Однак використовувати рівняння швидкостей не можна, так як виключається можливість застосування логарифмічних деформацій.

Суперечливі відомості про контактні зони ковзання і прилипання при ОМТ призвели до появи рішень, що не відображають реальної картини течії металу. Неповноту граничних умов дозволяє в якійсь мірі долати спільне рішення двох рівнянь за принципами Лагранжа і Кастільяна. Формулювання і дослідження граничних умов представляє самостійну проблему, що визначає відмінність технологічних завдань обробки металів тиском від інших завдань теорії пластичності. При побудові точного математичного рішення задач ОМТ основне обмеження пов'язане з формулюванням фізичного закону тертя на контактних поверхнях; коефіцієнт тертя виражають іноді як відношення дотичного напруження на контактній поверхні до максимального значення. Для оцінки повноти отриманого рішення достатньо обчислити напруження в жорсткій області, які не повинні перевищувати межі плинності.

3.3.2 Розрахунок напружень у осередку деформацій

Для знаходження величини тензора напружень у будь-якій точці сітки ліній ковзання даного осередку деформації необхідно в першу чергу оцінити напруження, що діють на контактній площадці інструменту із заготовкою.

З граничних умов випливає, що на контактній площадці діють нормальне напруження $\sigma_н$ і дотичне напруження тертя, рівне К. При цьому К = const.

Напруження $\sigma_н$ буде дорівнювати середньому контактному тиску Р1, взятому зі знаком мінус (оскільки діючі напруження – стискаючі), величину якого з точністю до 2% можна визначити за формулою:

$$P = 2K \cdot (1{,}25\ln\eta + 1{,}25/\eta - 0{,}25) \qquad (3.18)$$

де $\eta=2r/B_y$;

r - глибина осередку деформації;

B_y - протяжність контактної поверхні.

Наведена формула справедлива для інтервалу $1 < \eta < 8{,}5$. При $\eta > 8{,}5$ питомий тиск визначається за формулою Прандтля:

$$P = 2K \cdot (1+\pi/2) \approx 5{,}14K \qquad (3.19)$$

При дії на контактній площадці максимального тертя r = K лінії ковзання одного сімейства підходять до неї під кутом $\pi/2$. Головні напруження σ_x і σ_z утворюють з лінією ковзання кут, рівний $\pi/4$. В силу цього можна записати вираз для напруження σ_H:

$$\sigma_H = \sigma_x \cdot \alpha_1^2 + \sigma_z * \alpha_3^2 \qquad (3.20)$$

де: $\alpha_1 = \alpha_3 = \sqrt{2}/2$ - напрямні косинуси головних напружень.

Після підстановки значень отримали:

$$\sigma_H = \sigma_x \cdot ½ + \sigma_z \cdot ½ = ½(\sigma_x + \sigma_z), \qquad (3.21)$$

тобто нормальне напруження на контактній поверхні дорівнює середньому нормальному напруженню σ, звідки отримали:

$$\sigma_{конт} = - P \qquad (3.22)$$

Величину головних напружень знайшли з рівнянь:

$$½(\sigma_x + \sigma_z) = - P \qquad (3.23)$$

де P - середня напруга в точках контактної поверхні.

Згідно з умовою пластичності для плоскої задачі:

$$(\sigma_x - \sigma_z) = 2K \qquad (3.24.)$$

Вирішуючи систему, отримаємо:

$$\sigma_x = - P + K \qquad (3.25)$$

$$\sigma_z = - P – K \qquad (3.26)$$

Величина дотикової напруги:

$$r_{zx} = +\text{-}\ ½(\sigma_3 - \sigma_1) = K \qquad (3.27)$$

Напруги в точках [0,0] будуть дорівнювати напругам на контактній площадці.

Напругу в точках [m, n] поля розрахували за формулою:

$$\sigma_{mn} = \sigma_{oo} - 2K \cdot (m + n) \cdot j \qquad (3.28.)$$

$$\sigma_{x\,mn} = \sigma_{oo} - 2K \cdot (m + n) \cdot j - K \cdot \sin(\sigma_{oo} + (n - m)j) \ ; \qquad (3.29.)$$

$$\sigma_{z\,mn} = \sigma_{oo} - 2K \cdot (m + n) \cdot j + K \cdot \sin(\sigma_{oo} + (n - m)j) \ ; \qquad (3.30)$$

$$\tau_{zx} = K \cdot \cos2(\sigma_{oo} + (n - m)j) \ ; \qquad (3.31)$$

Результати розрахунку напружень при куванні заготовки наведені в таблиці 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 - Значення напружень без розширення

Координати	$\sigma_x/2R$	$\sigma_z/2R$	$\tau_{zx}/2к$
0,0	-2.4	-2,4	-0,49
1,2	-0,72	-1,075	-0,49
2,2(1,1)	-1,01	-1,05	-0,49
0,0	-2,3	-2,3	-0,49
3,7	-2,8	-2,8	0,49
3,5	-2,546	-2,587	0,49
3,3	-2,19	-2,2	0,49
2,3	-1,6	-1,63	0,49
1,3	-1,15	-1,19	0,49
0,0	-2,,7	-2,7	0,49

Таблиця 3.2 - Значення напружень із розширенням

Координати	$\sigma_x/2К$	$\sigma_z/2К$	$\tau_{zx}/2к$
0,0	-2,3	-2,3	-0,49
1,1	-0,09	-1,03	-0,49
0,0	-2,3	-2,3	-0,49
2,7	-1,4	-1,5	0,49
2,4	-1,4	-1,5	0,49
2,2	-1,3	-1,4	0,49
1,2	-1,03	-1,07	0,49
0,0	-2,4	-2,4	0,49

3.4 Алгоритм розрахунку напружень при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням зміцнення

Використання методу ліній ковзання передбачає такі основні припущення: об'єм металу включає в себе жорстку і пластичну області, розділені лініями ковзання, які є лініями розриву швидкостей. Деформований метал підпорядковується умові ідеальної пластичності:

$$\sigma_i = \sigma_s = const. \tag{3.32}$$

У реальних процесах внаслідок деформаційного зміцнення

$$\sigma_s \neq const. \tag{3.33}$$

При використанні методу ліній ковзання в розрахунку будемо використовувати σ_S, що змінюється в залежності від прикладених напружень і отриманих деформацій, тобто з урахуванням деформаційного зміцнення металу.

У розрахунку напружень методом ліній ковзання приймається:

$$K = \sigma_s / \sqrt{3} = \text{const}, \tag{3.34}$$

де: К – пластична постійна;

σ_s - опір деформації.

Тобто опір деформації σ_s вважається величиною постійною. При пластичній обробці металів опір деформації $\sigma_s \neq$ const через зміцнення металів. Таким чином, при визначенні напруженого стану металу за методом ліній ковзання з'являлася деяка похибка. Цю похибку можна усунути, врахувавши зміну опору деформації в процесі зміцнення при гарячій деформації металу.

Залежність опору деформації від ступеня деформації має вигляд:

$$\sigma = \sigma_0 \blacktriangledown \varepsilon^m, \tag{3.35}$$

де σ – опір деформації;

σ_0 – опір деформації при початкових значеннях деформації; m - коефіцієнт зміцнення.

Значення σ_0 і m були отримані за кривими зміцнення з літературних даних [9].

Визначення напруженого стану металу з урахуванням зміцнення проводилося наступним чином: за величиною середніх деформацій у точках перетину ліній ковзання визначалося напруження опору деформації металу в цих точках.

Рівняння зв'язку між напруженнями опору деформації та деформацією для сталі 20 при температурі 900 °С має такий вигляд:

$$\sigma_{mn}' = 86.8 \blacktriangledown \varepsilon_{mn}^{0.2266}. \quad (3.36)$$

Аналогічно складаються рівняння деформаційного зміцнення і для інших марок сталей при різних температурах деформації.

1) Знаходження величини К в точках поля ліній ковзання.

$$K = \sigma_{mn}' / \sqrt{3}. \quad (3.37)$$

1) Визначення величини середнього контактного тиску Р:

а) при $1 < \eta < 8{,}5$:

$$P = 2K \blacktriangledown (1{,}25\ln\eta + 1{,}25/\eta - 0{,}25) \quad (3.38)$$

б) при $\eta > 8{,}5$:

$$P = 5.14 \blacktriangledown K_{oo} \quad (3.39)$$

2) Визначення напружень у точках поля ліній ковзання:

$$\sigma_{oo} = -P; \quad (3.40)$$

$$\sigma_{1\,oo} = -P + K_{oo}; \quad (3.41)$$

$$\sigma_{2\,oo} = -P - K_{oo}; \quad (3.42)$$

$$\tau_{oo} = K_{oo}; \quad (3.42.)$$

$$\sigma_{mn} = \sigma_{oo} - 2K \blacktriangledown (m + n) \blacktriangledown \gamma \quad (3.43.)$$

$$\sigma_{x\,mn} = \sigma_{oo} - 2K \blacktriangledown (m + n) \blacktriangledown \gamma - K \blacktriangledown \sin(\sigma_{oo} + (n - m) \blacktriangledown \gamma); \quad (3.44.)$$

$$\sigma_{z\,mn} = \sigma_{oo} - 2K \blacktriangledown (m + n) \blacktriangledown \gamma + K \blacktriangledown \sin(\sigma_{oo} + (n - m) \blacktriangledown \gamma); \quad (3.45.)$$

$$\tau_{zx} = K \blacktriangledown \cos 2(\sigma_{oo} + (n - m) \blacktriangledown \gamma); \qquad (3.46.)$$

3.5 Оптимізація технологічних параметрів при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням зміцнення

При куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки з урахуванням зміцнення великий вплив мають технологічні параметри, такі як: деформація, відносна подача, осередок деформації, геометричні розміри заготовки. Використання отриманого розрахунково-аналітичного апарату для фактичних умов кування дозволяє визначити оптимальні параметри кування, при яких напружений стан металу найбільш сприятливий – наявність мінімальних розтягуючих напружень.

Метод ліній ковзання дозволяє визначати напружено-деформований стан металу при одиничних стисканнях порядку 1 – 23 %.

Як приклад, розрахунки проводилися для вуглецевої сталі 20, яка має найбільш повний набір характеристик, при одиничних стисканнях 3,5 - 20 % і відносних подачах 0,2 - 1,2.

Значення напружень σ і σ_x для точки [0,0] і точки [m,n], що відповідає осьовій зоні поковки, наведені в табл. 3.3 і табл. 3.4. Граничні умови: на контактній площадці діють нормальне напруження $\sigma_н$ і дотичне напруження тертя, рівне К.

При розрахунку рівнокутна сітка ліній ковзання з безперервною зміною кутів нахилу дотичних замінюється рівнокутною сіткою з ламаних ліній. Слід зазначити, що у зв'язку із заміною в полі ліній ковзання кривих ламаними лініями вноситься похибка у визначення величини середнього нормального напруження. Ця похибка пов'язана з порушенням ортогональності поля в межах половини кута розбиття.

Запропонований алгоритм рішення реалізований у програмному забезпеченні ЕОМ. Для оцінки адекватності математичної моделі розрахунку напружень при куванні-протягуванні круглої порожнистої заготовки розрахункові значення порівняли з даними напружень, наведеними у літературі [9] для однакових граничних умов.

Таблиця 3.3 - Середня нормальна напруга σ, при $t_{ковки}$ = 900°С

a_o/D_o	Осередок деформації, мм	ε	Без зміцнення		Зі зміцненням	
			[0,0]	[m,n]	[0,0]	[m,n]
1	2	3	4	5	6	7
0,2	Від бойка 300	4.7	-35,9	-23,5	-45,2	-30,5
		6.7	-35,7	-23,4	-44,98	-30,3
		10	-35,5	-23,1	-44,7	-30
		13.3	-35,3	-23	-44,5	-29,8
		16.6	0	12,3	0	13,7
		20	0	12,3	0	13,7
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	0	7,78	0	8,67
		16.6	0	7,78	0	8,67
		13.3	-22,3	-14,5	-28,2	-18,86
		10	-22,5	-14,6	-28,3	-18,98
		6.7	-22,6	-14,8	-28,5	-19,2
		4.7	-22,72	-14,9	-28,6	-19,3
0,3	Від бойка 300	4.7	-35,9	-23,6	-45,3	-30,6
		6.7	-35,7	-23,3	-45	-30
		10	-35,5	-23,2	-44,7	-30
		13.3	-35,4	-23	-44,5	-29,9
		16.6	0	12,3	0	13,7
		20	0	12,3	0	13,7
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	0	7,78	0	8,67
		16.6	0	7,78	0	8,67
		13.3	-22,4	-14,5	-28,16	-18,92
		10	-22,5	-14,68	-28,29	-18,99
		6.7	-22,6	-14,74	-28,48	-18,99
		4.7	-22,7	-14,9	-28,67	-19,36
0,4	Від бойка 300	4.7	-35,9	-23,6	-45,3	-30,6
		6.7	-35,7	-23,4	-45	-30,4
		10	-35,5	-23,2	-44,7	-30,1
		13.3	-35,4	-23,1	-44,5	-29,9
		16.6	-35,3	-23	-44,5	-29,8
		20	0	12,3	0	13,7
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	0	7,78	0	8,67

	120	16.6	-22,34	-14,56	-28,16	-18,86
		13.3	-22,4	-14,62	-28,16	-18,92
		10	-22,47	-14,68	-28,29	-19,05
		6.7	-22,59	-14,81	-28,48	-19,24
		4.7	-22,72	-14,94	-28,67	-19,37
0,5	Від бойка 300	4.7	-35,9	-23,6	-45,3	-30,6
		6.7	-35,8	-23,4	-45,1	-30,4
		10	-35,6	-23,2	-44,8	-30,1
		13.3	-35,4	-23,1	-44,6	-29,9
		16.6	-35,3	-23	-44,5	-29,9
		20	0	12,3	0	13,7
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	0	7,78	0	8,67
		16.6	-22,34	-14,56	-28,16	-18,92
		13.3	-22,4	-14,62	-28,23	-18,92
		10	-22,53	-14,68	-28,35	-19,05
		6.7	-22,66	-14,81	-28,54	-19,24
		4.7	-22,72	-14,94	-28,67	-19,37
0,6	Від бойка 300	4.7	-35,96	-23,6	-45,4	-30,7
		6.7	-35,8	-23,5	-45,1	-30,4
		10	-35,6	-23,3	-44,9	-30,2
		13.3	-35,5	-23,1	-44,6	-29,98
		16.6	-35,4	-23	-44,5	-29,8
		20	0	12,3	0	13,7
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	0	7,78	0	8,67
		16.6	-22,4	-14,56	-28,16	-18,86
		13.3	-22,47	-14,62	-28,23	-18,97
		10	-22,53	-14,75	-28,42	-19,11
		6.7	-22,66	-14,87	-28,54	-19,24
		4.7	-22,76	-14,94	-28,73	-19,43
0,7	Від бойка 300	4.7	-35,98	-23,7	-45,4	-30,7
		6.7	-35,8	-23,5	-45,2	-30,5
		10	-35,7	-23,3	-44,9	-30,2
		13.3	-35,5	-23,2	-44,7	-30
		16.6	-35,4	-23	-44,5	-29,9
		20	-35,3	-23	-44,5	-29,8
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	-22,34	-14,56	-28,16	-18,86
		16.6	-22,40	-14,56	-28,16	-18,92
		13.3	-22,47	-14,68	-28,9	-18,99

		10	-22,59	-14,76	-28,42	-19,11
		6.7	-22,66	-14,87	-28,61	-19,30
		4.7	-22,78	-15	-28,73	-19,43
0,8	Від бойка 300	4.7	-36	-23,7	-45,4	-30,7
		6.7	-35,9	-23,6	-45,2	-30,6
		10	-35,7	-23,4	-44,97	-30,3
		13.3	-35,5	-23,2	-44,8	-30,1
		16.6	-35,4	-23,1	-44,6	-29,9
		20	-35,4	-23	-44,5	-29,8
		23.3	0	12,3	0	13,7
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	0	7,78	0	8,67
		20	-22,40	-14,56	-28,16	-18,86
		16.6	-22,40	-14,62	-28,23	-18,92
		13.3	-22,47	-14,68	-28,35	-19,05
		10	-22,59	-14,81	-28,46	-19,18
		6.7	-22,72	-14,94	-28,61	-19,37
		4.7	-22,78	-15	-28,73	-19,43
0,9	Від бойка 300	4.7	-36	-23,7	-45,5	-30,8
		6.7	-35,9	-23,6	-45,3	-30,6
		10	-35,7	-23,4	-45	-30,3
		13.3	-35,6	-23,3	-44,8	-30,1
		16.6	-35,5	-23,1	-44,6	-29,98
		20	-35,4	-23	-44,5	-29,9
		23.3	-35,3	-23	-44,5	-29,8
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	-22,34	-14,56	-28,16	-18,86
		20	-22,40	-14,56	-28,16	-18,92
		16.6	-22,47	-14,62	-28,23	-18,98
		13.3	-22,53	-14,75	-28,35	-19,05
		10	-22,59	-14,81	-28,48	-19,18
		6.7	-22,72	-14,94	-28,67	-19,37
		4.7	-22,78	-15	-28,79	-19,49
1,0	Від бойка 300	4.7	-36,1	-23,7	-45,5	-30,8
		6.7	-35,7	-23,6	-45,3	-30,6
		10	-35,8	-23,4	-45,1	-30,4
		13.3	-35,6	-23,3	-44,9	-30,1
		16.6	-35,5	-23,1	-44,7	-30,0
		20	-35,4	-23,1	-44,6	-29,91
		23.3	-35,4	-23	-44,5	-29,8
		26.7	0	12,3	0	13,7
	Від оправки 120	26.7	0	7,78	0	8,67
		23.3	-22,4	-14,56	-28,16	-18,86
		20	-22,4	-14,62	-28,23	-18,93
		16.6	-22,47	-14,62	-28,29	-18,98
		13.3	-22,53	-14,74	-28,42	-19,05
		10	-22,66	-14,81	-28,54	-19,24
		6.7	-22,59	-14,93	-28,67	-19,38

		4.7	-22,85	-15	-28,79	-19,49
1,1	Від бойка 300	4.7	-36,1	-23,8	-45,5	-30,8
		6.7	-35,98	-23,7	-45,4	-30,7
		10	-35,8	-23,5	-45,2	-30,5
		13.3	-35,7	-23,4	-44,95	-30,3
		16.6	-35,6	-23,2	-44,8	-30,1
		20	-35,5	-23,1	-44,6	-29,97
		23.3	-35,4	-23,1	-44,5	-29,9
		26.7	-35,3	-23	-44,5	-29,8
	Від оправки 120	26.7	-22,34	-14,56	-28,16	-18,06
		23.3	-22,40	-14,62	-28,16	-18,92
		20	-22,47	-14,62	-28,23	-18,97
		16.6	-22,53	-14,68	-28,35	-19,05
		13.3	-22,59	-14,81	-28,45	-19,18
		10	-22,66	-14,87	-28,61	-19,30
		6.7	-22,77	-15	-28,73	-19,43
		4.7	-22,85	-15,06	-28,79	-19,49
1,2	Від бойка 300	4.7	-36,1	-23,8	-45,6	-30,9
		6.7	-36,0	-23,7	-45,4	-30,7
		10	-35,9	-23,5	-45,2	-30,5
		13.3	-35,7	-23,4	-45	-30,4
		16.6	-35,6	-23,3	-44,9	-30,2
		20	-35,5	-23,2	-44,7	-30
		23.3	-35,4	-23,1	-44,6	-29,9
		26.7	-35,3	-23	-44,5	-29,8
	Від оправки 120	26.7	-22,34	-14,56	-28,16	-18,86
		23.3	-22,40	-14,62	-28,23	-18,92
		20	-22,47	-14,68	-28,29	-18,99
		16.6	-22,53	-14,75	-28,42	-19,11
		13.3	-22,59	-14,81	-28,48	-19,24
		10	-22,72	-14,87	-28,61	-19,30
		6.7	-22,78	-15	-28,73	-19,43
		4.7	-22,85	-15,06	-28,86	-19,55

Деформаційне зміцнення сприяє як зниженню розтягуючих напружень в осьовій зоні поковки, так і їх збільшенню в залежності від конкретних умов деформації, характеристик осередку деформації та геометричних розмірів заготовки.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Загальні заходи безпеки праці при виконанні дослідницької роботи

Згідно з СН 245 – 71 приміщення обчислювального центру, їх розміри (площа, об'єм) повинні відповідати кількості працюючих і розміщеному в них комплексу технічних засобів. У них передбачаються відповідні параметри температури, освітленості тощо.

Робота проводилася в лабораторії обчислювальної техніки кафедри МТЕТБ.

Розміри лабораторії 7 · 3 · 3 м.

Загальний об'єм лабораторії 63 м^3.

Загальна площа 21 м^2.

Коефіцієнт заповнення площі:

$$K = \frac{S_{обор.}}{S_{общ.}} = \frac{6}{21} = 0{,}29. \qquad (4.1.)$$

Таблиця 4.1 - Характеристика приміщення (на 1 працюючого)

Параметр	Рекомендована СН 245 - 71	Лабораторія
Площа	4,5 м^2	5,1 м^2
Об’єм	15 м^3	15,75 м^3

Фарбування приміщення відповідає загальним рекомендаціям при фарбуванні приміщень обчислювальної техніки. Поверхня підлоги рівна, без вибоїн, не слизька, зручна для очищення і вологого прибирання, має антистатичні властивості.

Характеристика ПЕОМ

Конструкція відеомонітора забезпечує можливість фронтального спостереження екрану шляхом повороту корпусу в горизонтальній

площині навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^{o}$ і в вертикальній площині навколо горизонтальної осі в межах $\pm 15^{o}$ з фіксацією в даному положенні.

Корпуси клавіатури, відеомонітора і системного блоку мають матову поверхню і не мають блискучих деталей, здатних створювати відблиски.

Таблиця 4.2 - Значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Параметр	Допустиме	Дійсне
Напруженість ЕМП по електричній складовій на відстані 0,5 м від відеомонітора	10 в/м	8 в/м
Напруженість ЕМП по магнітній складовій на відстані 0,5 м від відеомонітора	0,3 а/м	0,1 а/м
Напруженість електростатичного поля	15 кв/м	10 кв/м

Обладнання робочого місця

Висота робочої поверхні столу над рівнем підлоги 0,8 м.

Простір для ніг – 0,7 м.

Екран відеомонітора знаходиться на відстані 0,6 м від робочого місця.

Клавіатура розташовується на поверхні столу на відстані 0,1 м від краю.

Поверхня сидіння і спинка крісла напівм'які, з неслизьким, неелектролізуючим покриттям, що забезпечує легке очищення від забруднень.

Мікроклімат приміщення

З метою створення нормальних умов для персоналу обчислювальних центрів встановлені норми виробничого мікроклімату в робочій зоні (ДСТУ 12.1.005 – 88).

Чинні санітарні норми для обчислювальних центрів СН 2.2.2. 542 – 96 встановлюють конкретні допустимі та оптимальні значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для робочої зони.

Таблиця 4.3 - Порівняльні параметри повітряного середовища на робочих місцях

Параметр	Температура, ºС	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Оптимальні	20 - 23	40 - 60	0,1
Допустимі	19 - 25	75 і більше	0,3
Дійсні	21 - 23	45	0,2

Робота проводилася в теплу пору року.

Категорія роботи – легка I а, оскільки робота проводилася сидячи і не вимагала фізичного навантаження.

Як видно з таблиці, параметри повітряного середовища в приміщенні, де проводилося дослідження, не виходять за межі допустимих і наближаються до оптимальних.

Характеристики умов зорової роботи

У лабораторії обчислювальної техніки кафедри МТЕТБ, де проводилася робота, освітлення штучне, загальне.

Робота проводилася в режимі діалогу з ЕОМ у поєднанні з роботою над документами.

Характеристика зорової роботи – дуже високої точності, оскільки найменший розмір об'єкта розрізнення 0,15 мм.

Розряд зорової роботи 2а.

Освітленість, рекомендована СНіП 23-05-95 для цих умов – 400 лк.

Джерела світла: світильники типу УСП – 35 з двома люмінесцентними лампами типу ЛБ – 40.

Кількість світильників: N = 2 шт.

Коефіцієнт запасу: $К_З$ = 1,4. (при пробої та відсутності захисного заземлення), при порушенні елементарних правил електробезпеки.

Площа приміщення: S = 21 м^2.

Коефіцієнт нерівномірності освітлення: z = 1,15

Кількість рядів світильників: n = 1.

Світловий потік, випромінюваний світильником: $Ф_{св.}$ = 3120 лм.

Індекс приміщення: i = 0,95.

$$i = \frac{A * B}{h * (A + B)} = \frac{7 * 3}{2{,}2 * (7 + 3)} = 0{,}95,$$

де $A = 7м.$ – довжина приміщення;

$B = 3$ *м.* – ширина приміщення;

$H = 3 - 0{,}8 = 2{,}2$ *м* – відстань від робочої поверхні столу до світильника.

Коефіцієнт використання випромінюваного світильниками світлового потоку: η =0,45.

Коефіцієнт затемнення: γ = 1

Освітленість приміщення:

$$E = \frac{N * n * Ф_{св.} * \eta * \gamma}{K_З * S * z} = \frac{2 * 1 * 6240 * 0{,}45 * 1}{1{,}4 * 2{,}1 * 1{,}15} = 166 Лк. < E_н = 400\ Лк. \qquad (4.2)$$

Освітленість приміщення Е = 166 Лк, що менше нормативної освітленості $Е_н$ = 400 Лк, рекомендованої СНіП 23-05-95 для проведеної роботи.

Розрахунок кількості світильників:

$$N = \frac{E_н * K_З * Z * S}{n * \gamma * \eta * Ф_{св}} = \frac{400 * 1{,}4 * 21 * 1{,}15}{1 * 6240 * 0{,}45 * 1} = 5 шт. \qquad (4.3.)$$

Необхідна кількість світильників: $N = 5$ *шт.*

Загальна довжина ряду світильників типу УСП – 35: $L_{св} = 1{,}27 \cdot 5 = 6{,}35$ *м.*

Сумарна світлотехнічна потужність лабораторії кафедри МТЕТБ:

$$\sum P = P_л * N * n = 40 \cdot 5 \cdot 2 = 400\ Вт. \qquad (6.4.)$$

Захист від ураження електричним струмом

Ураження користувача ЕОМ електричним струмом може статися при дотику до струмопровідних провідників, при дотику до корпусу ЕОМ.

ЕОМ працює від мережі з напругою 220 В, тому розглянуті нижче заходи безпеки відносяться до мереж з напругою до 1000 В.

Організаційні заходи захисту:

1. Виконання всіх діючих норм і правил (правил улаштування електроустановок (ПУЕ), правил технічної експлуатації та правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ і ПТБ)).
2. Дотримання діючих класифікацій
3. Коефіцієнт заповнення площі: К = 0,29.
4. Приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом.
5. Виконання відповідних інструкцій з ведення робіт у лабораторії обчислювальної техніки.
6. Планово-попереджувальний ремонт обладнання

Санітарні заходи захисту:

А) Мережеві електричні дроти захищені від пошкодження, оскільки розташовані в металевих трубах, що мають заземлення.

Б) Приміщення лабораторії сухе, підлога покрита полівінілхлоридним антистатичним лінолеумом марки АСН.

Технічні заходи захисту:

1. Захист від дотику.

1.1 З'єднувальні дроти та кабелі мають полівінілхлоридну ізоляцію. Опір ізоляції 0,5 МОм, оскільки напруга мережі менше 1000 В. Електропроводка виконана в прихованому вигляді.

1.2 Захист від короткого замикання.

Коротке замикання може статися при нагріванні окремих частин ЕОМ, оплавленні з'єднувальних проводів і їх оголенні.

Для захисту від короткого замикання в ЕОМ передбачені запобіжники.

1.3 Захист від пробою фази на корпус.

Для захисту від пробою фази на корпус використовується контурне захисне заземлення.

2. Захист від статичної електрики.

У обчислювальних центрах розрядні струми статичної електрики найчастіше виникають при дотику обслуговуючого персоналу до будь-якого з елементів ЕОМ. Такі розряди не становлять небезпеки для людини, однак, крім неприємних відчуттів, вони можуть призвести до виходу з ладу ЕОМ.

Для зниження величини зарядів статичної електрики, що виникають, в обчислювальних центрах покриття технологічних підлог виконується з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму марки АСН. Місцеве зволоження повітря також сприяє зниженню величини зарядів статичної електрики, що виникають.

3. Захист від електромагнітних полів

1. Організаційні заходи захисту:

1.1 Виконання чинних СН, ДСТУ ССБТ, ТУ, експлуатації ЕОМ;

1.2 Дотримання режиму роботи на ЕОМ. Проведена робота відноситься до групи В – Творча робота в режимі діалогу з ЕОМ в поєднанні з роботою над документами. Робота проводилася по дві години з перервою 15 хвилин при допустимому часі роботи три години безперервно.

4. Санітарні заходи захисту:

1. ЕОМ розміщується в приміщенні 1-го ступеня пожежонебезпеки.

2. Приміщення регулярно провітрюється.

5. Технічні заходи захисту:

1. Застосування захисного заземлення.

2. Корпус ЕОМ має екрануючі властивості.

4.2 Характеристика пожежної небезпеки

Будівля, в якій проводилися дослідження 1-го ступеня вогнестійкості.

Таблиця 4.4 - Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій

Елементи конструкцій	Час (год.)
Стіни несучі, сходові клітки	2,5
Стіни самонесучі	1,25
Стіни зовнішні несучі	0,5
Стіни внутрішні несучі	0,5
Сходові майданчики, сходинки	1
Плити, настили та інші несучі конструкції перекриттів	1

Можливі причини пожежі

У сучасних ЕОМ дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовані з'єднувальні дроти, комутаційні кабелі. При проходженні по ним електричного струму виділяється значна кількість тепла, що може призвести до підвищення температури окремих вузлів до 80-100 ºС. При

цьому можливе оплавлення з'єднувальних проводів і, як наслідок, коротке замикання, що в свою чергу може призвести до пожежі.

Для зменшення нагрівання окремих вузлів в корпусах сучасних ЕОМ встановлюють вентилятори. Для гасіння пожежі в приміщеннях обчислювального центру встановлюють вуглекислотні вогнегасники типу ОУ – 2, ОУ – 5, ОУ – 8 або порошкові вогнегасники типу ОП – 5 – 01. У лабораторії обчислювальної техніки кафедри є схема евакуації при пожежі.

4.3 Вимоги охорони праці при роботі в лабораторії обчислювальної техніки

1.Загальні вимоги охорони праці:

1.1. До роботи в лабораторії можуть бути допущені тільки співробітники, ознайомлені з можливими джерелами загоряння, способами гасіння пожежі та які пройшли інструктаж у встановленій формі.

1.2. Первинний допуск до самостійної роботи в лабораторії співробітників та інших осіб здійснює завідувач лабораторії після первинного (вступного) інструктажу з охорони праці та розпису інструктованого в журналі.

1.3. Кожен співробітник лабораторії повинен знати розташування рубильників, вимикачів, вогнегасників і вміти користуватися ними, а також вміти надавати першу медичну допомогу.

1.4. Робота в лабораторії допускається тільки в присутності відповідальної або посадової особи (інженера-програміста, техніка). Співробітники зобов'язані виконувати всі його вимоги, що стосуються внутрішнього розпорядку лабораторії.

1.5. З працівниками в лабораторії проводиться інструктаж з охорони праці. Його проводить відповідальний співробітник лабораторії, після чого вони розписуються в контрольному листі інструктажу.

Вимоги охорони праці перед початком роботи:

2.1. Переконатися в справності захисного заземлення.

2.2. Переконатися в тому, що місцеві вимикачі на ПЕОМ, периферійному обладнанні (відеомоніторі тощо) знаходяться у вимкненому положенні, вилки або відключені, або правильно вставлені в розетки.

Вимоги охорони праці під час роботи:

3.1. Увімкнення ПЕОМ здійснюється в такій послідовності:

а) увімкнути вимикач відеомонітора;

б) увімкнути, за необхідності, в будь-якій послідовності інше периферійне обладнання;

в) увімкнути вимикач системного блоку ПЕОМ.

3.2. У лабораторії забороняється:

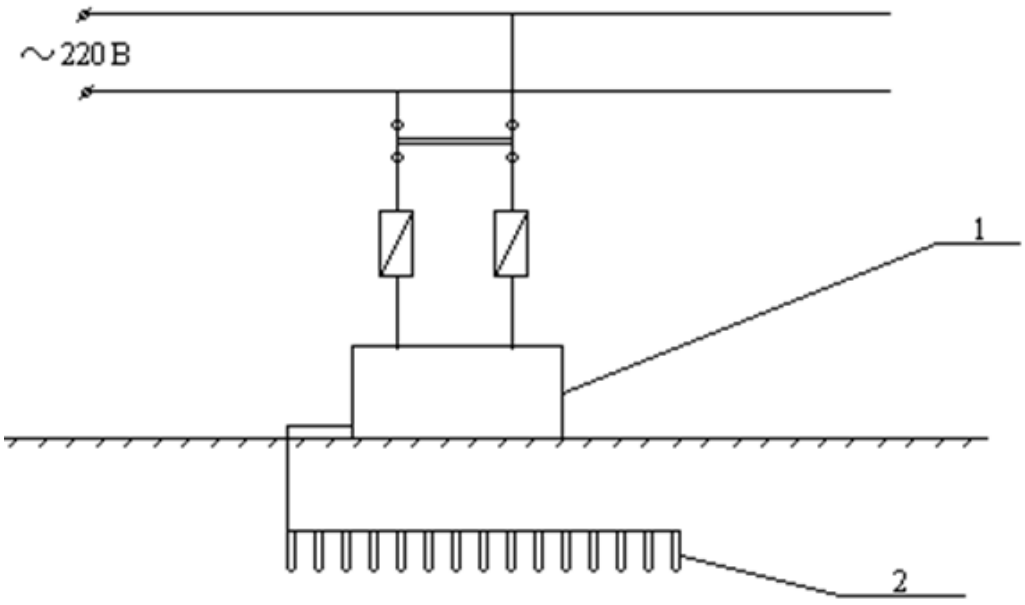
А) перебування у верхньому одязі;

Б) захаращення обладнання та столів верхнім одягом, сумками та іншими сторонніми предметами;

В) самовільне винесення обчислювальної та іншої техніки;

Г) самовільне вмикання та вимикання силового електроживлення.

4.4 Розрахунок заземлення



1 – ЕОМ; 2 – заземлювачі

Рисунок 4.1 - Схема захисного заземлення

Розрахунок захисного заземлення.

1. Опір одиночного заземлювача:

$$R_{03} = \frac{0{,}366\rho}{l} * (lg\frac{2l}{d_{екв.}} + \frac{1}{2} * lg\frac{4t+l}{4t-l}), \qquad (4.5.)$$

де $\rho = 100$ *Ом·см.* – питомий опір ґрунту;

l = 3,5 м – довжина заземлювача;

h = 0,65 м – глибина закладання заземлювача;

$t = h + ½ \cdot l = 0,65 + 1,75 = 2,4$ *м*

$d_{екв.}$ – еквівалентний діаметр.

$$D_{екв.} = 0,95 \cdot B = 0,95 * 0,05 = 0,0475 \text{ м.}$$

B = 0,05 – ширина кутка.

$R_{03} = 22,83$ *Ом.*

2. Приблизне число заземлювачів:

$$n = \frac{R_{03}}{R_{34}} = \frac{22,83}{4} = 5шт.$$

де $R_{34} = 4$ – нормативна величина опору заземлювача для мереж з напругою менше 1000 В.

3. Відстань між заземлювачами:

$$m = 2 * l = 3,5 * 2 = 7м.$$

Коефіцієнт використання заземлювача: $\eta_{e3} = 0,7$

4. Середнє число заземлювачів з урахуванням їх екранування:

$$n_э = \frac{n}{\eta_{e3}} = \frac{5}{0,7} = 7шт.$$

5. Довжина провідників, що з'єднують заземлювачі:

$$l_n = 1,05 * m * n = 1,05 * 7 * 7 = 51,45м.$$

6. Запобігання розтіканню струму для заземлюючих провідників круглого перетину:

$$R_{nk} = \frac{0,366 * \rho}{l_n} * Ln\frac{2 * l_n^2}{d_1 * t} = \frac{0,366 * 100}{51,45} * Ln\frac{2 * 51,45^2}{0,005 * 2,4} = 9,23 \ Ом.$$

$D_1 = 0,005$ *м* – діаметр заземлюючих провідників.

7. Дійсне спостереження заземлюючого провідника з урахуванням взаємного екранування заземлювачів і заземлюючих провідників:

$$R_{nk}{}^1 = \frac{R_{nk}}{\eta_{ek}} = \frac{9,23}{0,455} = 20,3 \ Ом.$$

8. Опір розсіканню струму всього заземлювального пристрою:

$$R_{зк} = \frac{R_{nk} + R_{nk}^1}{R_{03} * \eta_к + \eta_{e3} * R_{nk}^1 * n} = \frac{9,23 + 20,3}{22,83 * 0,455 + 20,3 * 0,7 * 5} = 1,6Ом.$$

Опір заземлюючого пристрою $R = 1,6$ *Ом*, що менше нормованого опору заземлювача $R_н = 4$ *Ом* для мереж з напругою менше 1000 В.

9. Уточнена кількість заземлювачів:

$$n_з = \frac{R_{03}}{R_{зк} * \eta_{e3}} = \frac{22,83}{0,7 * 1,6} = 20 \ шт.$$

ВИСНОВКИ

1. При стисненні круглої порожнистої заготовки плоскими, ромбічними або комбінованими бойками в металі можуть виникати розтягуючі напруження. Якщо рівень розтягуючих напружень перевищить межу міцності металу, то утворюється тріщина.

2. Величину напружень, що виникають в об’ємі поковки, можна регулювати, змінюючи геометричні розміри осередку деформації.

3. Оцінювати напружено-деформований стан металу в осередку деформації зручно за допомогою методу ліній ковзання. Однак, при розрахунку цим методом не враховується зміна пластичних властивостей металу в процесі деформації (наприклад, збільшення опору деформації металу через деформаційне зміцнення).

Враховуючи в розрахунку деформаційне зміцнення металу, можна підвищити точність розрахунку і наблизити його до реальних процесів деформування.

4. Визначаючи напружено-деформований стан металу в осередку деформації методом ліній ковзання і змінюючи геометричні розміри осередку деформації, можна підібрати такі технологічні параметри кування (подачу і величину одиничного стиснення), при яких величина розтягуючих напружень не перевищить межу міцності металу.

5. При стисненні круглої порожнистої заготовки комбінованими бойками при співвідношенні геометричних розмірів D/d = 2,5 формується 4 пластичних осередку деформації, одне від верхнього, друге від оправки і 2 від нижнього бойка.

6. При одиничному стисненні круглої порожнистої заготовки з величиною деформації 3,5%, з геометричними розмірами D/d = 2,5, при відносній подачі a_o/D_o = 0,2, пластичний осередок деформації характеризується наявністю тільки нормальних стискаючих напружень.

7. Врахування розширення заготовки при зміні форми показує зниження значень нормальних напружень від периферії до центру.

8. Епюри нормальних дотичних напружень, розрахованих за геометричним осередком деформації з урахуванням розширення круглої порожнистої заготовки при стисненні, є стискаючими в процесі розвитку деформації. При цьому величина середніх нормальних напружень менше на 4 % в порівнянні з напруженнями, розрахованими без розширення.

9. При одиничних стисканнях круглої порожнистої заготовки з величиною деформації від 3,5 до 20 % і відносною подачею від 0,2 до 1,2 пластичний осередок деформації характеризується наявністю як стискаючих, так і розтягуючих напружень. При одиничних стисканнях більше 3,5% показника ступеня деформації деформаційне зміцнення збільшує стискаючі напруження поблизу площини прикладання зовнішньої сили, що призводить до зниження розтягуючих напружень в осьовій зоні поковки. Для значень деформації одиничних стискань 10 % і більше деформаційне зміцнення сприяє як зниженню стискаючих напружень в осьовій зоні поковки, так і до їх збільшення в залежності від конкретних умов деформації, характеристик осередку деформації і геометричних розмірів заготовки.

10. При малих деформаціях із зростанням значення відносної подачі в осьовій зоні утворюються тільки стискаючі напруження. При значеннях деформації в межах від 15% до 20% вплив подачі на зміну розподілу напружень у поперечному перерізі поковки не є істотним.

11. При аналізі отриманих результатів для фактичних умов кування, при діаметрі заготовки D = 300 мм і діаметрі оправки d = 120 мм, зі сталі 20 при температурі 900^{o}C оптимальними технологічними параметрами кування, при яких напружений стан металу найбільш сприятливий, є:

відносна подача 0,9 – 1,2;

одиничне стиснення 3,5 - 10 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wei-Wen Yu. Cold-Formed Steel Design- Third Edition- John Wiley end Sons, Inc. 2000. Canada.
2. George T. Halmos. Roll Forming Handbook. Taylor & Francis Group. 2006. Canada.
3. Ніколаєв В. О. Теорія і технологія точної прокатки штаб : навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 100 с.
4. Ніколаєв В. О. Калібрування прокатних валків : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 158 с.
5. Чубенко В. А., Хіноцька А. А. Технологія прокатного виробництва : навчальний посібник. Кривий Ріг : Видавничій центр КНУ, 2017. 169 с.
6. Василев Я.Д., Мінасв О.А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
7. Проценко В. М. Технологія виготовлення гнутих профілів : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 45 с.
8. 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.
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. Ніколаєв В. О. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 112 с.
11. Ніколаєв В. О. Теорія прокатки штаб : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 259 с.

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Проценко В. М. Виробництво спеціальних видів прокату : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском»). Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2025. 62 с.

Додаток 1 – Тези доповіді на конференції «Молода наука – 2025»

«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина

Наукове товариство студентів, аспірантів і докторантів

Рада молодих вчених

РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ЗНУ НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ЗНУ

ЗБІРНИК

наукових праць студентів,

здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2025»

Том V

«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету»

Запоріжжя
2025

Таранов Геннадій
магістрант 1 року ІННІ Ю.М. Потебні ЗНУ
Наук. кер.: канд. техн. наук, доц. Проценко В.М.

РОЗРОБКА МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОПИСУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КУВАННЯ-ПРОТЯГУВАННЯ ПОРОЖНЬОЇ КРУГЛОЇ ЗАГОТОВКИ

На сьогодні немає досить точного експериментального методу оцінки напружено – деформованого стану металу без руйнації об'єкта. До того ж експериментальні методи проводяться в особливих умовах та спроби перенести отримані результати на реальні процеси вносять із собою велику похибку.

Застосування математичного моделювання технологічних процесів дозволяє визначати напружено – деформований стан металу за різних умов без руйнування об'єкта моделювання і вирішувати широке коло завдань, зокрема з оптимізації технології. При цьому точність результатів залежить від точності припущень під час постановки завдання [1].

У даній роботі описується метод досить точного кількісного опису технологічного процесу кування-протяжки круглої порожнистої заготовки з урахуванням розширення, без розширення та з урахуванням зміцнення, математичне моделювання цього процесу і, зрештою, його оптимізація. У цьому зв'язку дана робота є актуальною і корисною.

При обтисканні круглої порожнистої заготовки плоскими, ромбічними або комбінованими бойками в металі можуть виникати напруги, що розтягують. Якщо рівень розтягуючих напруг перевищить межу міцності металу, то утворюються тріщини. Величину напруги, що виникає в об'ємі поковки, можна регулювати, змінюючи геометричні розміри осередку деформації.

При малих деформаціях зі зростанням значення відносної подачі в осьовий зоні утворюються тільки стискаючі напруги. При деформаціях у межах від 15% до 20% вплив подачі на зміну розподілу напруги в поперечному перерізі поковки не суттєвий.

При аналізі отриманих результатів для фактичних умов кування, при діаметрі заготівлі D = 300 мм та діаметрі оправки d = 120 мм, зі сталі 20 при температурі 900°С оптимальними технологічними параметрами кування, при яких напружений стан металу найбільш сприятливим є: відносне подання 0,9 – 1,2; одиничне обтискання 3.5 – 10 %.

Література

1. Y. Belokon, A. Yavtushenko, V. Protsenko, Y. Bondarenko, A. Cheilytko. 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. Pages 440-445.