

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів»

Розглянуто і схвалено  
на засіданні кафедри автоматизованих  
металургійних машин та обладнання  
Протокол № 16 от 09.10.2019

Краматорськ 2019

УДК 621.771

Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів: конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів» / В. А. Федорінов, Ю. К. Доброносів. – Краматорськ : ДДМА, 2019. - 44 с.

Викладено короткі теоретичні відомості та порядок проведення практичних занять дослідницького характеру, а також методика обробки отриманих результатів та вимоги до звіту. Наведено контрольні запитання для самостійної перевірки рівня підготовки до виконання лабораторних робіт.

Укладачі

В. А. Федорінов, проф.

Ю. К. Доброносів, доц.

Відп. за випуск В. І. Чередниченко, лаб.

## ЗМІСТ

1. ЛЕКЦІЯ 1 ВСТУП.....	3
2. ЛЕКЦІЯ 2. ПІДГОТОВКА СИРИХ МАТЕРІАЛІВ ДО ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ. АГЛОМЕРАЦІЯ І ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ.....	11
3. ЛЕКЦІЯ 3. ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ.....	22
4 ЛЕКЦІЯ 4. ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ.....	30
5. ЛЕКЦІЯ 5. ДОСВІДНІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІ АГРЕГАТИ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ (САБД). ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ. ПИТАННЯ ЕКОНОМІКИ .....	43
6. ЛЕКЦІЯ 6. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК.....	49
7 ЛЕКЦІЯ 7. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПОЄДНАНИХ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ І ПРОКАТКИ. ЛИВАРНО-ПРОКАТНІ АГРЕГАТИ (ЛПА) .....	56
8. ЛЕКЦІЯ 8. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ .....	63
9. ЛЕКЦІЯ 9. ГОЛОВНІ НОРМАЛЬНІ НАПРУГИ. ЕЛІПСОЇДА НАПРУГ .....	79
10. ЛЕКЦІЯ 10. АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНОГО ТИСКУ ПРИ ОМТ. СПРОЩЕНІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ СПІЛЬНО З РІВНЯННЯМ ПЛАСТИЧНОСТІ.....	
11. ЛЕКЦІЯ 11. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ГІПОТЕЗИ ТЕОРІЇ ПРОКАТКИ. РОЛЬ ТЕРТЯ ПРИ ПРОКАТЦІ. УМОВИ ЗАХОПЛЕННЯ СМУГИ ВАЛКАМИ.....	
12. ЛЕКЦІЯ 12. СИЛА ДЕФОРМАЦІЇ. КОНТАКТНИЙ ТИСК. ФОРМУЛА А. І. ЦЕЛКОВА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНИХ НАПРУГ. ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ І ПЛАСТИЧНІСТЬ. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ І ПЛАСТИЧНІСТЬ.....	
13. ЛЕКЦІЯ 13. ВИЗНАЧЕННЯ ТИСКУ МЕТАЛУ НА ВАЛКИ. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ.....	
14. ЛЕКЦІЯ 14. ВИПЕРЕДЖЕННЯ І ВІДСТАВАННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ І ФАКТОРИ, ЩО ЇХ ВИЗНАЧАЮТЬ. НАЛАШТУВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ ВАЛКІВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНІЙ ПРОКАТЦІ. РОЗШИРЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ І ФАКТОРИ, ЩО ЙОГО ВИЗНАЧАЮТЬ .....	
15. ЛЕКЦІЯ 15. ВИПЕРЕДЖЕННЯ І РОЗШИРЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ І ФАКТОРИ, ЩО ЇХ ВИЗНАЧАЮТЬ .....	

# 1 ЛЕКЦІЯ 1

## ВСТУП

### 1.1 Загальні відомості

Розвиток матеріального виробництва будь-якого суспільства, продуктивність і ефективність суспільної праці і рівень національного доходу нерозривно пов'язані з металургією. Технічний рівень і прогрес в металургійному виробництві визначають рівень будівництва, машинобудування, кораблебудування, легкої промисловості та ін. В сучасних умовах розвиток металургії визначається і інтересами оборони країни.

Перед чорною металургією стоять основні завдання, які спрямовані на докорінне поліпшення якості металопродукції, її структури і подальше збільшення обсягу виробництва прокату без зростання виробництва чавуну за рахунок застосування ефективних технологічних процесів виробництва та обробки металів і досконалих конструкцій машин і високоавтоматизованих агрегатів.

В даний час в Україні прокаткою переробляють 70 % виплавленої сталі.

Економічними розрахунками встановлено, що на найближчих етапах розвитку чорної металургії вкладення коштів, спрямованих на підвищення якості металопродукції більш ефективно, ніж на збільшення випуску її в кількісних показниках.

Одночасно з проблемою підвищення якості металів повинні вирішуватися також проблеми будівництва металургійних агрегатів великої потужності, підвищення продуктивності праці і зниження питомих капітальних витрат.

Так, у виробництві чавуну найбільш характерною тенденцією є прагнення до збільшення корисного об'єму доменних печей (до 1960 року макс. 1719 м<sup>3</sup>; 1961-63 роки – 2000 і 2300 м<sup>3</sup>; з 1967 року – 2700, 3000, 3200, 5000 і 6000 м<sup>3</sup>).

Замінники доменного процес, які з'являються, поки ще не конкурентоспроможні з доменною піччю при великих обсягах виробництва металу, тому можна вважати, що можливе подальше збільшення об'єму доменних печей (більше 6000 м<sup>3</sup>).

Виробництво сталі буде головним чином ґрунтуватися на киснево-конверторному процесі з використанням конверторів більшої потужності (350...400 тонн). Очікується інтенсифікація виробництва сталі в електропечах.

Необхідно відзначити, що питомі капітальні витрати на будівництво комплексу домна-конвертор вище, ніж на будівництво електросталеплавильних цехів, які не потребують виробництва рідкого чавуну (бездоменний процес).

Конкуренти доменного процесу: "Мідрекс-процес", розроблений фірмою "Мідленд Росс" (США). Процес включає окомкування концентратів, відпал окатишів в шахтних печах з подальшою їх металізацією, залізо відновлюється конвертацією газів (вміст заліза збільшується з 65...70 % до 80...95 %). Відновлені окатиші надходять в камеру для зберігання з нейтральним газом і потім для плавки сталі в дуговій електропечі. Процес реалізований в Росії на металургійному заводі в Старому Осколі).

Незважаючи на велику ефективність киснево-конверторного процесу ведуться пошуки безперервних процесів отримання сталі.

У найближчому майбутньому розливання металів в окремі злитки при масовому виробництві їх повинна бути замінена безперервним литтям. При цьому способі створюються умови для виробництва слябів великої маси (до 60...70 тонн і більше), що важливо для розвитку ширококутових станів.

Процес безперервного лиття сприяє якості готового прокату, так як безперервно літі заготовки мають високий ступінь фізико-хімічної однорідності.

Нові агрегати для безперервного лиття характеризуються високою продуктивністю (удосконалення методів кристалізації із застосуванням магнітних полів і інтенсивних способів охолодження).

Ефективність процесу безперервного лиття ще більш зростає при об'єднанні його з процесом прокатки в одному агрегаті або в загальному технологічному потоці. При такій технології використовуються первинна теплота злитка для його деформації, виключається проміжний склад металу і досягається повна безперервність процесу від рідкого металу до готового прокату.

У найближчі роки очікується застосування прокатних станів з більш високими швидкостями прокатки (ширококутові стани гарячої прокатки – 30...35 м/с, стани холодної прокатки – до 40...50 м/с, дротові – до 60...100 м/с і більше. Завдяки підвищенню швидкостей прокатки і збільшення маси виробів, що прокатуються, буде піднята продуктивність прокатних станів.

Надалі передбачається широко використовувати стикове зварювання смуг з метою забезпечення "нескінченного" процесу прокатки і ливарно-прокатних агрегатів (модулів).

Одним з економічних видів прокату є листова сталь. Частка листової сталі в загальному випуску прокату підвищується і перевищила в деяких країнах 50 % (в окремих 60 %).

Чим складніше робочий металургійний процес, що виконується машиною або агрегатом, і чим більше продуктивність і розміри агрегату, тим більш необхідною стає автоматизація. Наприклад, при сучасних швидкостях прокатки дуже важко, а часом і неможливо управляти процесом вручну.

Таким чином управляти сучасним металургійним обладнанням повинні автоматичні системи, здатні ставити найвигідніший режим роботи агрегатів і підтримувати всі необхідні параметри кінцевої продукції.

В даний час широко обговорюється питання про перспективи і напрямку розвитку чорної металургії. Стоїть питання про необхідність створення повністю автоматизованого металургійного заводу з безперервним процесом

виробництва від руди до готового прокату, який забезпечить великі економічні переваги в порівнянні з існуючими.

З трьох основних процесів металургійного циклу – доменного, сталеплавильного і прокатного переділів, безперервність процесу порушується лише при сталеплавильному переділі, що здійснюється в агрегатах суто періодичної дії. Тому заміна їх САНД є необхідною передумовою створення металозаводу з безперервним процесом виробництва. У цьому напрямку досягнуто вже певних успіхів.

## 1.2 Безперервні виробничі процеси

Металургія є одним з розділів хімічної технології – науки про методи і процеси хімічної переробки сировини. Безперервні процеси давно застосовуються в хімічній технології і з цього питання накопичено великий досвід, який можна застосувати до розгляду проблеми створення безперервних металургійних процесів, зокрема, безперервного процесу виплавки сталі.

Здійснювані в промисловості процеси хімічної технології за характером перебігу в часі і в просторі ділять на періодичні і безперервні.

Періодичний процес характерний проведенням в деякому замкнутому обсязі послідовного ніклу операцій, при якому відбувається зміна в часі параметрів процесу (температури, складу і властивостей оброблюваного матеріалу). Після закінчення процесу отриманий продукт вивантажують, в робочий об'єм завантажують нову порцію вихідних матеріалів і цикл обробки повторюється.

Безперервний процес, навпаки, не може проводитися в замкнутих обсягах, а здійснюється в потоці – в лінії послідовно включених проточних апаратів або в зонах одного проточного агрегату, через який безперервно переміщується опрацьований продукт. Підведення необхідних матеріалів (компонентів) і відведення побічних продуктів також здійснюється безперервно. В результаті вихідний матеріал по мірі просування по технологічній лінії процесу поступово перетворюється в кінцевий продукт.

Визначення процесів хімічної технології можуть бути перенесені і на доменний і сталеплавильний переділи.

Прокатний переділ швидше схожий безперервним процесам машинобудови у вигляді поточно-масового виробництва.

Тут необхідно ввести поняття "автоматичної лінії" (або агрегату). Вони характеризуються такими ознаками:

1. Автоматична лінія – це система засобів виробництва для обробки або виготовлення одного продукту.

2. Автоматична лінія є системою пристроїв, які автоматично здійснюють призначену послідовність ряду технологічних впливів (тобто системи, самостійно виконує свою функцію і потребує лише в налаштуванні і контролі з боку кваліфікованого обслуговуючого персоналу).

3. Вихідний матеріал в процесі перетворення на автоматичній лінії в потрібний виріб повинен послідовно і автоматично переміщуватися між зонами різних технологічних впливів.

Практика застосування безперервних виробничих процесів у промисловості дозволила виявити за яких умов їх застосування доцільно і економічно виправдано і що необхідно для їх успішної реалізації.

1. Будь-який безперервний процес передбачає розчленування процесу виробництва на ряд послідовних технологічних операцій, що виконуються в окремих спеціалізованих апаратах. Чим більше стадій у виробничому процесі, тим складніше агрегат, тому таке ускладнення виробничого процесу виправдовується тільки при достатньо великих обсягах виробництва.

2. Вузька спеціалізація устаткування та виробництва в цілому, мінімальна кількість випущених видів продукції – характерна риса сучасного масового виробництва. Це забезпечує одержання найкращих економічних показників.

3. Для сучасного етапу промисловості характерний швидкий технічний прогрес (безперервне оновлення методів виробництва і продукції, що випускається).

Конструкції агрегатів безперервної дії повинні забезпечувати можливість удосконалення процесу (заміна на ходу окремих конструктивних елементів, швидко і з мінімальними витратами).

4. Перехід на безперервний процес – це перехід на новий щабель культури виробництва (пред'являються підвищені вимоги до надійності устаткування і до якості вихідного продукту).

Досвід промисловості показав наступні переваги безперервних процесів в порівнянні з періодичними:

1. Підвищується якість продукції (можливість створення оптимальних умов у відповідному технологічному ланці), підвищується однорідність продукту і точність його геометричних форми і розмірів.

2. Зменшуються відходи і втрати продукту і краще використовуються сирі матеріали (хороша організація кожної технологічної операції).

3. Полегшується повне використання побічних продуктів, які безперервно виділяються (тепла, газів і т.д.).

4. Рівномірне течія Н.П. полегшує управління (автоматизація управління); забезпечується точне дотримання технологічного режиму.

5. Поліпшується використання основного технологічного обладнання (відсутність простоїв при завантаженні сировини і вивантаженні продукції; ведення процесу з граничною інтенсивністю без пікових навантажень, що мають місце при періодичному процесі).

6. Зменшуються втрати енергії внаслідок відсутності реверсів, розгинів і гальмувань, знижується потужність приводів машин (зменшених динамічних навантажень під час перехідних процесів), зменшується знос машин і механізмів.

7. У результаті безперервного і рівномірного виділення побічних продуктів поліпшується використання допоміжного обладнання, що служить для їх утилізації.

8. Полегшується механізація процесу (громіздкі пристрої для одноразової завантаження сировини і вивантаження продукції замінюються безперервно діючими легкими конвеєрами, трубопроводами та ін.).

9. У результаті інтенсифікації використання основного та допоміжного обладнання та підвищення його продуктивності скорочується виробничий цикл, знижуються розміри машин, потреби у виробництві вальних площ і, як наслідок, капітальні витрати.

10. Зменшується кількість обслуговуючого персоналу, підвищується продуктивність праці.

### **1.3 Склад металургійного заводу з повним циклом. Металургійні комбінати**

Сучасний металургійний завод з повним циклом, що має всі основні стадії металургійного виробництва: підготовку сировини до плавки, виплавку чавуну і сталі, призначений для отримання готової продукції у вигляді прокату, а також напівфабрикатів. Товарні напівфабрикати споживаються заводами, які не мають повного циклу переділів.

Основними цехами металургійного заводу є: доменні, сталеплавильні, прокатні і трубопрокатні. На багатьох заводах побудовані дробильно-сортувальні, коксохімічні цехи, агломераційні фабрики і фабрики з виробництва окатишів (відносяться до основних цехів, але грають роль більш підсобну).

Існують також заводи-(комбінати), що мають в своєму складі ще й господарство зі збагачення руди і вугілля, а іноді і з видобутку руди.

Допоміжні цехи: енергетичні, вогнетривкі, транспортні, ремонтні та інші.

Початковою сировиною металургійного заводу є:

а) залізна руда, що пройшла попередню обробку і збагачення (Кривий Ріг, КМА, Тульське і Липецьке родовища, Керченське родовище. Родовища Уралу, Казахстану, Західного і Східного Сибіру) – червоний залізняк  $Fe_2O_3$ , бурий залізняк  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  магнітний залізняк  $Fe_3O_4$ , вуглекисле залізо  $FeCO_3$ );

б) кам'яне вугілля, що пройшло попередню обробку;

в) флюси (вапняк), що пройшли обробку (дроблення, сортування); застосовують в доменній плавці для ошлакування порожньої породи руди  $CaCO_3$  – вапняк.

У СНД розвідано 110 мільярдів тонн руди (30 % світових запасів).

Вміст заліза в руді: 1960 г. – 44,6%; 1980 р – 30 %.



Виробництво чавуну: підготовка шихтових матеріалів до доменної плавки на збагачувальних, коксохімічних, агломераційних і дробильних фабриках і складах сировини і власно виплавка і прибирання чавуну в доменному цеху.

Шихтові матеріали: залізовмісні елементи (руда, а також агломерат, окатиші та металодобавки), кокс і флюси.

Руду, як правило, збагачують, отримуючи тонкоподрібненому залізорудний концентрат, який разом з дрібнокусковими і пилюватими рудами наражають усередненню, а потім окускуванню з отриманням агломерату або окатишів (це покращує металургійні властивості залізоємної частини руди). У доменній плавці використовують агломерат розміром 10...50 мм (до 5 мм, але не більше 5 %), а окатиші крупністю 10...5 мм.

Окускування сировини сприяє підвищенню газопроникності стовпа шихтових матеріалів в печі, рівному ходу печі, зменшенню витрати палива, видалення сірки, зменшення виносу газовим потоком дрібних фракцій шихти їх печі, збільшення продуктивності доменних печей і підвищенню якості чавуну.

Неминучою домішкою руд є порожня порода, що складається з кремнезему, глинозему, вапна і магnezії. При виплавці чавуну ця порода утворює шлак.

Для ведення доменної плавки використовують кокс. Якість коксу залежить від властивостей вихідних вугілля, їх підготовки до коксування, технології коксування і обробки готового коксу. Кокс повинен мати шматки розміром 25...40 мм.

Флюси в доменній плавці служать для додання легкоплавкості порожній породі руди і ошлаковування золи коксу і отримання шлаку з високою сіркопоглинутою здатністю. Флюси містяться в офлюсованому агломераті і окатишах. Флюс може вводиться і безпосередньо в доменну піч.

Для прискорення відновлювальних процесів, що протікають в печі, а також з метою зниження витрат дорогого і дефіцитного коксу поряд з поліпшенням якості підготовки матеріалів до плавки використовують високотемпературний нагрів дуття в поєднанні зі збагаченням дуття киснем і вдуванням в горн печі різних видів палива (природного газу, мазуту, тонкоподрібнювального вугілля), а також підвищений тиск газу під колошником печі.

Продукти доменної плавки: рідкі чавун (переробний і ливарний) і шлак, а також доменний (колошниковий) газ.

При виплавці сталі використовують рідкий чавун, а також сталевий брухт (скрап), флюси, розкислювачі та ін.

Отриману сталь розливають у виливниці або на МБЛЗ. Отримані злитки або заготовки служать вихідною продукцією при виробництві прокату.

Злитки і заготовки на прокатних станах різного призначення переробляються в готову прокатну продукцію і напівфабрикати.

Металургійні заводи України: "Азовсталь", "Запоріжсталь", Криворізький, ММК ім. Ілліча, Єнакіївський метзавод.

Продуктивність металургійних заводів оцінюється з випуску сталі в мільйонах тонн в рік (великі 15 млн. тонн на рік і більше). Залежно від виробленого сортаменту прокатної продукції розрізняють заводи з листової, сортової і змішаною спеціалізацією.

Вибір місця будівництва метзаводу пов'язаний з близькістю розташування джерел сировини, водоймів, виробництва електроенергії та ін.

Наведемо схему вантажопотоків сучасного металургійного заводу з повним металургійним циклом (рис. 1.1) [1, с. 19–23].

Металургійні заводи України: "Азовсталь", "Запоріжсталь", Криворізький, ММК ім. Ілліча, Єнакіївський метзавод.

Продуктивність металургійних заводів оцінюється з випуску сталі в мільйонах тонн в рік (великі 15 млн. тонн на рік і більше). Залежно від виробленого сортаменту прокатної продукції розрізняють заводи з листової, сортової і змішаною спеціалізацією.

Вибір місця будівництва метзаводу пов'язаний з близькістю розташування джерел сировини, водоймів, виробництва електроенергії та ін.

Наведемо схему вантажопотоків сучасного металургійного заводу з повним металургійним циклом (рис. 1.1) [1, с. 19–23].

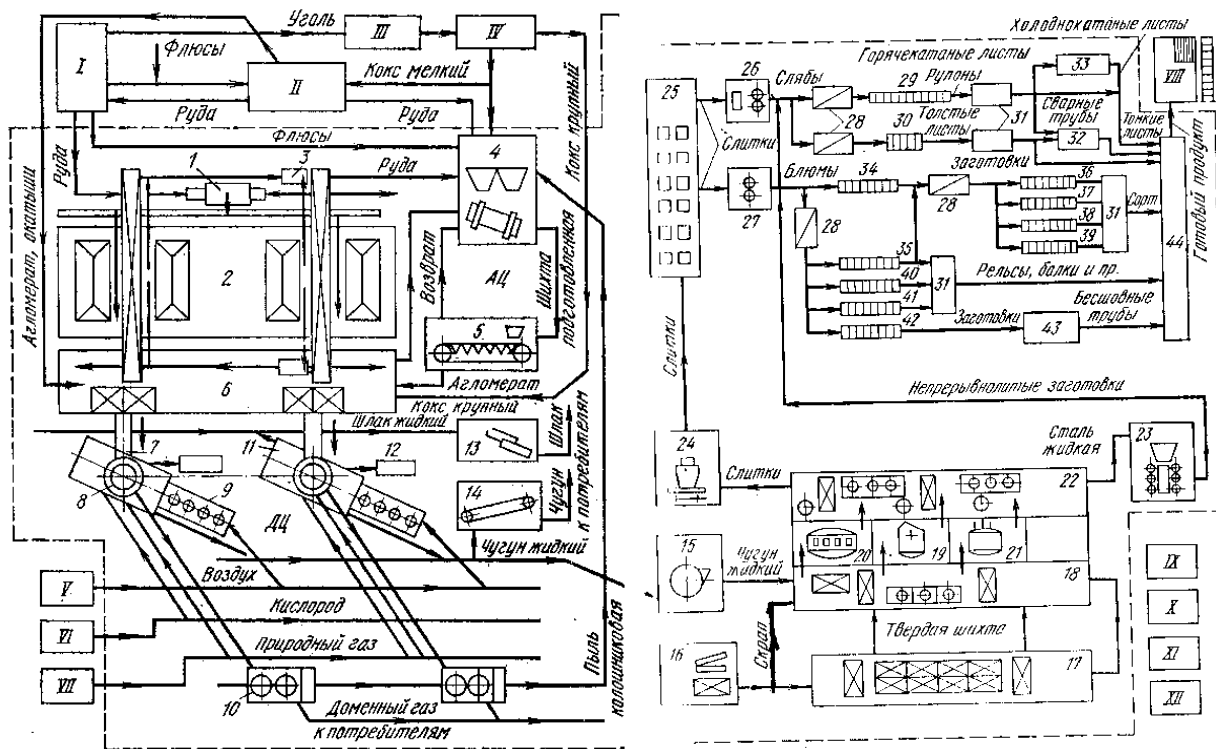


Рисунок 1.1 – Схема вантажопотоків метзаводу з повним металургійним циклом

## 2 ЛЕКЦІЯ 2

### ПІДГОТОВКА СИРИХ МАТЕРІАЛІВ ДО ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ. АГЛОМЕРАЦІЯ І ВИРОБНИЦТВО ОКАТИШІВ

#### 2.1 Етапи підготовки сирих матеріалів до доменної плавки

Продуктивність доменних печей, витрата коксу при доменній плавці і якість виплавленого чавуну залежать від якості шихтових матеріалів (вмісту заліза, сталості фізико-хімічного складу, кількості шкідливих домішок і т.д.). Тому підготовка шихтових матеріалів до плавки є одним з найважливіших етапів металургійного виробництва. Особливе значення вона набуває у зв'язку з розширенням масштабів використання бідних залізом і пилуватих руд, а також скороченням запасів коксівного вугілля.

Одним з найважливіших етапів підготовки шихтових матеріалів до доменної плавки є збагачення руд і вугілля.

При збагаченні сирової руди з неї видаляють нерудну частину і деякі шкідливі домішки, в результаті чого підвищується відносний вміст заліза в руді, при цьому утворюється концентрат, що вимагає меншої витрати коксу при доменній плавці.

Збагачення руд здійснюють на рудозбагачувальних фабриках (ГЗК), до складу яких входять відділення дроблення, подрібнення, сортування і різних видів збагачення.

Для отримання високоякісного коксу кам'яне вугілля також піддають попередній обробці: дроблення, сортування і збагачення на вуглезбагачувальній фабриці.

Операції дроблення і сортування руд і вугілля з використанням відповідного обладнання здійснюють після збагачення також в підготовчих цехах металургійного заводу. Підготовчих операцій з дроблення і сортування піддають і флюси.

На металургійні заводи надходить сировина зі значними коливаннями хімічного і фізичного складу матеріалів (різні родовища). Наближаючи склад окремих порцій до середнього складу великих мас сировини застосовують усереднення матеріалів.

Після збагачення подрібнені матеріали: у вигляді концентрату надходять на операції окучування: агломерацію або окатування.

Етапи підготовки сирих матеріалів ілюструються рис. 2.1.

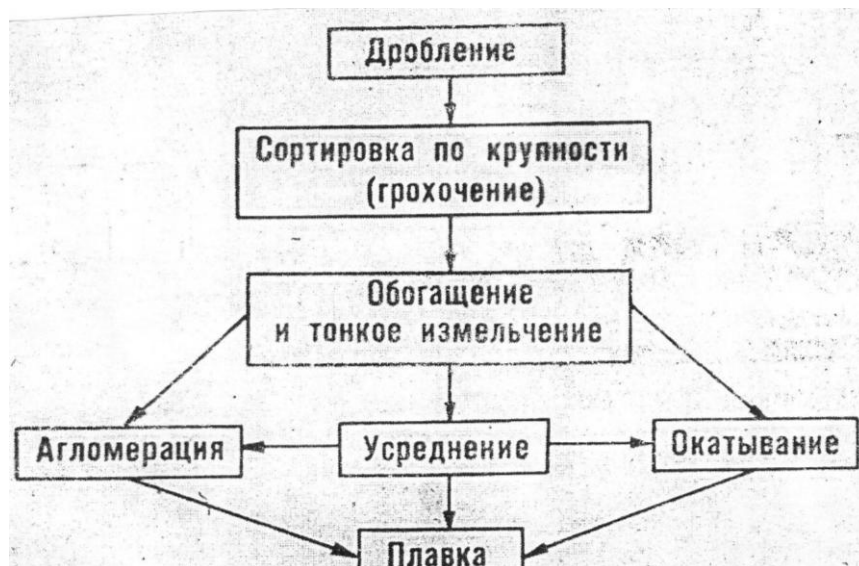


Рисунок 2.1 – Етапи підготовки сирих матеріалів до доменної плавки

## 2.2 Дроблення і сортування

Розміри шматків руди, що надходить з рудника, часто бувають більше 1500 мм. Для металургійної переробки потрібні матеріали меншою крупністю, тому дроблення є необхідною початковою операцією підготовки руд до плавки. Дроблення матеріалів ведеться в кілька стадій з послідовним зменшенням розмірів шматків:

велике дроблення – до 300...50 мм;

середнє дроблення – до 50...25 мм;

дрібне дроблення – до 10...5 мм;

тонке подрібнення – до 5...2 мм.

Для великого дроблення застосовують щоківі, конусні і молоткові дробарки (рис. 2.2–2.4).

Представлені дробарки характеризуються надійністю, але в той же час низькою продуктивністю, вібраціями, шумом. Процес дроблення заснований на роздавлюванні, зламі і стирання.

Середнє дроблення відбувається в валках (рис. 2.5, а), дрібне дроблення – в валках (рис. 2.5, б), бегунах і млинах (рис. 2.6).

Тонке подрібнення відбувається так само як і дрібне дроблення.

Для попередження комкування і розпилення тонке подрібнення може бути проведено в рідкому середовищі (пульпа).

Сортування руди по крупності (просівання) необхідна операція поділу руд на класи перед завантаженням в плавильний агрегат. Різні фракції призводять до сегрегації матеріалів в плавильному просторі (погіршується розподіл газів, розподіл і засвоєння тепла, порушується нормальна технологія плавки).

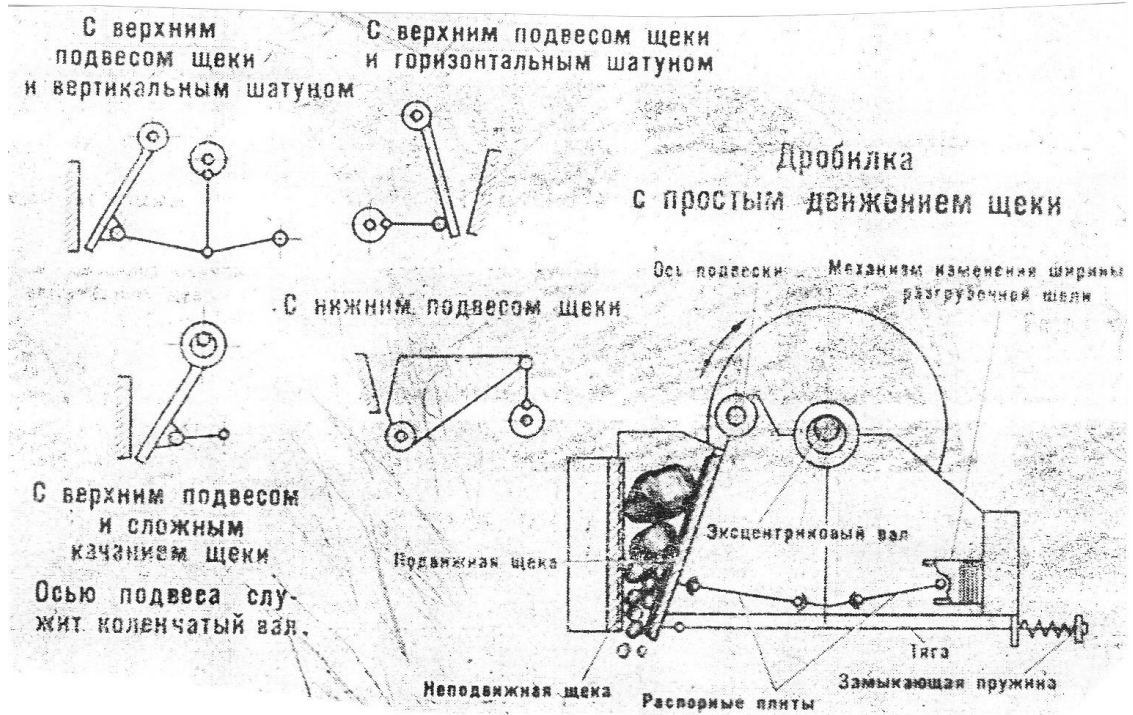


Рисунок 2.2 – Схемы щековых дробарок

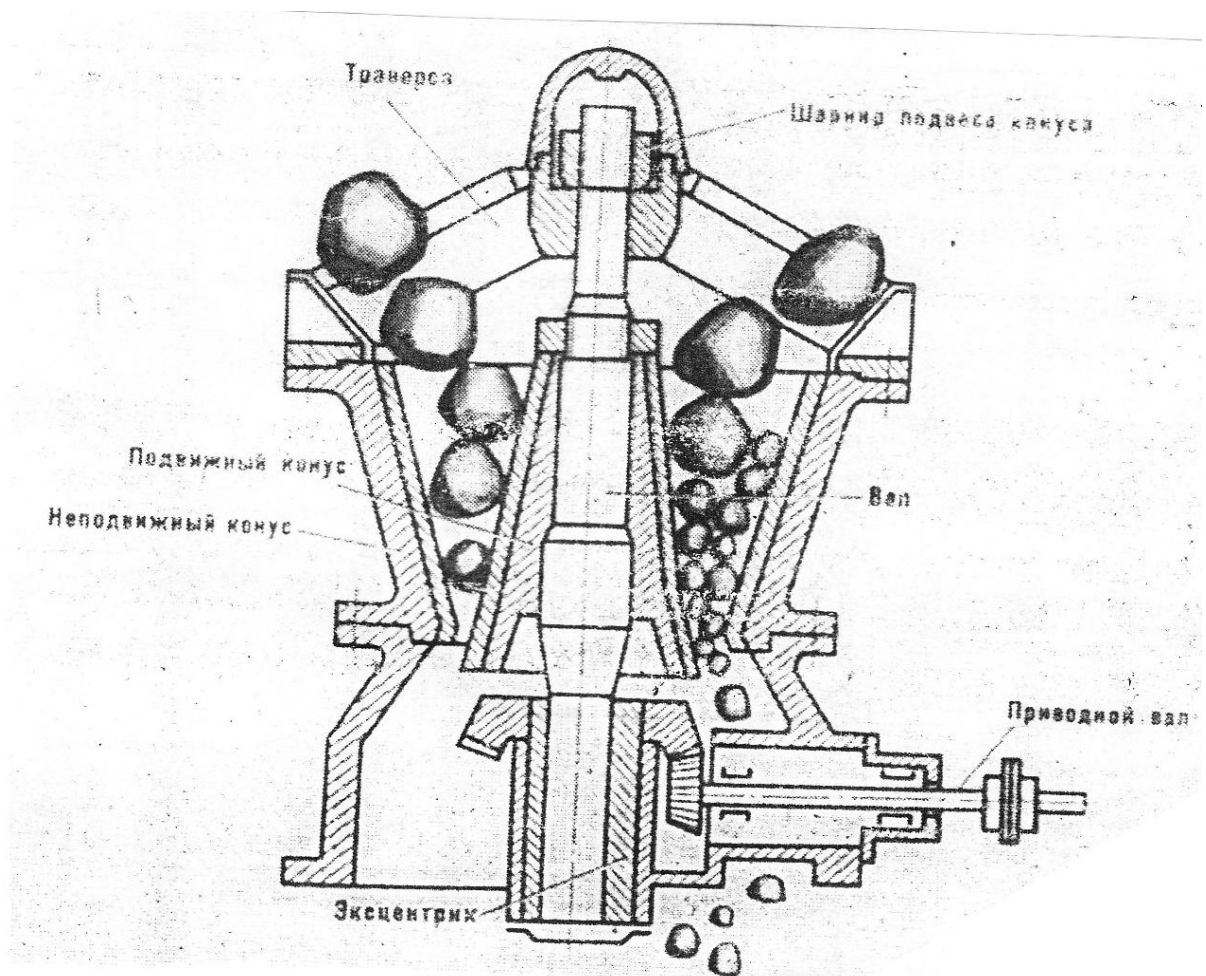


Рисунок 2.3 – Конусна дробарка

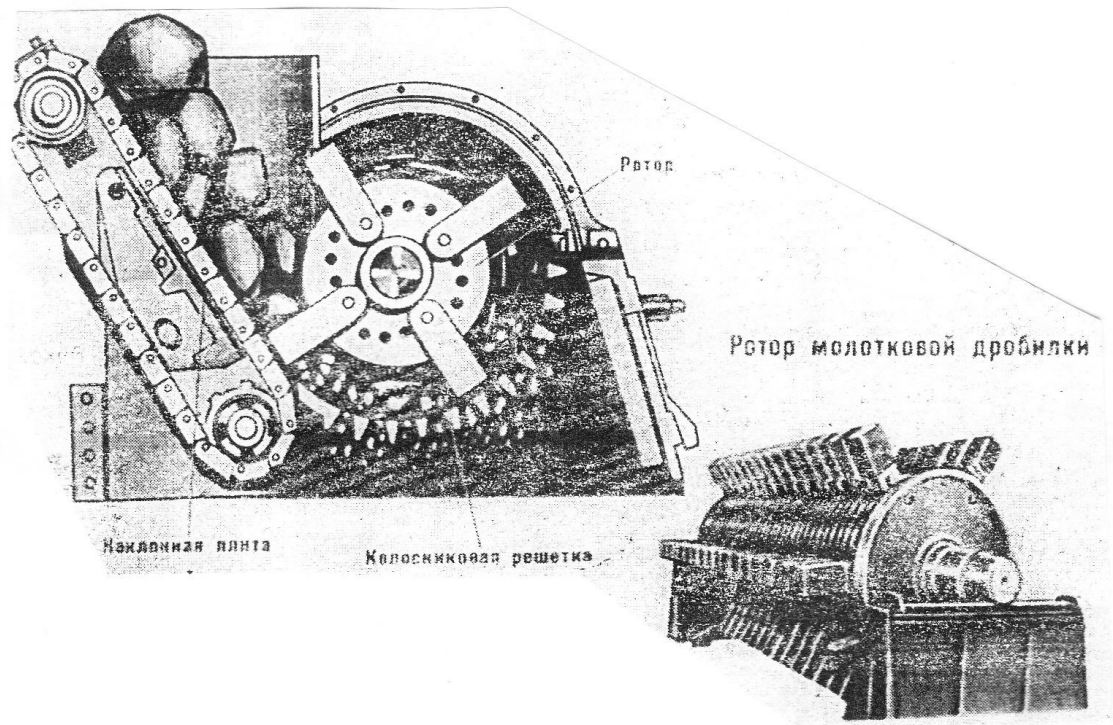


Рисунок 2.4 – Молоткова дробарка

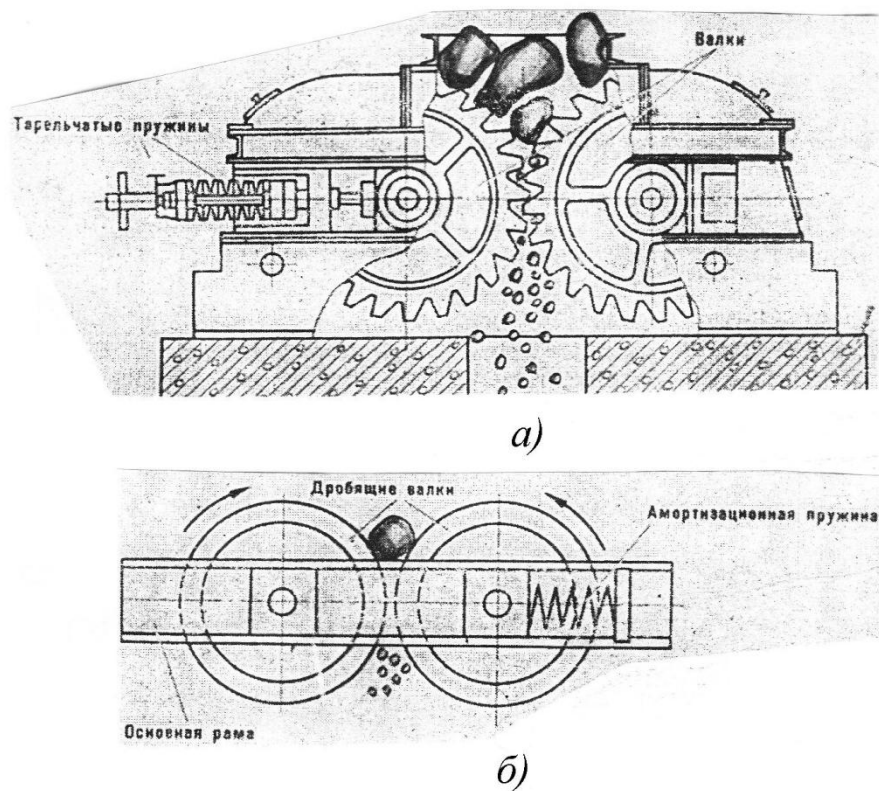
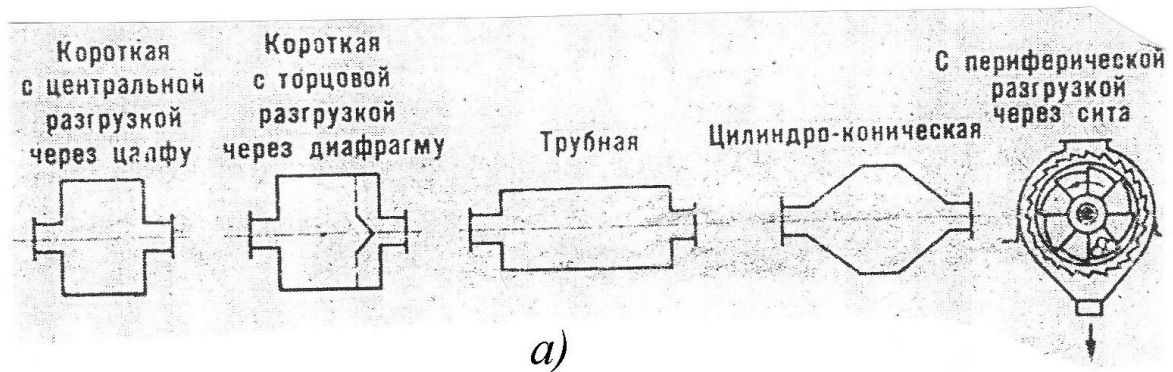
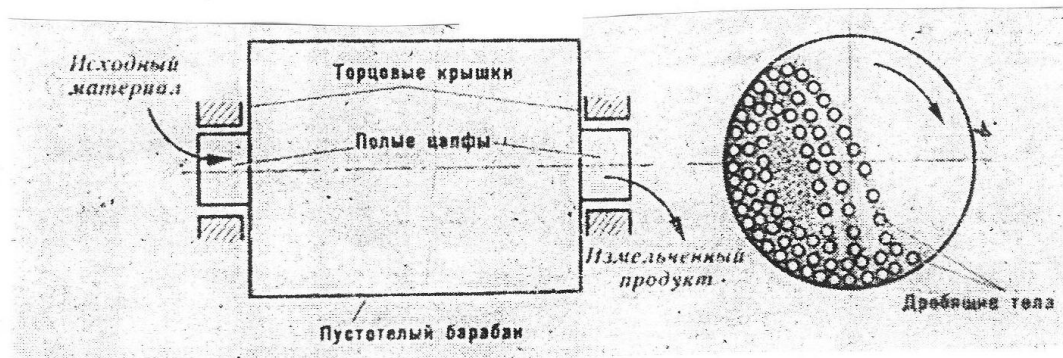


Рисунок 2.5 – Схеми валкових дробарок для середнього (а) і дрібного (б) подрібнення



а)



б)

Рисунок 2.6 – Варианты (а) і принцип дії (б) шарового млина

Класифікація руд з відбором необхідної фракції є попередньою стадією перед збагаченням. Поділ на класи великих і середніх фракцій проводиться на грохотах, дрібних на грохотах і класифікаторах, тонких – переважно на класифікаторах.

Схеми колосникових грохотів наведені на рис. 2.7.

Тонко подрібнені матеріали легко грудок, зменшуючи повноту відділення дрібного матеріалу, крім того, що розпилює. Такі матеріали краще класифікувати в пульпах. Така класифікація називається мокрою або гідравлічною, а апарати – класифікаторами (рис. 2.8). Принцип – поділ матеріалів на фракції залежно від швидкості падіння їх в рідкому середовищі. При гідравлічній класифікації більші (важкі) частинки осідають з пульпи швидше, ніж дрібні (легені). За час перебування в класифікаторі великі частки – піски осідають, а більш дрібні несуться зливом. Чим менше в'язкість і швидкість руху пульпи через класифікатор, тим тонше частинки матеріалу в зливі.

Класифікатори: рейковий, спіральний, конусний, гідроциклони.

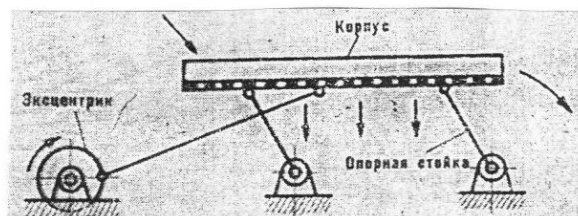
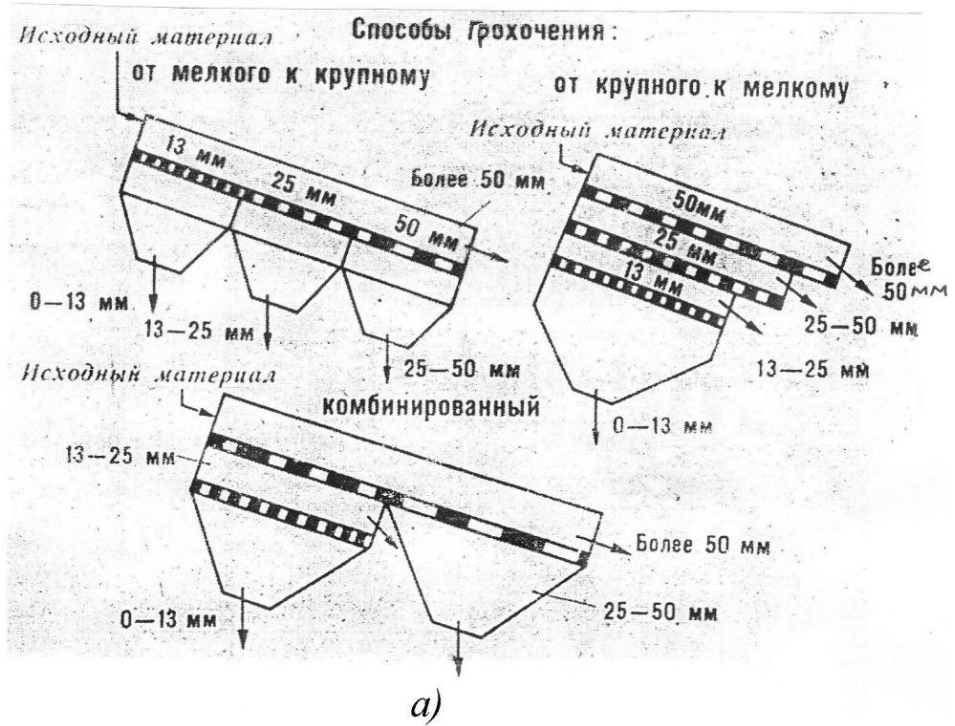
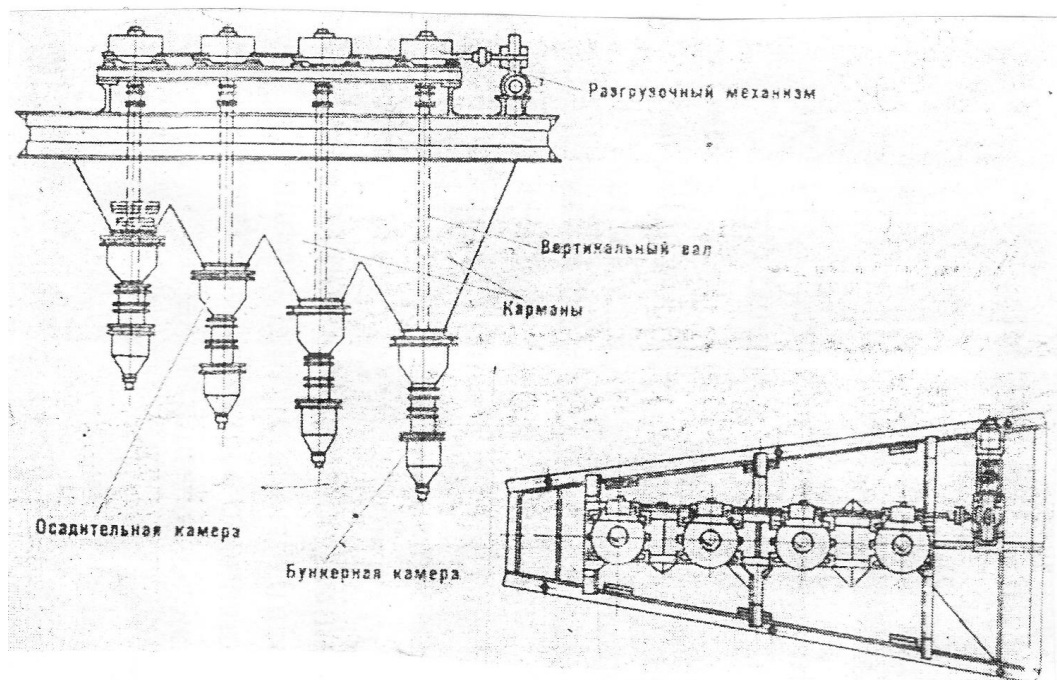


Рисунок 2.7 – Схемы колосниковых грохотів з нерухомою (а) і рухомою (б) решітками





## 2.3 Збагачення

Для збагачення руд використовують такі методи:

1. Промивання (застосовується для  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ).
2. Магнетизуючий випал ( $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$ )
3. Магнітна сепарація (рис. 2.9).
4. Гравітаційні методи (рис. 2.10).
5. Флотація.

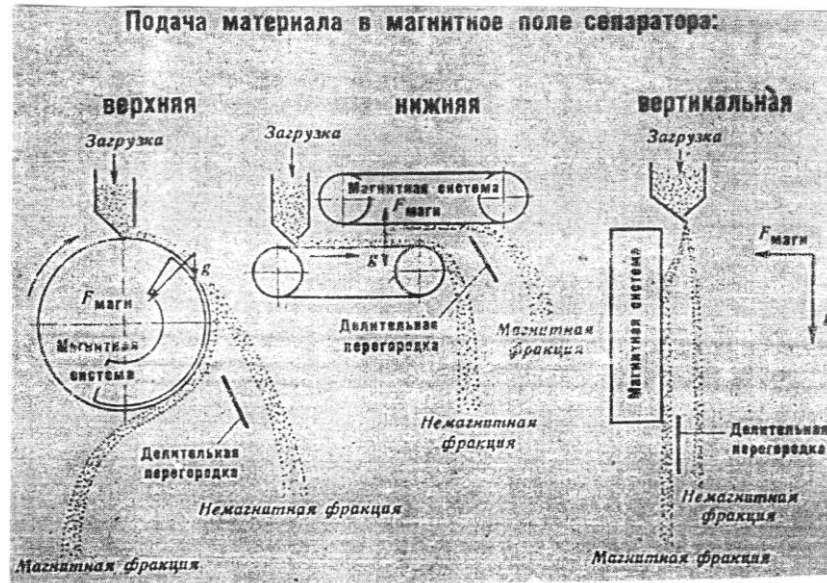


Рисунок 2.9– Схеми магнітних сепараторів

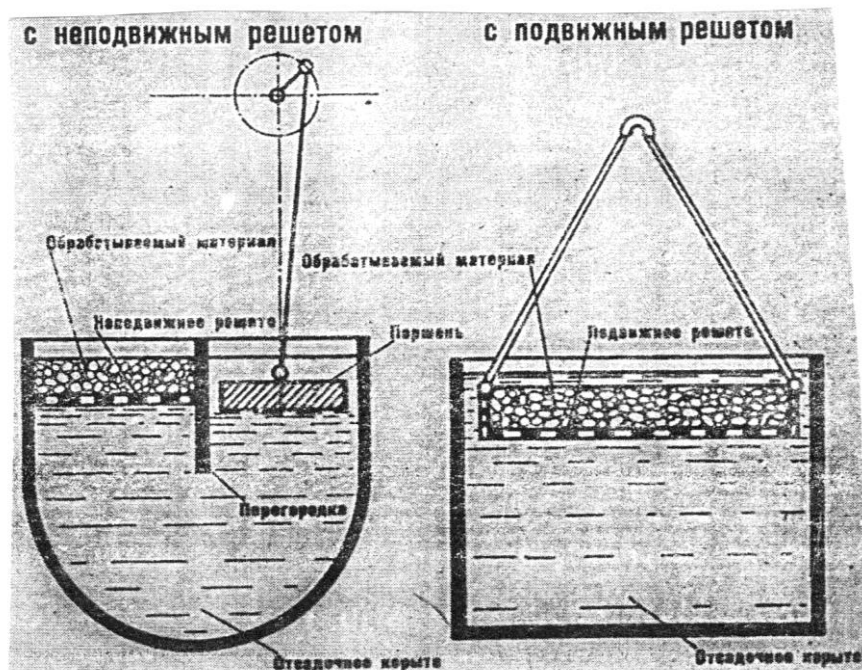


Рисунок 2.10 – Схеми відсажуваних машин (реалізація гравітаційного методу)

## 2.4 Окискування

Окискування дрібних руд і концентратів здійснюється спіканням з одночасним просмоктуванням повітря крізь шихту. Цей спосіб називають агломерацією. При цьому спікання відбувається за рахунок горіння палива в середовищі матеріалу, який спікається.

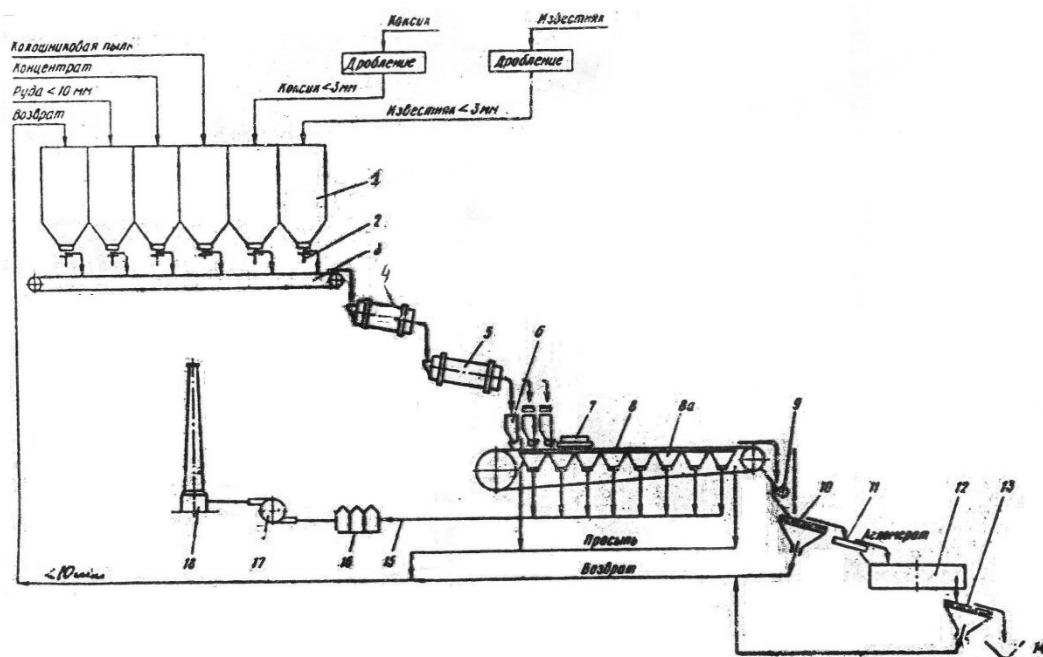
Мета агломерації не тільки окискування руд, але і поліпшення металургійних властивостей матеріалу (видалення сірки, введення флюсу, створення міцності шматків, підвищення пористості і т.д.).

Застосування агломерату в доменних печах знижує витрату палива, інтенсифікує плавку, підвищує продуктивність, якість.

Компоненти агломераційної шихти: залізорудний концентрат, дрібна сира залізна руда (<10 мм), колошниковий пил, повернення (<10 мм) – (15...18 %), флюси (<3 мм), коксік (<3 мм) – (4...6 %) і 7...9 % вологи.

Якість агломерату визначається його хімічним складом, міцністю і відновлюваністю. В даний час виробляють тільки офлюсований агломерат (процес розкладання флюсу переноситься з доменної печі на аглофабрику), що дозволяє знизити витрату коксу в доменній печі.

Схема технологічного процесу агломерації приведена на рис. 2.11.



- 1 – бункери; 2 – дозатори; 3 – транспортер; 4 – змішувач;  
5 – комкувачі; 6 – бункери-живильники; 7 – запальний горн;  
8 – агломераційна машина; 8а – вакуум-камери; 9 – дробарка агломерату; 10, 13 – грохоти; 11 – живильник; 12 – охолоджувач агломерату; 14 – агловози; 15 – трубопровід; 16 – фільтри; 17 – ексгаустер; 18 – труба

Рисунок 2.11 – Принципова схема технологічного процесу агломерації на агломераційній фабриці

## 2.5 Фізико-хімічні основи спікання

Рудні матеріали (10...0 мм), перемішані з коксіком (3...0 мм), в розпушеному стані завантажуються на колосники спікальних візків шаром 300...440 мм (рис. 2.12).

Паливо запалюється зверху від сильного джерела тепла (запалювателем). Завдяки розрядці в вакуум-камерах необхідний для горіння палива повітря розсмоктується через весь шар шихти.

Щоб не підгорали колосники і шихтові матеріали, не провалювалися вниз укладають шар повернення розміром 25 мм.

Інтенсивне горіння йде у вузькій зоні (20...25 мм) – зоні горіння, поступово опускається вниз до колосникової решітка.

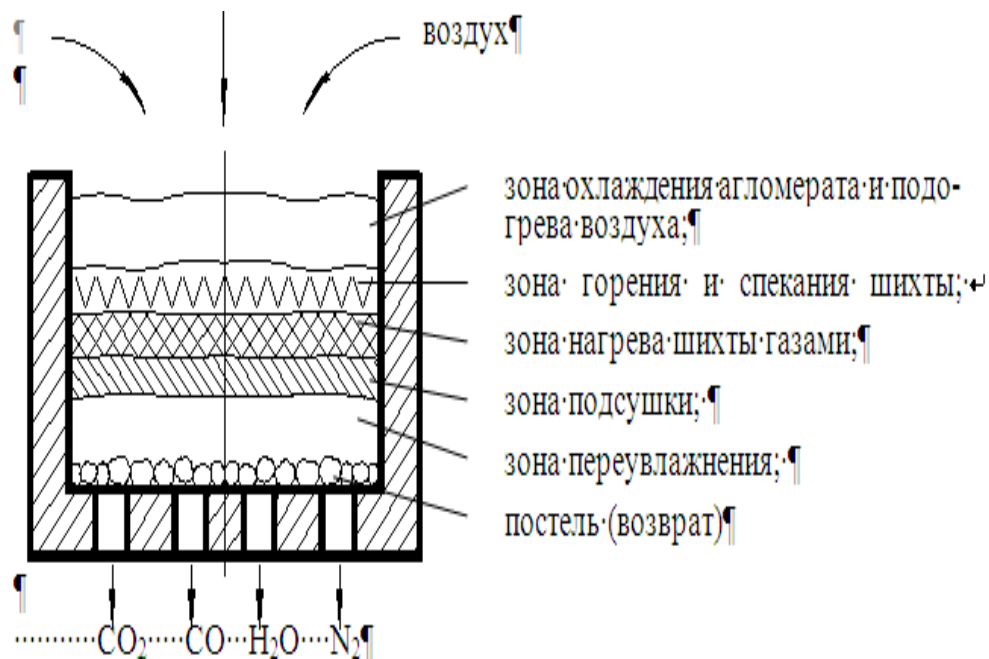
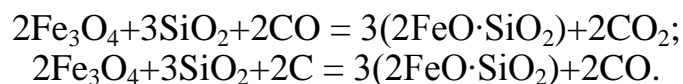


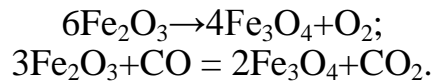
Рисунок 2.12 – Схема процесу спікання

У зоні горіння температура сягає 1300...1400°C. При цих температурах з силікатних з'єднань породи виплавляється фаяліт (2FeO • SiO<sub>2</sub>). Крім цього фаяліт утворюється з наявних в матеріалі магнетиту і кремнезему по реакціях:



Рідка фаза, яка з'явилася, пов'язує зерна шихти при виході із зони горіння. Повітря, проходячи крізь шар агломерату, який утворився, охолоджує його і цей верхній шар, який все збільшується, називають зоною охолодження.

У зоні підігріву окис заліза перетворюється в магнітну по реакціях:



Сірка при агломерації видаляється на 96...99 %, видаляється цинк, частково видаляється миш'як. Фосфор залишається незмінним.

## 2.6 Виробництво окатишів (окатування)

Окатування – процес отримання окатишів з вологих концентратів в грануляторах з наступним сушінням і зміцнюючим випалюванням окатишів в випалювальних машинах.

Окатиші – кулясті грудки діаметром 10...15 мм.

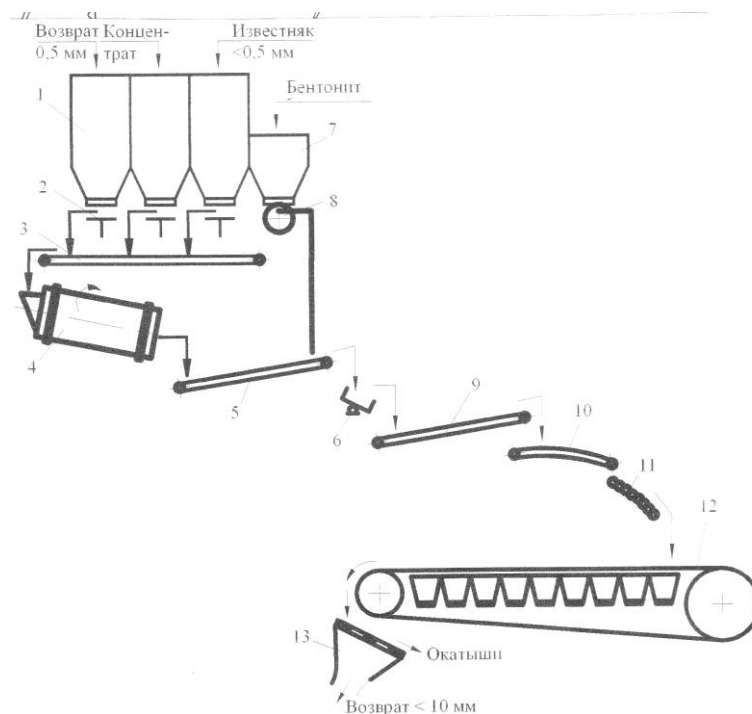
Це відносно новий спосіб окускування рудних матеріалів.

Окатиші, як і агломерат, виробляють офлюсованими. Якість окатишів визначається їх гранулометричним складом, міцністю і хімічним складом.

Окатування протікає задовільно тільки при вмісті в концентраті 90 % фракції не більше 0,074 мм. Вапняк і повернення подрібнюють до 0,5 мм. Вологість концентрату визначена 9 %. Сполучною речовиною служить бентонітова глина (бентоніт) в кількості 0,3...1,5 % маси шихти.

Для огрудкування (пеллетезування) застосовують барабани або похилі круглі чаші або диски.

Схема виробництва залізорудних окатишів приведена на рис. 2.13.



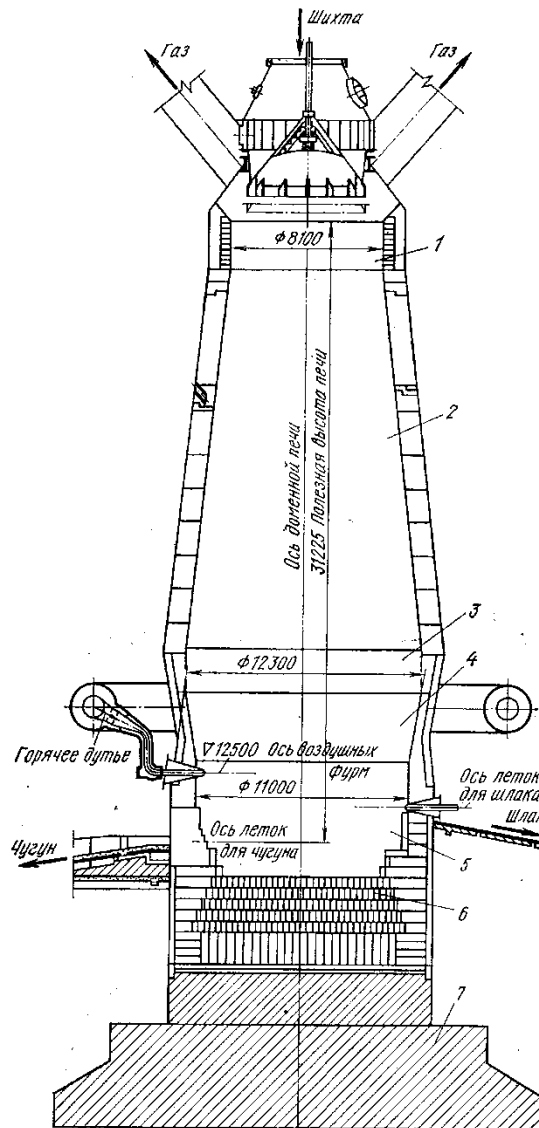
- 1,7 – бункери; 2,8 – дозатори; 3,5,9 – транспортери; 4 – змішувач;  
 6 – гранулятор (пеллетезатор); 10 – укладальник; 11 – живильник;  
 12 – машина зміцнюючого (або упрочнююче-відновного) випалу;  
 13 – грохот

Рисунок 2.13 – Схема виробництва залізорудних окатишів

### 3 ЛЕКЦІЯ 3 ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ

#### 3.1 Профіль доменної печі і умови її роботи

Доменний процес є складною сукупністю різноманітних фізико-хімічних, механічних і аеродинамічних явищ. Він протікає в умовах руху твердих і плавких мас зверху вниз і зустрічного руху газів від низу до верху. Успішність здійснення цього складного безперервного процесу в значній мірі визначається правильним вибором профілю (робочого простору) доменної печі (рис. 3.1).



1 – колошник; 2 – шахта; 3 – розпар; 4 – запечики; 5 – горн; 6 – лещадь;  
7 – фундамент

Рисунок 3.1 – Профіль доменної печі

Раціональний профіль доменної печі повинен забезпечити:

1. Плавне і стійке опускання шихтових матеріалів.
2. Вигідний розподіл зустрічного газового потоку.
3. Успішний розвиток процесів відновлення і утворення чавуну і шлаку.

Колошник забезпечує розподіл завантажуються в піч матеріалів, відведення газів, які піднімаються. Діаметр колошника взаємопов'язаний з діаметром розпару і горна (конусність шахти). Висота колошника вибирається з урахуванням організації завантаження і швидкості опускання шихти.

Профіль шахти забезпечує рівномірне опускання шихти і деяке її розпушення і переміщення мас, що починають плавитися, від стін в нижній частині шахти.

Висота шахти вибирається з умови забезпечення відновлювальних процесів.

Розпар усуває можливості затримки шихтових матеріалів. Великий діаметр розпару в порівнянні з горном дозволяє зменшити розпал футерування, віддаляючи від стін потік гарячих газів, які піднімаються.

Одним з основних умов роботи доменних печей є інтенсифікація доменного процесу, яка передбачає такі технологічні заходи, як: 1) поліпшення якості шихти, 2) підвищення тиску газу під колошником, 3) збільшення температури дуття, 4) збагачення дуття киснем, 5) автоматизація процесу завантаження шихти в піч і ін. (Це скорочує час плавки, зменшує витрату газу, підвищує якість і знижує собівартість чавуну).

Доменна піч характеризується високим ступенем автоматизації. На багатьох печах автоматизовані системи шихтоподачі, автоматично підтримується рівень засипу, розподіл шихтових матеріалів в печі, тиск газу, температура, вологість дуття та ін.

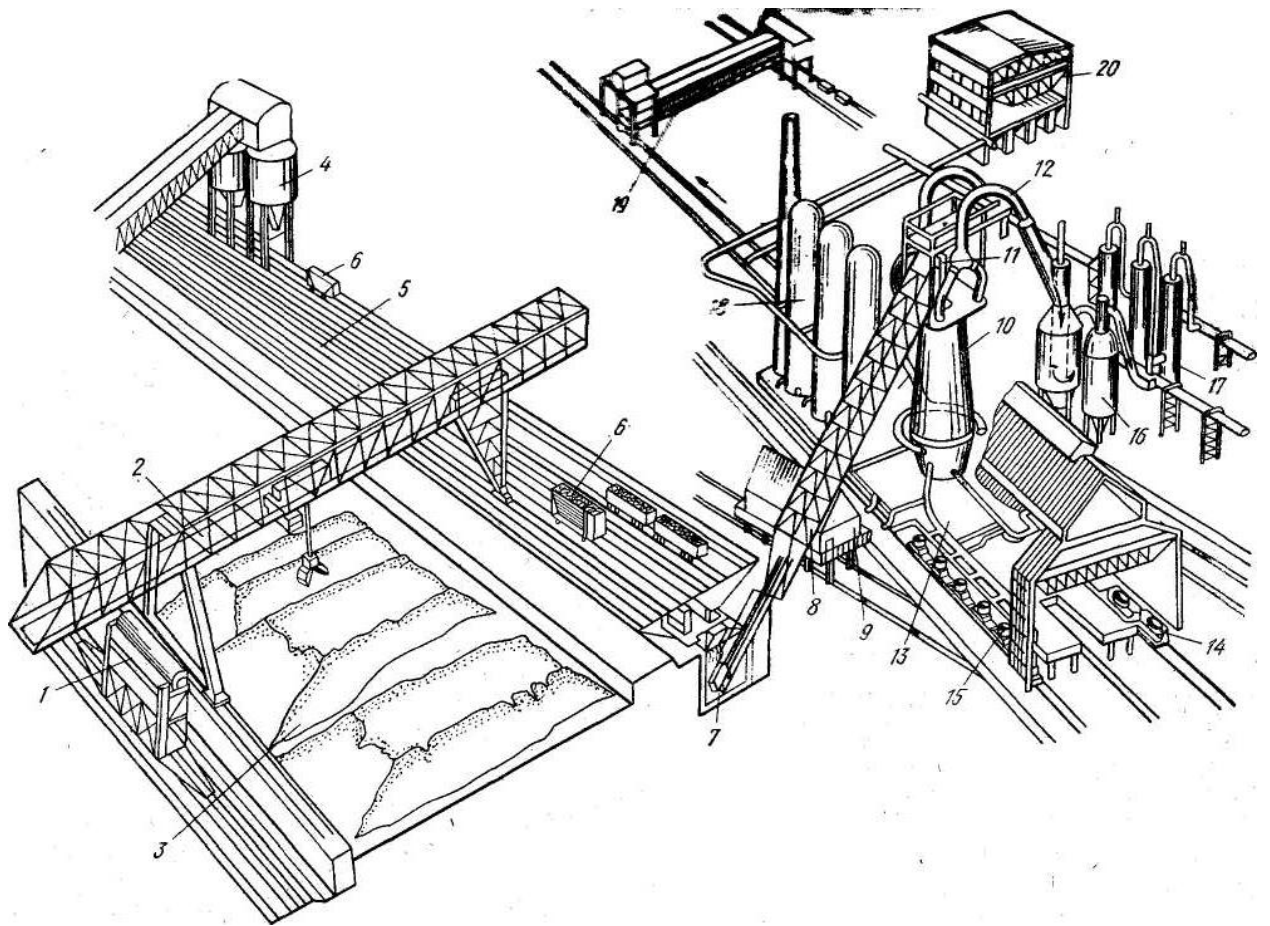
Нові печі оснащують системами централізованого контролю і управління. Ведуться роботи по комплексній автоматизації доменної печі з використанням ЕОМ.

Робота доменної печі характеризується наступними показниками:

- добова продуктивність і витрата коксу на 1 тонну чавуну;
- коефіцієнт використання корисного об'єму (КВКО), який визначається як відношення корисного об'єму печі ( $m^3$ ) до її добової продуктивності (т).

### **3.2 Пристрій доменного цеху і подача матеріалів у доменну піч**

Пристрій доменного цеху приведено на рис. 3.2 [1, с. 76–81]. Постачання доменної печі шихтовими матеріалами здійснюється через бункерну естакаду (протилежна сторона газоочистки і випуску чавуну).



1 – вагоперекидувач; 2 – перевантажувальний кран; 3 – штабеля матеріалів рудного двору; 4 – коксовий силос; 5 – бункерна естакада; 6 – перевантажувальні вагони (рудний і коксовий); 7 – скіпова яма; 8 – скіповий підйомник; 9 – машинна будівля; 10 – доменна піч; 11 – колошниковий пристрій доменної печі; 12 – газовідводи; 13 – ливарний двір; 14 – чавуновози; 15 – шлаковози; 16 – пиловловлювачі грубої очистки; 17 – агрегати тонкого очищення газу; 18 – повітрянагрівачі; 19 – розливна машина; 20 – повітродувна станція  
 Рисунок 3.2 – Пристрій доменного цеху з рудним двором

Створюється запас агломерату на 16...24 години роботи печі, а коксу на 4...6 годин. При роботі доменних печей на агломераті великий рудний двір роблять у аглофабрик.

На рис. 3.3 приведена схема подачі шихти за допомогою скіпового підйомника [1, с. 181–183].

У скіповій ямі розташоване обладнання для сортування, зважування та завантаження матеріалів в скіпи. В даний час широке застосування на доменних печах обсягом понад 2000 м<sup>3</sup> знаходить конвеєрний спосіб завантаження матеріалів в піч (рис. 3.4).

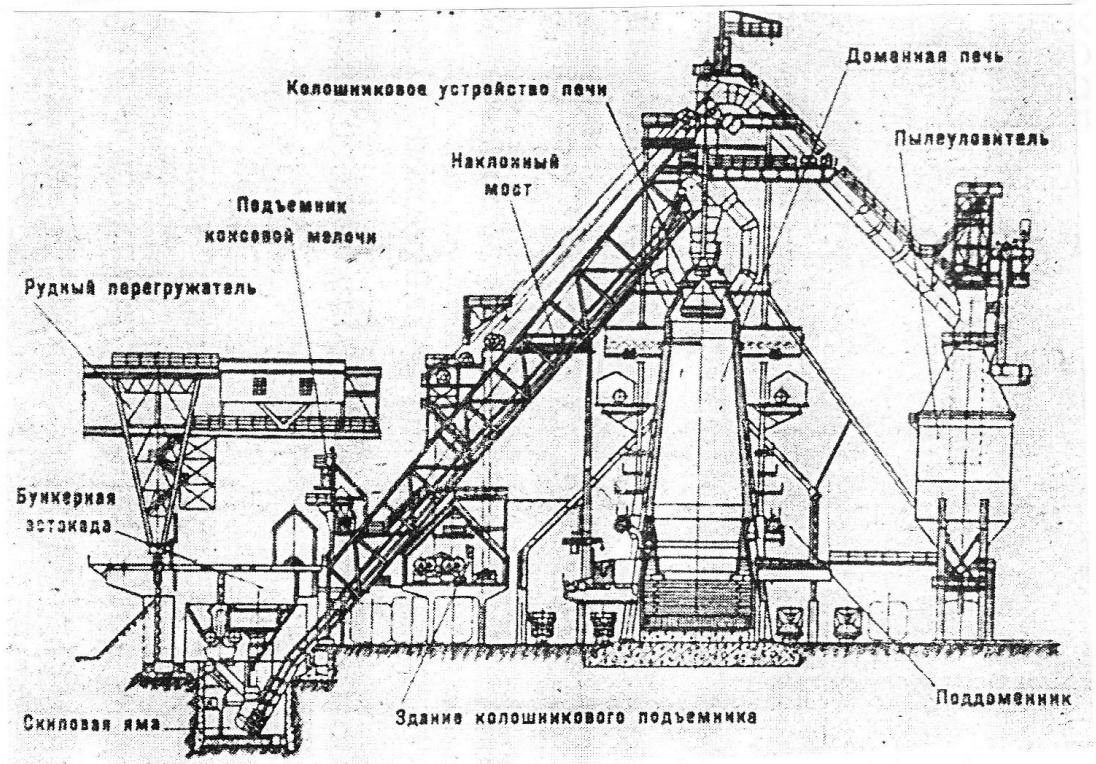


Рисунок 3.3 – Розріз доменного цеху зі скиповою подачею шихти

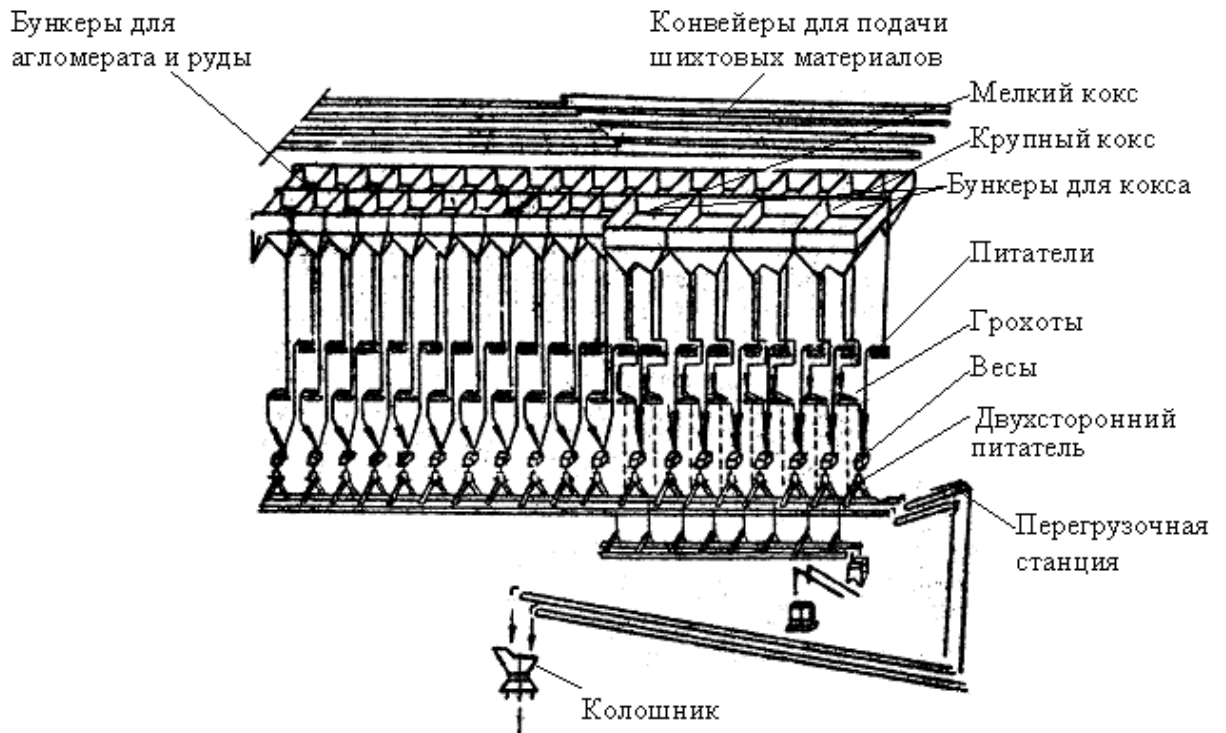


Рисунок 3.4 – Схема транспортерної подачі шихтових матеріалів від бункерів до колошника доменної печі



При такій подачі порції матеріалів на транспортері розміщують з інтервалом 25 м. Це дозволяє поєднувати безперервну роботу транспортера з періодичним завантаженням печі та роботою конусів.

### 3.3 Організація доменної плавки

В процесі роботи доменної печі необхідно забезпечити безперервне завантаження шихтових матеріалів в піч і розподіл їх на колошнику, подачу дуття, відведення й очищення колошникового газу, і прибирання чавуну і шлаку (рис. 3.5) [1, с. 84–85].

Сучасні доменні печі працюють з обов'язковим використанням колошникового газу і підтриманням підвищеного тиску на колошнику.

Роль газового затвора виконує засипної апарат з двома конусами. Ще одне призначення засипного апарату – забезпечення рівномірності розподілу шихтових матеріалів по колу і перетину колошника (рис. 3.6).

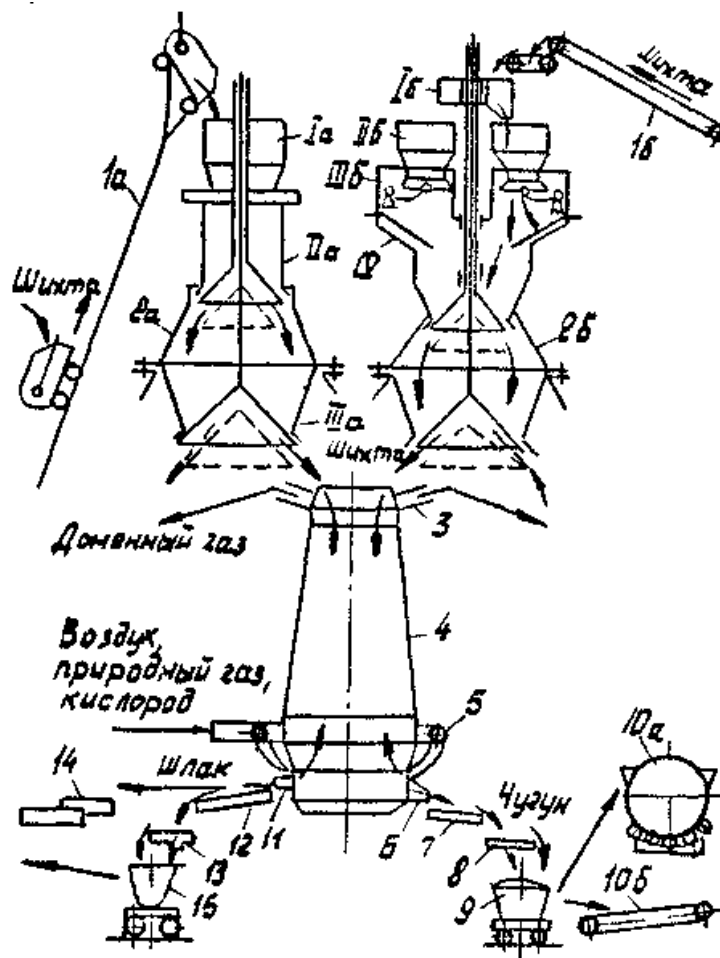
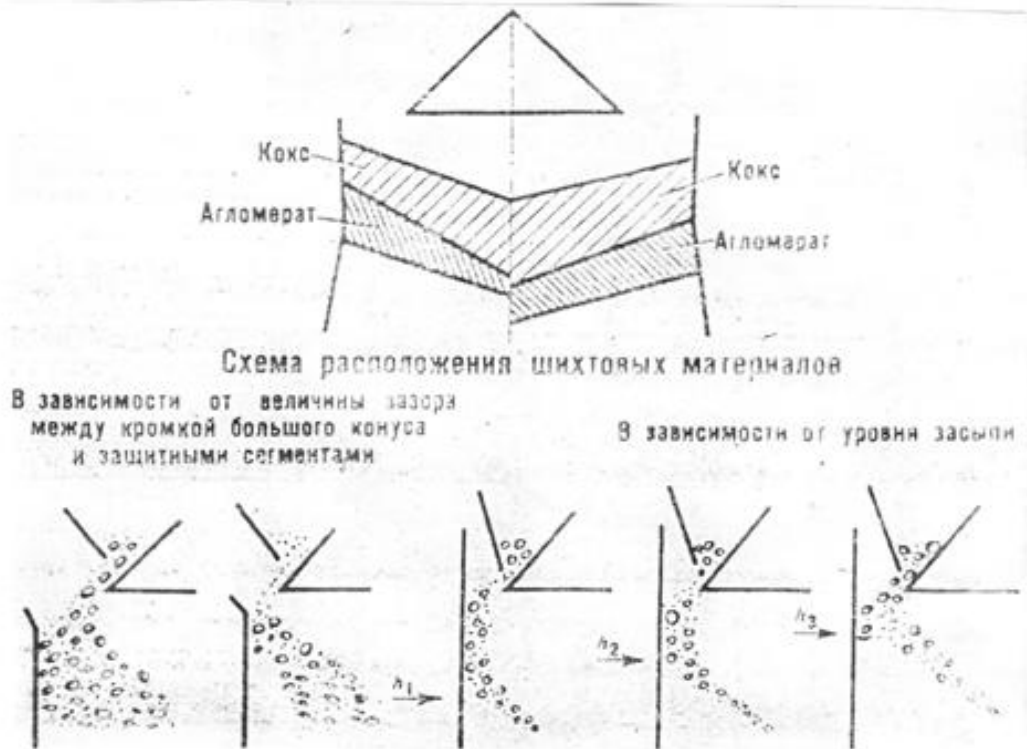


Рисунок 3.5 – Загальна схема організації доменної плавки



а)



б)

Рисунок 3.6 – Схемы работы засыпного пристрою доменной печи (а) і розподіл шихтових матеріалів по колу і перетину колошника (б)

Розподіл шихтових матеріалів по колу і перетину колошника забезпечують вибором зазору між кромкою великого конуса і захисними сегментами колошника (закладається при проектуванні печі), а також шляхом зміни швидкості опускання великого конуса, вибору черговості і маси подач (див. рис. 3.6, б).

При нормальному режимі роботи доменна піч споживає щохвилини обсяг повітряного дуття, що дорівнює двом її корисним обсягам. Температура дуття –  $1200^{\circ}\text{C}$ , вологість дуття –  $15\text{...}35\text{ г/м}^3$ . Нагрівання повітря здійснюється в повітрянагрівачах (рекуператорах) (рис. 3.7).

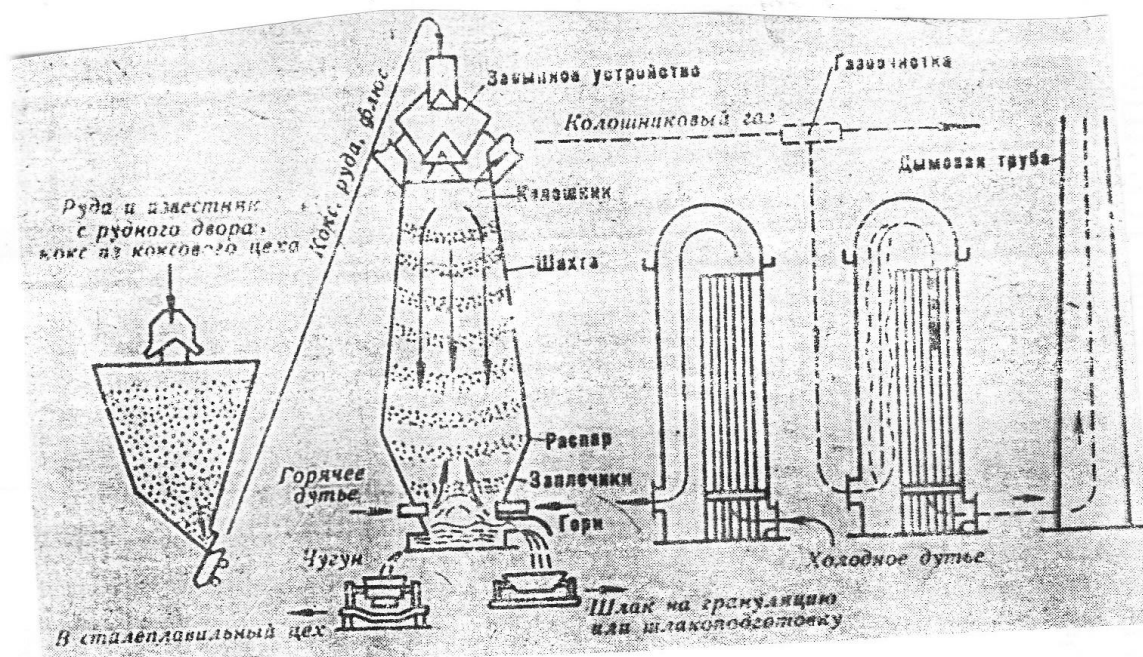


Рисунок 3.7 – Схема нагріву і подачі повітряного дуття

Колошниковий газ відводиться з печі за допомогою газовідводів і похилих газопроводів і піддається очищенню від колошникового пилу в пилоуловлювачах (1 стадія), скрубберах (2 стадія) і магнітних фільтрах (3 стадія).

У початковому стані колошниковий газ містить до  $10\text{...}100$  грам пилу на  $1\text{ м}^3$ . Зміст пилу на першій стадії очищення газу знижується до  $1\text{...}3\text{ г/м}^3$ , на другій стадії – до  $0,05\text{ г/м}^3$ , а на третій – до  $0,01\text{ г/м}^3$ .

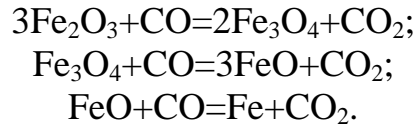
Випуск чавуну здійснює через кожні  $3\text{...}4$  години роботи печі, а шлаку – через  $1\text{...}1,5$  години.

Доменний процес має безперервний характер. Його вихідні ланки – опускання завантажених шихтових матеріалів і протитечія газів із зони горіння коксу – відбувається постійно і приблизно в одному режимі. Цим визначається стійкість умов роботи окремих елементів печі і протікаючих перетворень. Створюються вигідні передумови для контролю і автоматичного регулювання як теплових, так і фізико-хімічних процесів в доменній печі.

В основі доменного процесу – фізико-хімічні зміни, які відбуваються з вихідними матеріалами аж до утворення чавуну і шлаку.

Здійснення процесів відновлення оксидів заліза, які містяться в агломераті – головна мета доменної плавки. Це призводить до утворення чавуну, до складу якого крім заліза переходять Mn, Si, P, S.

Відновлювачі оксидів заліза – CO, H<sub>2</sub> і C. Процеси відновлення протікають по реакціях:



Механізм процесів відновлення оксидів заліза газами є складним і включає ряд стадій, що мають хімічну і дифузійну природу.

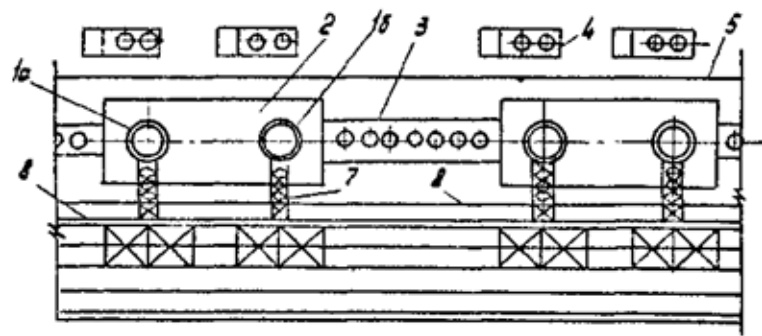
В результаті плавки отримують чавун переробний (0,5...1,3 % Si; 0,6...1,2 % Mn; 0,15...0,2 % P; 0,03...0,07 % S), ливарний (3,26...3,75 % Si; 0,91...1,3 % Mn; 0,1...0,3 % P; 0,02...0,07 % S), а також феросплави: феромарганець (70...75 % Mn; 7 % C), феросиліцій (12...18 % Si; 2 % C), дзеркальний чавун (10...25 % Mn).

### **3.4 Типи планувань доменного цеху**

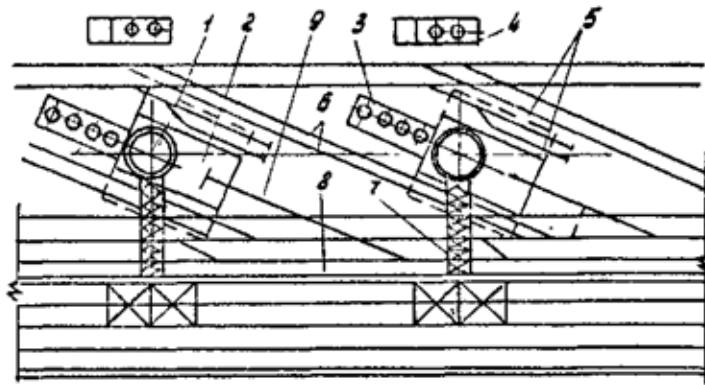
У зв'язку зі збільшенням обсягу печей, вдосконаленням технології виробництва чавуну і конструкції обладнання планування доменних цехів зазнали істотних змін (рис. 3.8 і 3.9).

Основна вимога до планів доменних цехів – раціональні розташування всіх основних споруд, агрегатів, машин, механізмів і транспортних шляхів, що забезпечують нормальну роботу цеху [1, с. 85–87].

Останнім часом будують печі з конвеєрною подачею шихтових матеріалів на колошник доменної печі (наприклад, на печі 5000 м<sup>3</sup> Кривий Ріг) (див. рис. 3.9, а).



a)

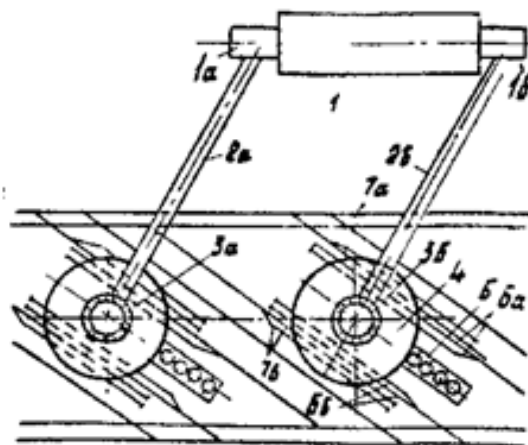


б)

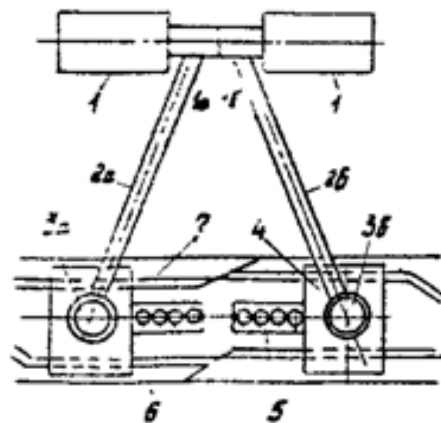
*а – 1-е типове планування з блоковим розташуванням печей і загальним ливарним двором;*

*б – 2-е типове планування з індивідуальним (острівним) розташуванням печей*

*Рисунок 3.8 – Типи планувань доменного цеху зі скіповою подачею шихти*



a)



б)

*а – варіант окремо розташованих завантажувальних відділень;*

*б – варіант з центральним розташуванням завантажувальних відділень*

*Рисунок 3.9 – Типи планувань доменного цеху з конвеєрною подачею шихти*

## **4 ЛЕКЦІЯ 4**

### **ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ**

#### **4.1 Загальні відомості**

Сталь – сплав заліза з вуглецем та іншими елементами (Mn, P, S і ін.), що знаходяться в ній в різних пропорціях.

Вихідний матеріал для її виплавки – переважно чавун (від 15 до 100 % металевої частини шихти), який містить значно більше вуглецю, Si, Mn, P і ін. (Cr, Ti) елементів, ніж сталь.

Вся сталь, отримана людством, проведена шляхом видалення цих компонентів за рахунок їх окислення. Таким чином, можна сказати, що типовим для виробництва сталі є окислювальні процеси.

У кожен момент плавки має місце нерівновага система метал-шлак-газ, в якій безперервно протікають процеси обміну киснем. Завданням сталеплавильників є зазвичай не припинення цих процесів і досягнення рівноваги в системі, а розумне регулювання інтенсивності цих процесів, що забезпечує до моменту закінчення плавки оптимальний для заданої марки сталі склад ванни.

#### **4.2 Класифікація способів виробництва сталі**

##### ***4.2.1. Виробництво сталі в конверторах***

Вперше спосіб здійснений в варіанті бесемерівського процесу (1855 р.) і у варіанті томасівського процесу (1878 р.).

Особливості способу – високі швидкості окислювальних процесів у ванні при мінімальній тривалості плавки (10...30 хв).

Мартенівський і електросталеплавильний процеси, що виникли пізніше, менш продуктивні, однак, якість металу вище.

Тому конверторний процес загальмувався (низька якість металу і неможливість переробки значної кількості твердого скрапу).

Сучасний розвиток конверторного виробництва сталі пов'язано з розробкою нових його варіантів (якість) і можливістю використання в великих кількостях технічного кисню (киснево-конверторний процес).

Бесемерівський і томасовський процеси – процеси донної продувки. Їх сутність – безпосередня взаємодія окислювачів, газової фази (повітря) з рідким чавуном, залитим в конвертор на початку процесу.

Повітряне дуття подається під тиском через днище конвертора з розосередженням по фурмам, які мають кілька сопел, що дозволяє збільшити поверхню контакту розплаву з дуттям (рис. 4.1, а).

Склад вихідного чавуну забезпечує таке тепловиділення за рахунок окислення його домішок киснем дуття, що відбувається нагрів металу від початкових температур 1150...1300° С до 1580...1620° С і вище.

Додаткові вимоги до складу рідкого чавуну визначаються хімічним характером футерування конвертора.

Для залізних руд з низьким вмістом фосфору і сірки переробка рідкого чавуну з цих руд ведеться в конверторах з кислотою футеровкою бесемерівським процесом. Чавун в цьому випадку повинен містити достатню кількість кремнію і марганцю (для забезпечення окислювальних процесів і нагрівання до потрібної температури випуску).

Окислення кремнію призводить до утворення шлаків, багатих  $\text{SiO}_2$ , тобто кислотних за своїм хімічним характером. Такі шлаки є нейтральними по відношенню до кислотої футеровки конвертора і практично не видаляють фосфор і сірку з металу.

Тому бесемерівські чавуни містять приблизно 0,06 % Р і S при 0,7...1,25 % Si і 0,5...0,8% Mn.

В чавун можуть додавати 1...3 % залізної руди, скрапу або прокатної окалини.

Конвертор (див. рис. 4.1, а) футерують динасовою цеглою (стійкість футеровки більше 1000 плавок).

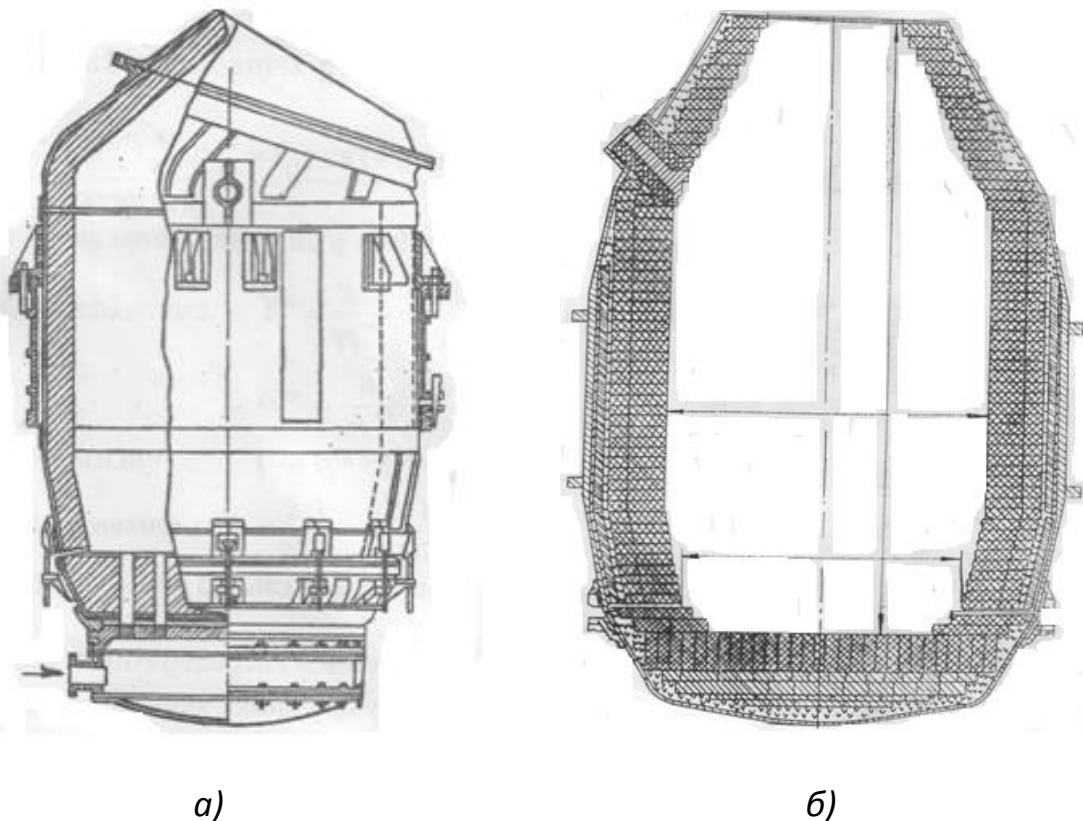


Рисунок 4.1 – Конструкції конверторів з донною продувкою (а) і кисневого (б)

Обсяг конвертора – 6...10 обсягів чавуну, який заливається. Такий обсяг конвертора необхідний, так як відбувається роздроблення металу при продувці на дрібні краплі і сильний підйом його рівня.

Бесемерівський процес не підходить для переробки чавунів з підвищеним вмістом фосфору (1,6...2 %). Було запропоновано томасовський процес в конверторах з основною футеровкою. Тут головним джерелом тепла є реакція окислення фосфору, проте з добавкою флюсів, які містять СаО (для повноти протікання реакції окислення). Зміст кремнію в чавуні має бути малим, щоб уникнути утворення кислих шлаків, агресивних по відношенню до основної футеровки.

Конструкція томасівського конвертора (див. рис. 4.1, а) принципово не відрізняється від бесемерівського, але обсяг конвертора збільшений до 11...13 обсягів чавуну, який заливається.

Футеровка – обпалений доломіт з добавкою кам'яновугільної смоли. Стійкість футеровки – 400...450 плавов.

Класичний варіант конверторного процесу (бесемерівський і томасівський) має недоліки: низька якість стали, обмеженість складів чавунів, які переробляються, неможливість переробки металу в великих кількостях.

Варіанти конверторного виробництва сталі без зазначених недоліків стали можливі при застосуванні великих кількостей кисню. Ефект застосування технічного кисню в конверторному виробництві особливо виявився при подачі дуття до металу вертикально зверху. Подача знизу не дала позитивних результатів (низька стійкість фурм і днищ).

Основними економічними передумовами розвитку киснево-конверторного виробництва були:

1. Досить висока якість металу, конкурентного з мартенівською сталлю.
2. Висока продуктивність агрегатів (в 100-тонному конверторі виплавляється в рік стільки ж стали, скільки в 900-тонній мартенівській печі).
3. Порівняно невеликі капіталовкладення.
4. Більш низька вартість переділу киснево-конверторного сталі в порівнянні з мартенівською.
5. Більш короткі терміни введення в дію кисневих конверторів та киснево-конверторних цехів.
6. Простота технології, ефективна керованість і можливість автоматизація процесу плавки.

Вихідні матеріали киснево-конверторного плавки – чавун (знижені вимоги за кількістю Mn, P, Si і S) практично будь-якого складу, скрап до 25...30 % від маси рідкого чавуну (шматки до 200 кг), залізна руда, прокатна окалина, вапно (6...9 %) і ін. (рис. 4.2).



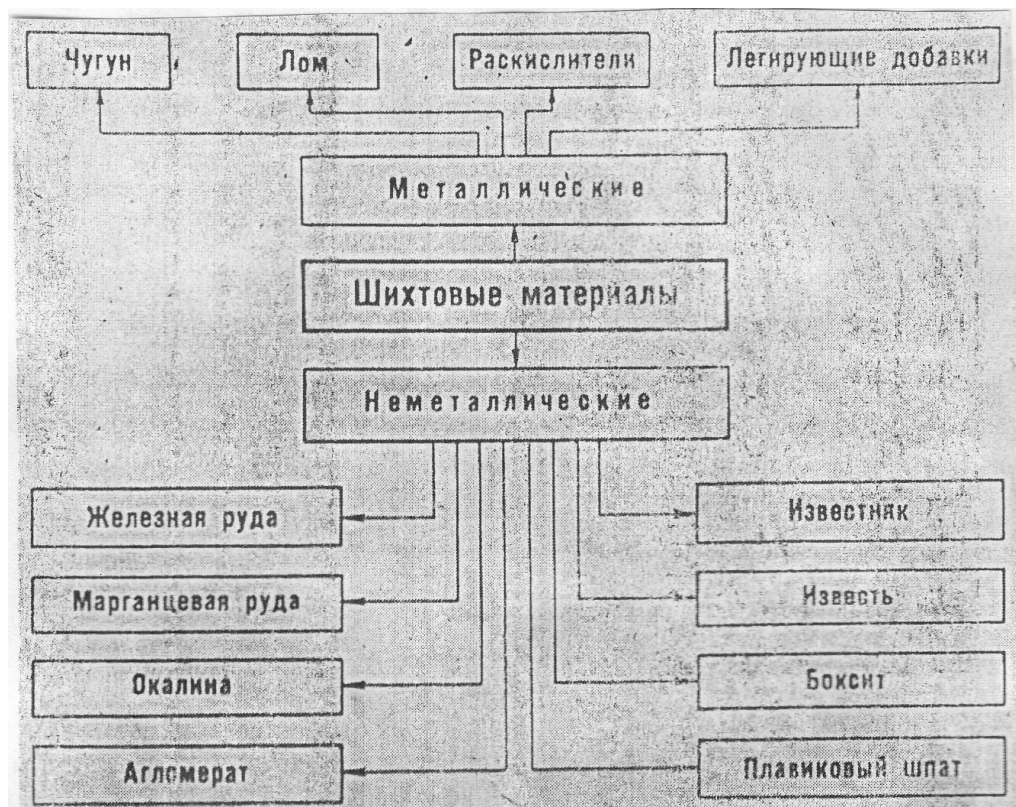


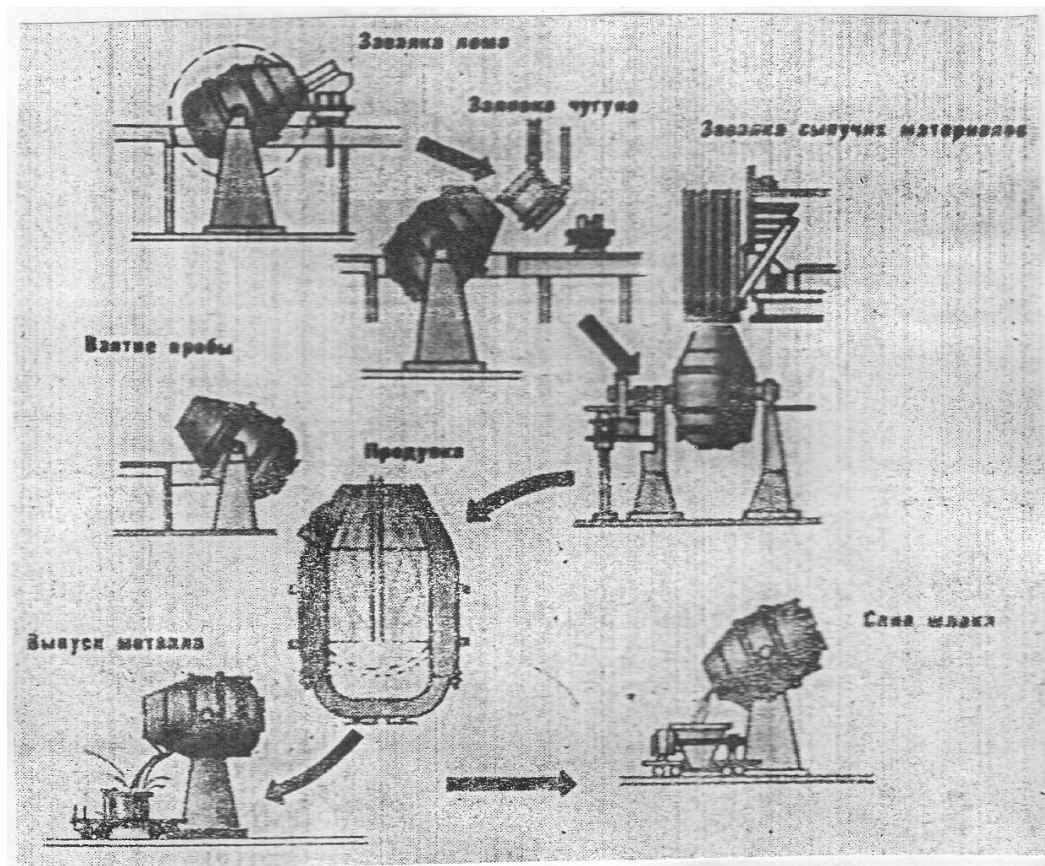
Рисунок 4.2 – Состав шихты для кислородно-конверторной плавки

В даний час – тенденції до збільшення ємності конверторів. При цьому конструкції їх не змінюються (див. рис. 4.1, б).

Конвертори нової конструкції мають "тигельну" форму і виконуються без роз'єму корпусу. У деяких випадках передбачають відокремлену горловину.

Кисневі конвертори футерують основними вогнетривкими матеріалами. Футеровку викладають двошаровою (арматурний шар до 250 мм, що примикає до корпусу конвертора викладають з магнезитової цегли (служить декілька років), робочий шар футеровки до 750 мм виконують з більш стійкої смолодоломітової цегли. Між цими шарами робиться проміжний шар (100 мм) з смолодоломітового набивання. Стійкість футеровки до 400...600 плавок.

Періоди роботи кисневого конвертора наведені на рис. 4.3. За традиційною схемою приблизно п'ята частина часу роботи конвертора витрачається на контроль температури і визначення хімічного складу розплаву в конверторі – так встановлюють якість металу і його готовність. Тому важливо мати можливість безперервного контролю за цими показниками прямо в ході плавки.



*Рисунок 4.3 – Схема роботи кисневого конвертора*

Встановлено, що склад газів, що виділяються з конвертора в ході плавки, досить повно відповідає складу розплаву. Однак для більшої повноти і точності аналізу необхідно враховувати різні фактори, які змінюються під час плавки. Спеціальна установка відбирає проби газів з конвертора, аналізує їх склад і температуру, обробляє цю інформацію на ЕОМ і видає результати на дисплеї. Аналіз складу ведеться на основі маспектрометрії, для чого створені прилад і спеціальні методи, що дозволяють при виплавці сталі визначати концентрацію вуглецю в різних марках металу, а також безперервно вимірювати температуру розплаву.

Пристрій конверторного цеху приведено на рис. 4.4.

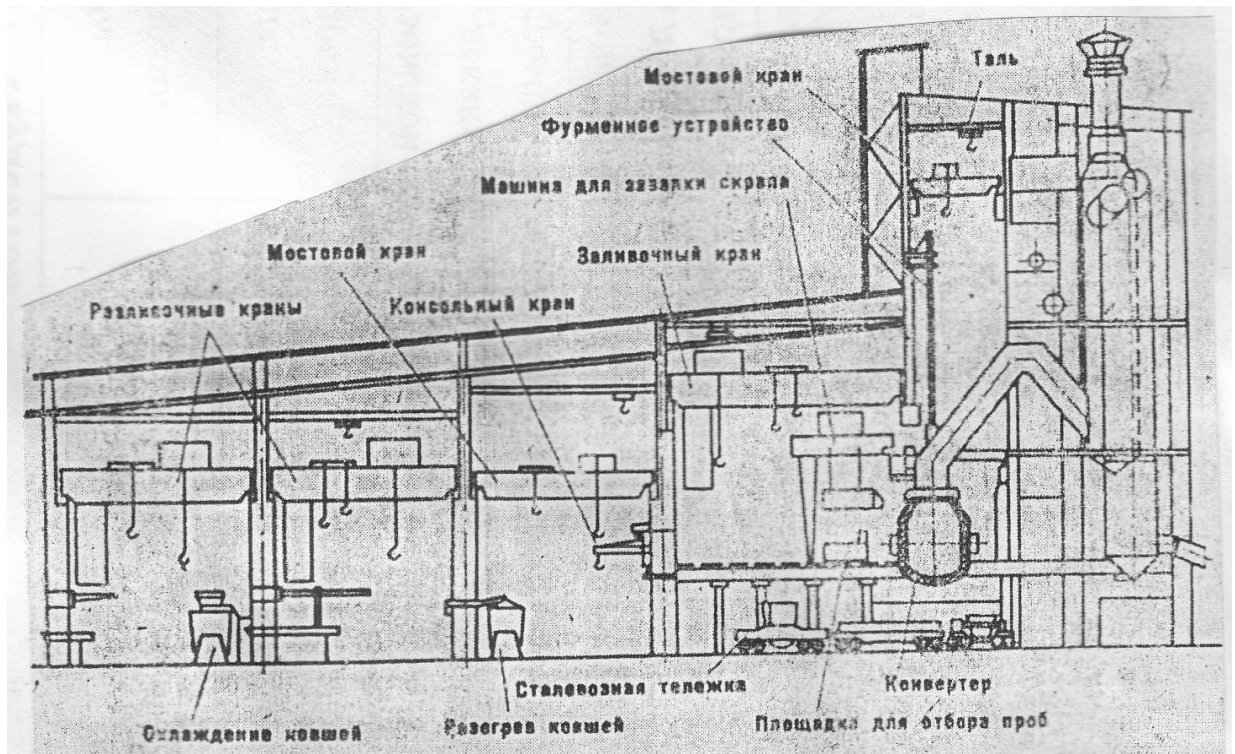


Рисунок 4.4 – Поперечный разрез конвертерного цеху

#### 4.2.2 Производство стали в электропечах

За способом перетворення електричної енергії в теплову розрізняють дугові електропечі, електропечі опору, індукційні печі (рис. 4.5).

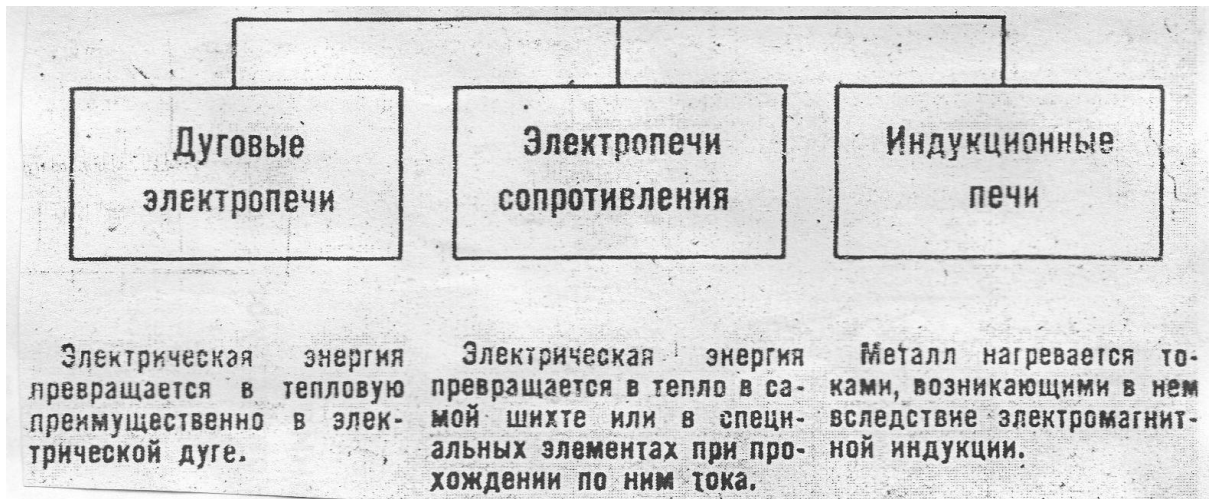


Рисунок 4.5 – Класифікація електричних печей

### 4.2.3 Виробництво сталі в мартенівських печах (мартенівський процес)

Мартенівський процес дозволяє отримувати литу сталь плавленням брухту і чавуну на поду ванни відображувальної печі. Процес окислювальний, але щоб нагріти і розплавити тверді матеріали і здійснити фізико-хімічні процеси перетворення чавуну в сталь необхідний безперервний приплив тепла. Для цього безпосередньо в мартенівській печі спалюється паливо.

Необхідна кількість тепла отримують випромінюванням від полум'я зводу і стін печі. Таким чином, мартенівська піч – полум'яна відбивна піч.

Для достатності температури пічного простору застосовують принцип регенерації тепла (використовують тепло продуктів згоряння для нагріву повітря і газового палива). Регенеративні камери встановлюють симетрично з двох сторін печі. Тому мартенівська піч працює реверсивно (факел створюється то з одного, то з іншого боку).

Таким чином, мартенівська піч є окислювальним, ванним, полум'яним, відбивним, регенеративним, реверсивним плавильним агрегатом (рис. 4.6).

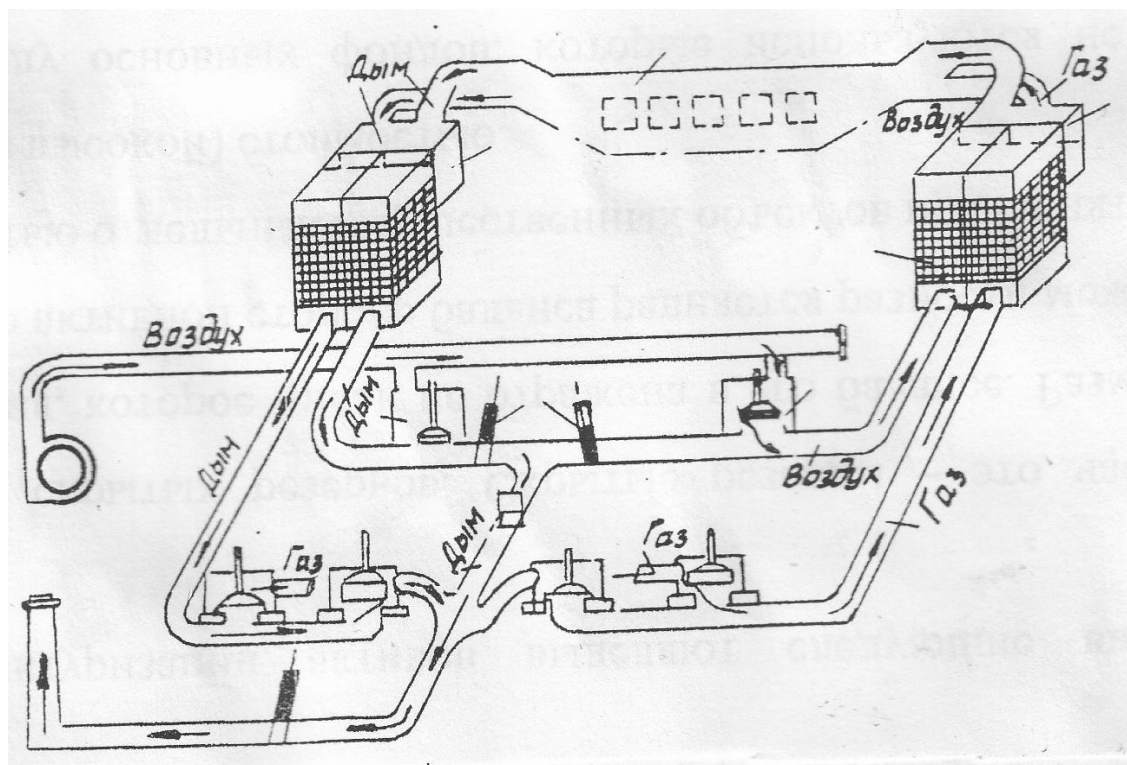


Рисунок 4.6 – Схема мартенівської печі

Залежно від футеровки мартенівські процеси ділять на кислий і основний. Кислі печі (динас), під - кварцовий пісок. У таких печах можна створювати тільки кислі шлаки. Тут не видаляються фосфор і сірка, тому вихідна шихта повинна бути чистою від шкідливих домішок (отримують високоякісні сталі).

Основні печі викладаються з доломіту, магнезиту.

Мартенівський процес дозволяє переробляти різноманітні шихти по співвідношенню в них чавуну і скрапу (рис. 4.7).

Скрап-процес. Основна частина шихти – лом (чавун 15...40 %). В завалку залізна руда не дається, її потім трохи вводять для інтенсифікації та регулювання окислення домішок. Паливо – газове й рідке. Чавун – твердий і рідкий.

Мартенівська плавка ділиться на наступні періоди:

Скрап-процес: заправка, завалка, прогрів і плавлення, кипіння, розкислення і легування, випуск.

Скрап-рудний процес: заправка, завалка, прогрів, заливка чавуну, дефосфорція ( $F_2O$ ), плавлення, кипіння, розкислення і легування, випуск.



Рисунок 4.7 – Варіанти мартенівського процесу

#### 4.2.4 Двованні сталеплавильні печі

Зростання виробництва сталі буде пов'язане з киснево-конверторним виробництвом, однак, це не означає можливості ліквідації мартенівського виробництва сталі.

Універсальність і гнучкість – гарантія його збереження.

Встановлено, що техніко-економічні показники мартенівських печей ростуть зі зростанням міцності агрегату (оптимальна 500...600 тонн).

У найближчі роки розвиток мартенівських печей піде шляхом інтенсифікації технологічних процесів, вдосконалення застосування кисню, підвищення теплового режиму, вдосконалення вогнетривів, автоматизації.

Недоліки: реверсивна робота печі.

В даний час пройшли промислові випробування двованні кисневі печі (рис. 4.8).

Ванни завантажуються по черзі. Під час продувки рідких розплавів киснем в одній ванні, в іншій виробляють завалку.

Під час продування виділяється багато СО. Утилізація тепла першої ванни дозволяє відмовитися від регенераторів.

Продуктивність двованної печі вище будь-якого сталеплавильного агрегату, включаючи сучасний конвертор. Плавка – 4 години (інтервал між випусками – 2 години).

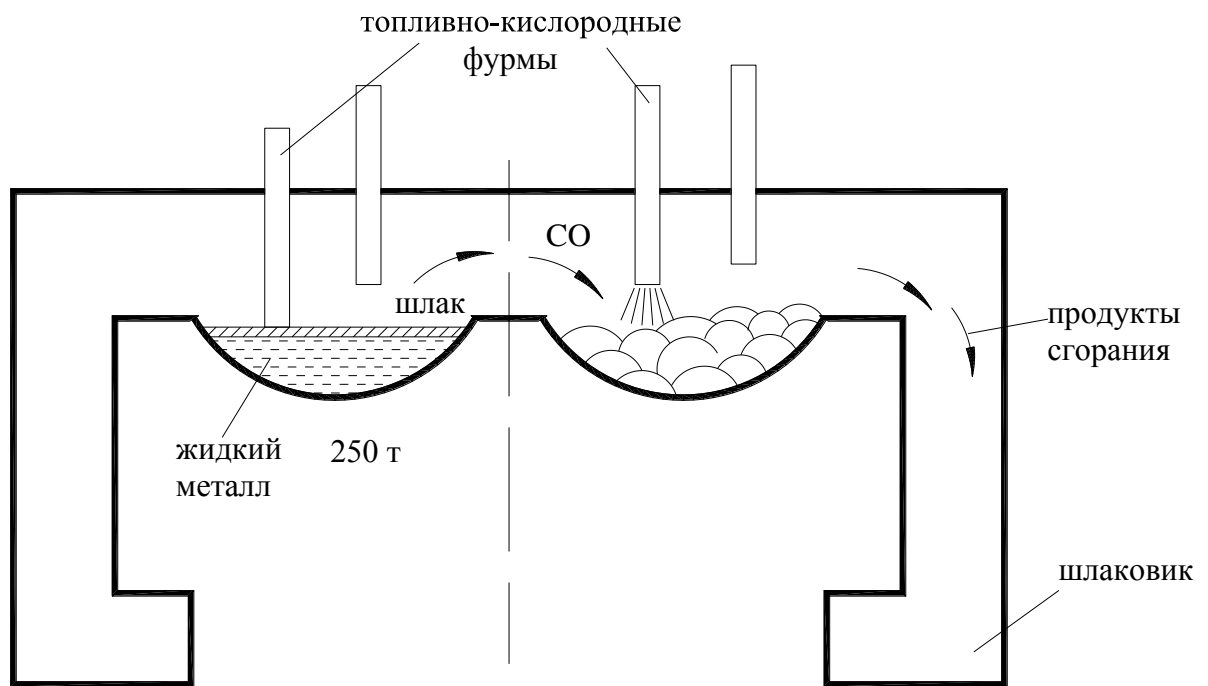


Рисунок 4.8 – Схема двованної кисневої печі

#### 4.2.5 Виробництво сталі в електронечах

У зв'язку з тим, що основним способом виплавки сталі є киснево-конверторний спосіб, який споживає меншу кількість брухту в порівнянні з мартенівським, виникли передумови для більш швидкого розвитку електросталеплавильного виробництва, що працює на твердій шихті. Друга важлива

причина розвитку виплавки сталі в електродугових печах – все зростаюча потреба в легованих сталях і чистому металі з металізованих окатишів.

Розвиток електродугових способів виробництва сталі йде паралельно з киснево-конверторним.

На металургійних заводах з великим обсягом виробництва низьколегованої і трансформаторної сталей в основному застосовують дугові трифазні електродугові печі ємністю 50, 100 і 200 т.

На спеціалізованих заводах з виробництва високоякісної та спеціальної сталей застосовують дугові електродугові печі ємністю 100 т, індукційні електродугові звичайних конструкцій і вакуумні.

Високоякісні злитки (за структурою і поверхнею) отримують в вакуумних електродугових печах з електродом, що витрачається і в печах електродугового переплаву. Останнім часом для отримання сталей для атомної і ракетної техніки застосовують електронно-променеві плазмові печі. Феросплави виплавляють в дугових електродугових печах на спеціалізованих заводах.

Виплавка сталі в дугових електродугових печах заснована на тому, що електрична енергія перетворюється в теплову внаслідок електричного розряду, що протікає в газовому середовищі або у вакуумі. В електричному розряді зосереджуються висока концентрація енергії і величезні потужності в невеликих обсягах металу, в результаті чого виходять високі температури і швидке розплавлення металу.

За способом теплової дії електричної дуги на метал дугові електродугові печі можна розділити на печі з незалежною дугою, печі із закритою дугою і печі з залежною дугою.

Печі з залежною дугою – дугові печі прямої дії, в яких шихта, як частина електричного кола, обтікається повним струмом, дуговий розряд залежить від властивостей металу, який розплавляється.

Дуга горить між електродами і розплавляється металом, безпосередньо нагріваючи останній. В електродугових печах з залежною дугою можна застосовувати довгі графітові електроди великого перерізу, що допускають значну силу струму, що забезпечує велику потужність і продуктивність цих печей. Вони отримали найбільш широке поширення для виплавки електродугової сталі.

В даний час на металургійних заводах, в основному, встановлюють електродугові печі з склепінням, що обертається, типової серії ДСП (дугові сталеплавильні печі) ємністю 12, 25, 50, 100 і 200 т.

Як приклад на рис. 4.9 наведена технологія плавки в основній дуговій печі.



Рисунок 4.9 – Технологія плавки в основній дуговій печі  
 Этапы плавления шихты в печи электродуги наведены на рис. 4.10.

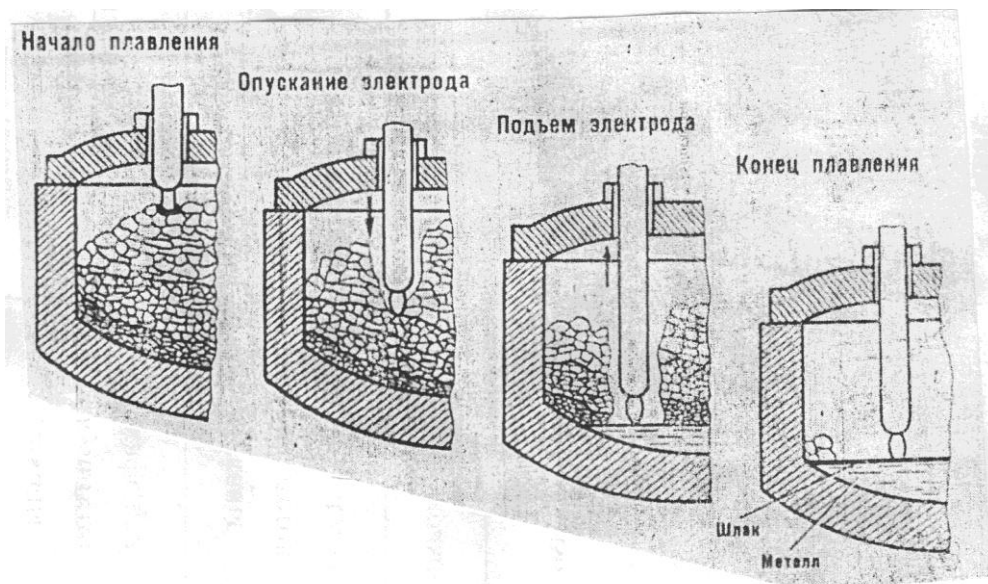


Рисунок 4.10 – Этапы плавления шихты в электродуговой печи

Пристрій цеху з электродугової піччю наведені на рис. 4.11.



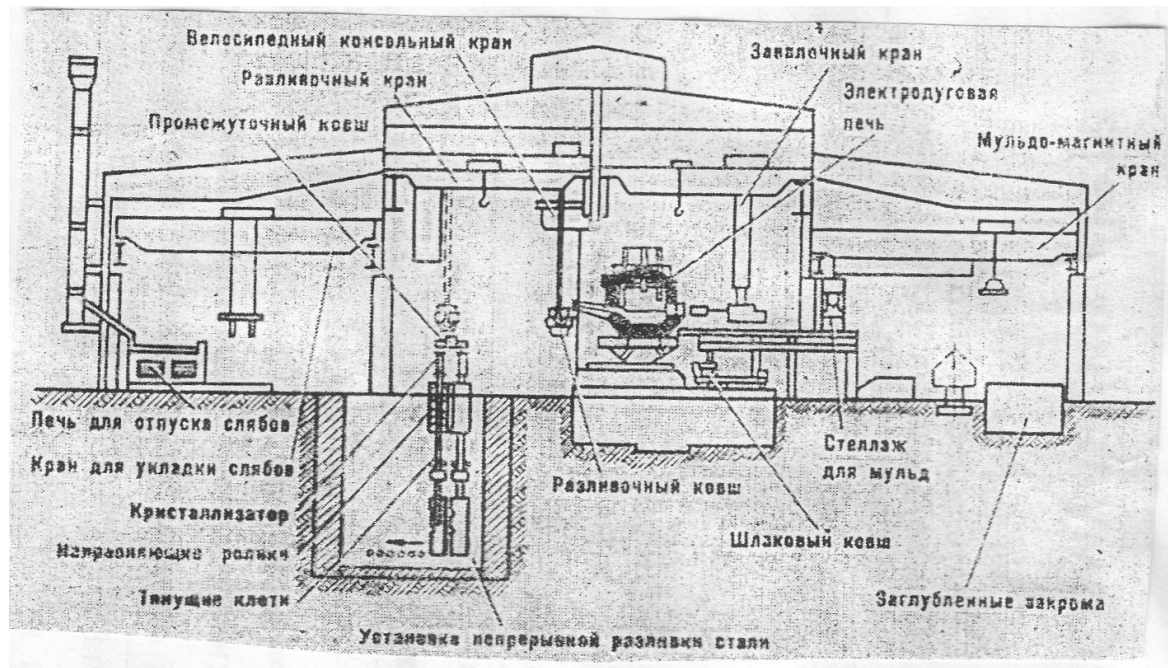


Рисунок 4.11 – Электросталеплавильный цех

В системе вантажопотоков электросталеплавильного цеху з дуговими елетропечами (рис. 4.12) розрізняють лінії доставки і завантаження брухту, подачі і завантаження сипучих шлакоутворюючих матеріалів і феросплавів, прибирання шлаку, розливання і прибирання сталі [2, с. 212–215].

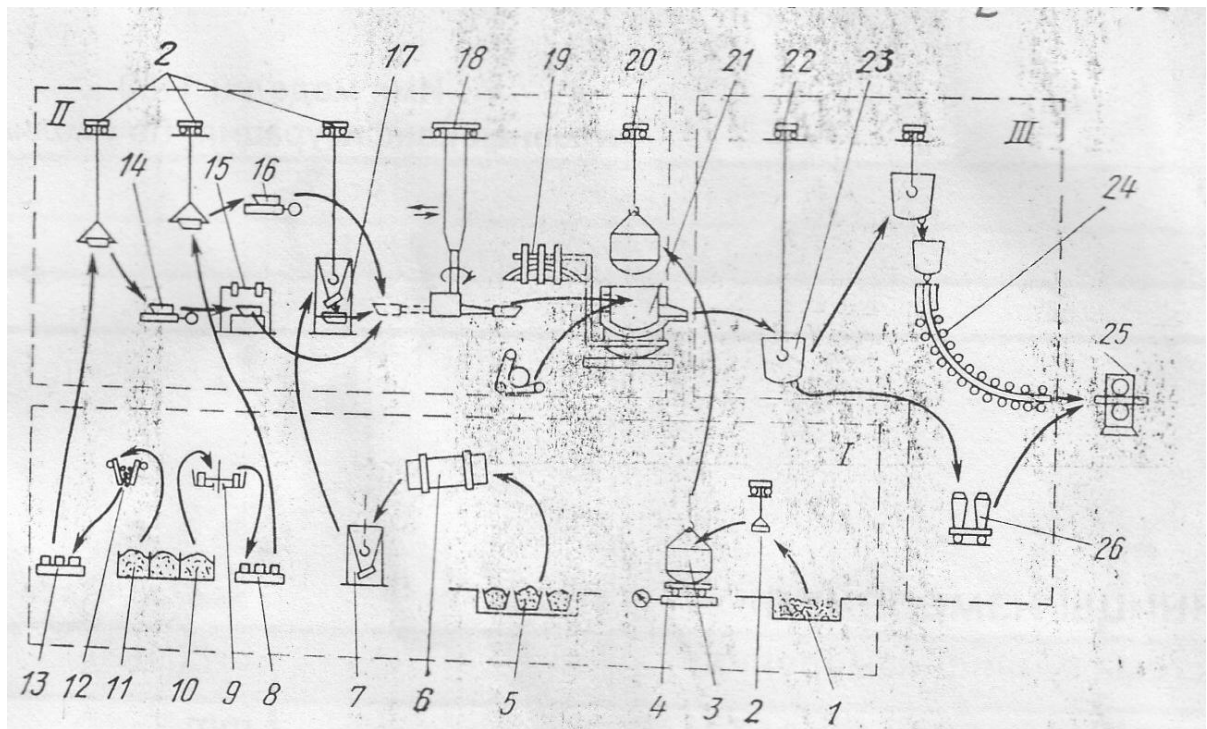


Рисунок 4.12 – Вантажопотоки электросталеплавильных цехів

## 5 ЛЕКЦІЯ 5

# ДОСЛІДНІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІ АГРЕГАТИ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ (ДСАБД). ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ. ПИТАННЯ ЕКОНОМІКИ

### 5.1 Загальні відомості

Поряд з вдосконаленням киснево-конверторного процесу ведуться пошуки щодо подальшої інтенсифікації сталеплавильного виробництва, більш повному використанню устаткування, підвищенню якості продукції, автоматизації всього виробничого циклу. У сучасних умовах для досягнення цих цілей необхідний перехід на безперервні процеси виробництва сталі.

В даний час є велика кількість варіантів ДСАБД, але промислового впровадження в широкому понятті немає. Дуже важко зберегти постійними параметри в певних точках потоку (по технологічній лінії) і неможливо з цієї причини отримати сталь заданого постійного складу. Ці труднощі викликані:

1. Значним зносом вогнетривів в часі (зміна розмірів поточних ємностей, отворів, жолобів, швидкості переміщення металу і шлаку і в'язкості шлаку в одних і тих же точках потокової лінії).

2. Коливаннями в складі вихідних шихтових матеріалів і реагентів.

3. Можливістю заростання отворів і жолобів для зливу шлаку.

4. Відсутністю надійних методів безперервного контролю складу і температури металу і шлаку, а, отже, неможливість коректування параметрів в окремих точках потоку.

З цих причин в різних лабораторних і напівпромислових установках безперервної дії певні успіхи досягнуті лише при виробництві маловуглецевої сталі. При виплавці середньовуглецевої сталі спостерігаються різкі коливання в концентрації вуглецю в струмені металу.

За подолання зазначених труднощів будуть створені умови для освоєння САБД. Це дозволить реалізувати наступні переваги безперервного сталеплавильного виробництва в порівнянні з традиційними періодичними процесами:

1. Висока продуктивність агрегату в цілому при порівняно малих темпах завантаження вихідних матеріалів і випуску готової сталі.

2. Рівномірне завантаження устаткування цеху і енергетичних установок; відсутність пікових навантажень.

3. Поділ САБД на ланки, в яких забезпечуються найкращі умови для видалення різних домішок металу, що сприяє підвищенню якості металу.

4. Зменшення відходів і втрат сталі.

5. Повне використання фізичного і хімічного тепла газів, які безперервно виділяються.

6. Зменшення ємності агрегатів і систем транспорту (відсутність одночасних завантажень), зменшення капітальних витрат.

7. Автоматизація.

У зв'язку з тим, що для швидкого видалення з металу різних елементів необхідні різні температури, склади шлаку і металу (наприклад, видалення

сірки протікає швидше при високому вмісті вуглецю в металі, наявність в металі кремнію і його окислення перешкоджають окисленню вуглецю і фосфору та ін.), найбільш раціональним є багатостадійний агрегат безперервної дії. Однак синхронізація процесів в послідовно розташованих реакційних посудинах пов'язана з великими труднощами, більшість яких необхідно ще подолати.

Розробляються варіанти САБД поділяються на конверторні (агрегати ВНІМетмаш-ЦНПЧМ в Росії і НМетАУ – в Україні, ІРСІД – у Франції, НРІМ – в Японії), подові (агрегати МІСіС – на базі мартенівської печі – в Росії, агрегат УОРКРА – на базі електродугової печі ) і струменеві (БІСРА – в Англії, Фест – в Австрії).

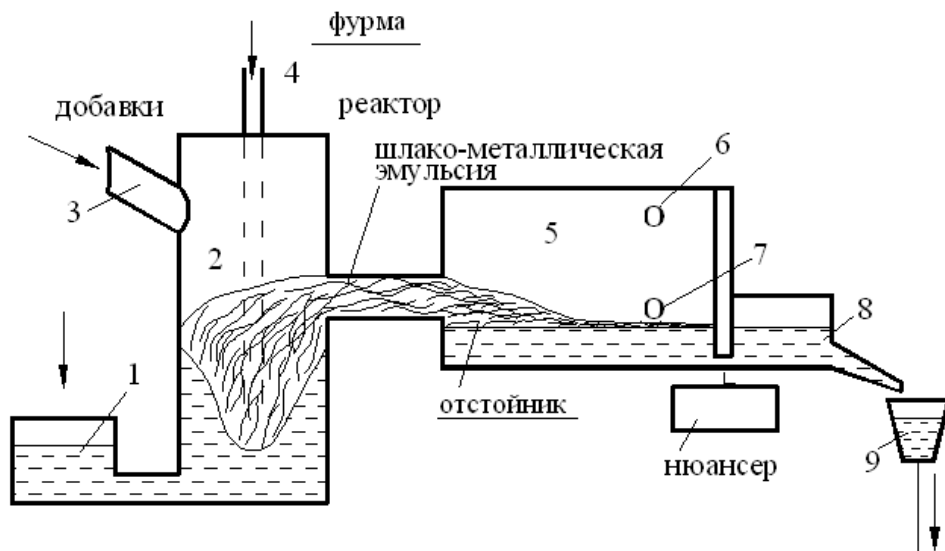
Найбільш перспективними визнані САБД конверторного типу, що поєднують гідності кисневих конверторів з перевагами агрегатів безперервної дії.

До них відносяться близькі по конструктивним і технологічним ідеям розробки ІРСІД у Франції і ВНІМЕТМАШ-ЦНПЧМ в Росії.

## 5.2 ДСАБД конструкції ІРСІД

Інститут чорної металургії Франції займається питаннями безперервного виробництва сталі з 1963 року.

В результаті інтенсивних пошуків до 1971 року була знайдена наступна оптимальна конструкція агрегату (рис. 5.1).



- 1 – металоприймач; 2 – реактор; 3 – отвір для подачі сипучих матеріалів в реактор; 4 – киснева фурма; 5 – відстійник;  
 6 – отвір для відводу газів; 7 – вікно для скачування шлаку; 8 – сира сталь;  
 9 – сталерозливний ківш

Рисунок 5.1 – Схема ДСАБД конструкції ІРСІД

Агрегат складається з трьох основних вузлів: вузла дозування рідкого чавуну, рафінувального апарату, що складається з реактора і відстійника, індукційної каналної печі для доведення металу до заданої марки (нюансера).

Агрегат являє собою одностадійну установку.

Підтримка постійної витрати чавуну важливо для забезпечення нормального ходу рафінування і отримання заданого хімічного складу стали (відбувається за принципом сполучених посудин).

У реакторі – рафінувальні реакції (продування пилоподібним вапном в струмені кисню), в відстійнику – поділ фаз.

У нюансере метал розкислюється, легується, а також вирівнюється за складом і температурі.

Встановлено, що вихід придатного на 2 % вище в порівнянні з киснево-конверторним процесом (відсутність викидів, відсутність операцій зливу шлаку, при яких втрачається метал). Знижується витрата вогнетривів (постійний тепловий режим).

Знижені на 30 % капітальні витрати для сталеплавильного цеху 1,5 млн. тонн / рік у порівнянні з киснево-конверторним.

### **5.3 ДСАБД ВНІМЕТМАШ-ЦНІПЧМ**

Ці інститути протягом ряду років працювали над створенням конверторного ДСАБД, що використовує рідкий чавун з добавкою залізородного концентрату або окатишів і призначеного для отримання стали підвищеної якості. Прийнято чотиристадійне рафінування чавуну. Побудований дослідний агрегат (рис. 5.2) продуктивністю 10 т/рік (агрегат призначений для уточнення оптимальної технологічної схеми рафінування чавуну і вузлових конструктивних рішень, відпрацювання допоміжного обладнання, КВП і автоматики).

Основу агрегату становить блок з трьох рафінувальних апаратів (РА). Він дозволяє змінювати технологічну схему рафінування чавуну з використанням різного числа стадій (1-4 стадії).

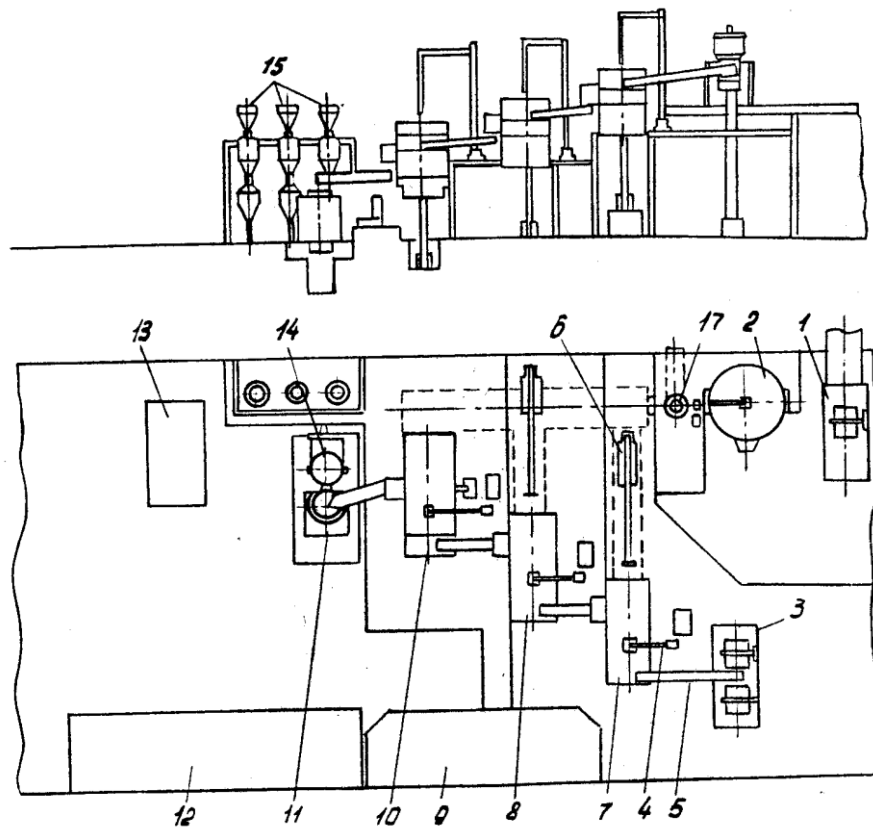
Розливний стенд забезпечує дозування рідкого чавуну.

Індукційний міксер-копильник дозволяє накопичувати необхідну порцію металу і поєднувати безперервний процес з періодичним розливанням.

Три установки пневмоподачі з фурмами для введення реагентів забезпечують дозування сипких та газоподібних реагентів і введення їх в рафінувальні апарати.

Рафінувальний апарат складається з реакційної і відстійної ванн, заливного та випускного каналу і газоходу.

Вельми відповідальною і складною є система пневмоподачі в РА пилоподібних реагентів. При постійній витраті заливається в агрегат рідкого чавуну кількість вводяться в апарати матеріалів є одним з основних факторів, що визначають кінцевий склад металу.



1 – ківш з рідким чавуном; 2 – міксер; 3 – розливний стенд (два ковша для забезпечення безперервності подачі металу); 4 – кисневі фурми; 5 – жолоб; 6 – машина для скачування шлаку; 7, 8, 10 – рафінувальні апарати; 9 – приміщення ЗВТ (контрольно-вимірювальних приладів); 11 – індукційний міксер-копильник; 12 – стенд розігріву ковшів; 13 – розливна канава; 14 – сталерозливних ківш; 15 – системи пневмоподачі сипучих матеріалів

Рисунок 5.2 – ДСАБД конструкції ВНІМЕТМАШ-ЦНІІЧМ

Агрегат забезпечений установками, що дозволяють вдувати в струмені кисню або повітря залізорудний концентрат, вапно або ферит кальцію.

Другий РА оснащений установкою для дозування подачі в реакційну ванну металізованих окатишів.

САБД працює наступним чином.

Чавун з ливарного цеху подається в САБД ковшами і зливається в міксер (обігривається). Після заповнення, взяття проби, виміру температури починається періодичний слив чавуну з міксера в дозуючі ковші. Ковші передаються на стенд дозування (2 ковша для безперервності). Розлив проводиться по черзі з двох ковшів за допомогою кантуючого пристрою. Від стенду метал по футерованому жолобу надходить в перший апарат. Пройшовши обробку в 3-х РА чавун перетворюється в нерозкислену сталь, яка надходить в індукційний копильник.

У копильниках крім накопичення і усереднення сталь розкисляють і леґують. Через кожні 12 хвилин сталь порціями зливають в ковші і направляють на розливання в виливниці.

Шлаки з апаратів видаляється або самопливом, або машиною в вертикальний шлаковик.

Газоподібні продукти реакцій (в основному CO) направляються в камери допалювання.

Дослідженнями було передбачено порівняння різних технологічних схем виробництва сталі.

Спочатку досліджувалася чотиристадійна схема. За цією схемою першою починалося видалення сірки шляхом продувки чавуну вапном в струмені природного газу. У другому ланці віддалялися Si і Mn в умовах кислого процесу шляхом продувки металу залізорудним концентратом в струмені кисню. У третьому ланці віддалявся фосфор шляхом продувки металу феритом кальцію в струмені кисню. Нарешті, в четвертому ланці здійснювалося обезвуглерожування чистим киснем. Ці роботи проводили з 1970 по 1971 рік.

Незважаючи на те, що 4-х стадійна схема створює найкращі умови служби футеровки, вона в той же час складна в експлуатації і громіздка.

Було визнано за доцільне перейти до двостадійної схеми, яка реалізує в умовах безперервності варіант з проміжним видаленням шлаку.

Випробувалися два варіанти: обидві стадії основні (O-O), перша стадія в кислому процесі, друга – в основному (K-O).

## 5.4 Стан і перспективи розвитку ДСАБД

Чітко визначені три напрямки:

1. Безперервний процес конверторного типу – призначений для великої металургії (3-10 млн. т/рік).

2. Процес відбувається в подовій печі – може бути використаний для збільшення продуктивності мартенівських печей.

3. Струменевий безперервний процес – визнаний доцільним для рафінування рідкого чавуну від шкідливих домішок перед наступним сталеплавильним переділом.

З огляду на переваги САБД конверторного типу (висока продуктивність і одинична потужність агрегатів, відсутність зовнішніх джерел енергії, простота обслуговування, можливість автоматизації) можна прогнозувати, що саме цей вид безперервного сталеплавильного процесу отримає подальший розвиток.

Недоліком цього процесу вважалось неможливість використання скрапу. Специфіка безперервних процесів висуває підвищені вимоги до стандартності хімічного складу, витрати і фізичних параметрів введених матеріалів, що ускладнює використання в агрегаті твердого скрапу без його попередньої підготовки (так РСІД переплавляв кусковий брухт – проблема не вирішується).

ся). Кардинальним вирішенням проблеми має бути застосування фрагментованого скрапу, який може дозовано і безперервно вводиться в реакційну ванну апарату. Великі можливості відкриває вакуумний спосіб фрагментації скрапу (охолодження скрапу в рідкому азоті до  $-120^{\circ}\text{C}$  і дроблення).

Поряд з розробкою і впровадженням САБД, що базуються на переробці доменного чавуну, слід враховувати і бурхливий розвиток безкоксової металургії.

Зниження запасів коксівного вугілля, збільшення забрудненості скрапу при його багаторазовому переплаві, прагнення до захисту навколишнього середовища – привели до будівництва в ряді країн міні-заводів (100...500 тис.т/рік).

Технологічна схема цих заводів включає: виробництво сирих окатишів і їх зміцнюючий випал, отримання металізованих окатишів в шахтних печах і їх переплав в електродугових сталеплавильних печах.

Можливий ДСАБД з прямим отриманням заліза, для чого в його склад повинна бути включена відновлювання ступінь.

## 6 ЛЕКЦІЯ 6 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

### 6.1 Загальні відомості

Безперервне розливання сталі завоювала повне визнання і передбачається найширше її використання в майбутньому. Спочатку процес безперервного лиття отримав застосування для алюмінію, потім міді і пізніше – для сталі. Зараз встановлено, що розливання металу у виливниці при масовому виробництві злитків одного розміру повинна замінюватися безперервним литтям.

Переваги безперервного лиття:

- скорочення циклу металургійного виробництва (рис. 6.1), виробничих площ, обладнання (капітальні витрати);
- підвищення якості виливків (висока ступінь однорідності);
- зменшення технологічних відходів при подальшій обробці тиском, зменшення розкиду технологічних параметрів (рис. 6.2);
- високий ступінь автоматизації та механізації.

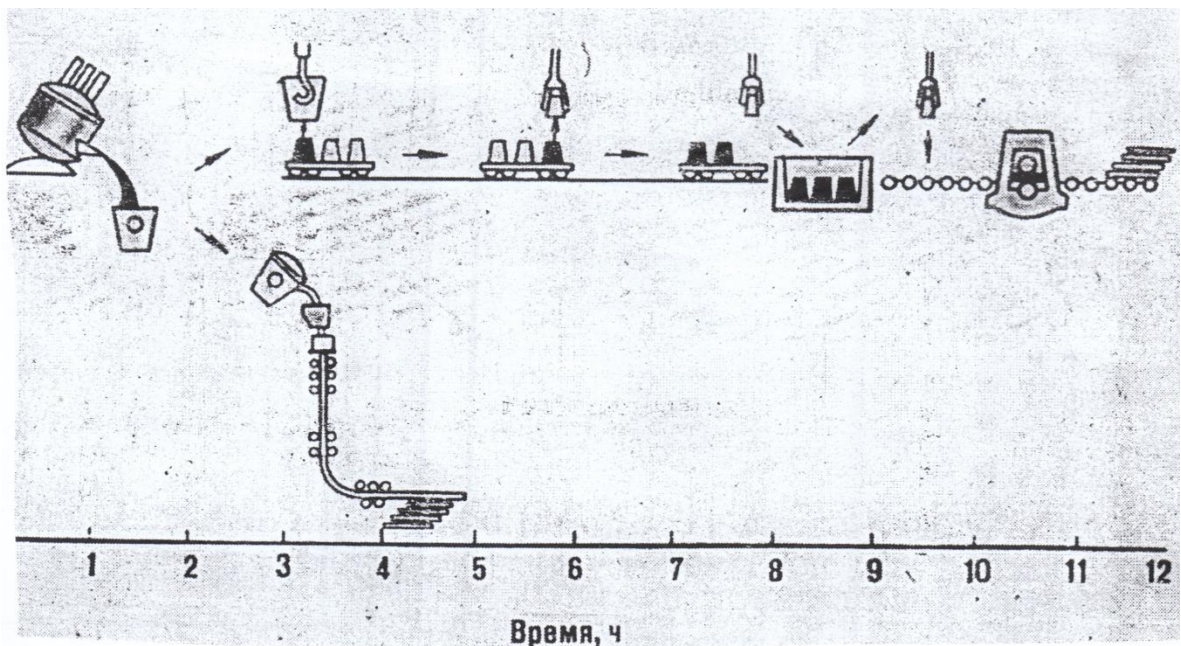
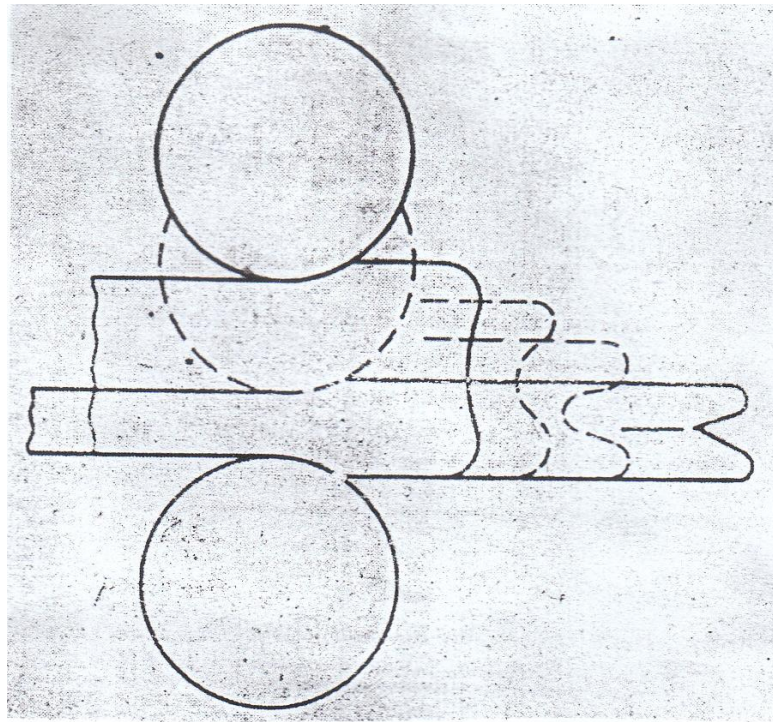


Рисунок 6.1 – Зіставлення способів виробництва заготовок шляхом безперервного розливання і традиційного





*Рисунок 6.2 – Схема утворення утягування при обтиснутими на блюмінгу злитків з плоским дном*

Ефективність безперервного лиття зростає, якщо його об'єднати в одному агрегаті з прокаткою. Отримання прокату з рідкого металу безперервним методом дозволяє:

- використовувати первинну теплоту злитка для його деформації;
- виключити проміжні склади металу;
- забезпечити безперервність процесів лиття і прокатки (продуктивність);
- забезпечити компактність машин агрегату, зменшити їх вагу і необхідні виробничі площі;
- знизити питомі капіталовкладення.

## **6.2 Варіанти МБЛЗ**

МБЛЗ відомі в декількох варіантах (рис. 6.3):

- вертикальні МБЛЗ;
- вертикальні МНЛЗ з вигином заготовки;
- криволінійні і радіальні МБЛЗ;
- горизонтальні МБЛЗ.

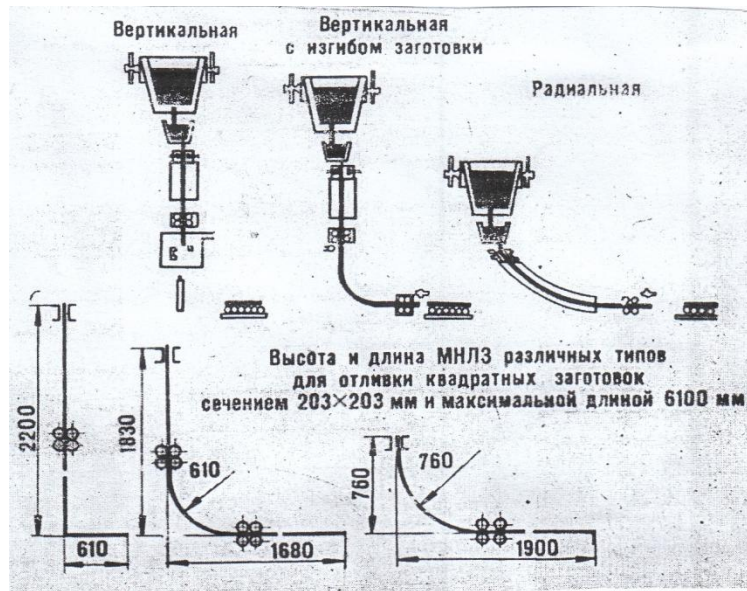


Рисунок 6.3 – Типы машин непрерывного литья заготовок

### 6.2.1 Вертикальні МБЛЗ

Спочатку отримали розробку і впровадження МБЛЗ вертикального типу, поглиблені нижче рівня підлоги на 20...30 м або баштового варіанту висотою до 40 м (рис. 6.4).

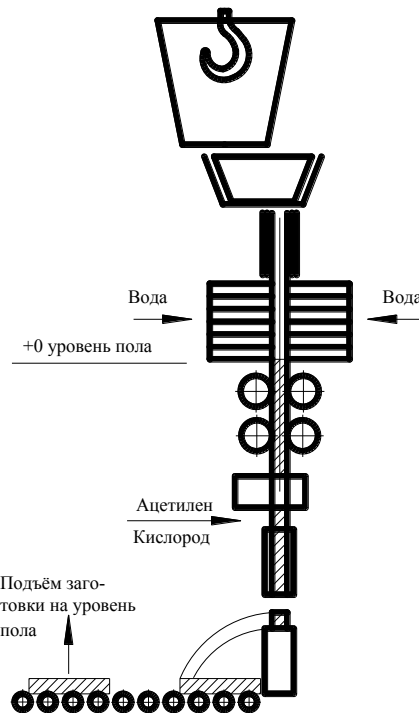


Рисунок 6.4 – Вертикальна МБЛЗ

Проміжний ківш має один стопор (однорівчакова машина) або кілька стопорів (багаторівчакова машина). Оснащений перегородкою для затримки шлаку.

У кристалізатор вводиться запал знизу має перетин кристалізатора). Верхній торець затравки утворює дно кристалізатора і виконаний у вигляді ластівчин хвіст для зчеплення зі злитком. При досягнення рівня 400 мм металу над запалом включають механізм витягування заготовки.

Мідний з порожніми стінками (покриття хромо-нікелевим сплавом) інтенсивно охолоджується водою кристалізатор формує корочку злитка-заготовки. Для запобігання надриву скоринки і догляду металу кристалізатору надають зворотно-поступальний рух (10...40 мм), Стінки кристалізатора змащують парафіном та іншими речовинами. Рівень металу в кристалізаторі контролюється автоматично. У кристалізаторі над поверхнею металу може бути створена відновна або нейтральна атмосфера (запобігає окисленню металу при розливанні). Зараз робиться наголос на розливання під вакуумом (вакуумування сталі). Кількість кристалізаторів визначають число струмків установки.

Кірка нижній частині злитка формується холодною затравкою.

Під тягнучим впливом затравки злиток з рідкою сталлю в середині виходить з кристалізатора і потрапляє в зону вторинного охолодження злитка. Товщина кірки при цьому не менше 25 мм. Це досягається вибором швидкості руху заготовки (близько 0,01...0,015 м/с для заготовок перетином 160×800 мм). На стабільність процесу безперервного розливання і якість металу впливає і температура металу. Оптимальна – 1540...1560°C. Вище – заготівля уражається зовнішніми тріщинами. Нижче – відбувається затягування стакану.

У зоні вторинного охолодження відбувається інтенсивне безпосереднє охолодження злитка водою (бризками). Система холостих роликів оберігає поверхню злитка від викривлення, а злиток від вигину. Кірка злитка швидко потовщується, кристалізація поширюється вглиб. Ступінь охолодження і швидкість витягування вибираються так, щоб злиток повністю затвердів, до попадання в тягнучі ролики.

Установки такого типу характеризуються рядом труднощів при будівництві та експлуатації. Такий тип установок отримав менше визнання і поширення.

### **6.2.2 Вертикальні МБЛЗ з вигином заготовки**

Трохи пізніше був розроблений варіант вертикальної установки з вигином злитка на 90° після виходу з тягнучих роликів (рис. 6.5). Після вигину злиток правиться і ріжеться на заготовки. Установка з вигином менше по висоті, ніж вертикальна. Однак, це спостерігається тільки при отриманні злитків малого перетину. Зі збільшення перетину збільшується мінімальний радіус вигину, крім того, такі установки важче розмістити в сталеплавильних цехах.

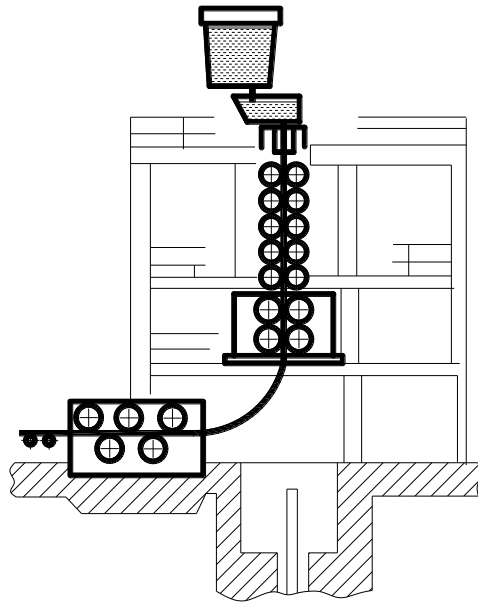


Рисунок 6.5 – Схема вертикальної МБЛЗ з вигином заготовки

### 6.2.3 Криволінійні і радіальні МБЛЗ

В даний час широке поширення знайшли установки безперервного розливання радіального типу. Радіальними називаються всі МБЛЗ, на яких відливається заготовка протягом всього періоду затвердіння (або частини його) знаходиться в криволінійному положенні. МБЛЗ, на яких заготовці надається криволінійність після її повного затвердіння не належать до типу радіальних. Переваги радіальних МБЛЗ:

- зниження приблизно на 40 % капітальних витрат;
- можливість отримання заготовок будь-якої довжини (горизонтальна видача);
- можливість суміщення лиття з прокаткою.

недоліки:

- труднощі лиття сталей, схильних до красноломкості (автоматних, легированих);
- великі виробничі площі (чим вертикальних);
- складність виготовлення і ремонту криволінійних кристалів-затворів і криволінійної зони вторинного охолодження;
- розмивають дію струменя в криволінійному кристалізаторі.

Найбільш поширені МБЛЗ, на яких заготовка твердіє від початку і до кінця в криволінійному положенні з постійним радіусом кривизни і випрямляється одностадійно після повного затвердіння. Тут не відбувається деформації заготовки до повного її затвердіння, так як заготівля рухається по дузі кола. Деформація (розпрямління) відбувається після повного затвердіння заготовки (рис. 6.6).

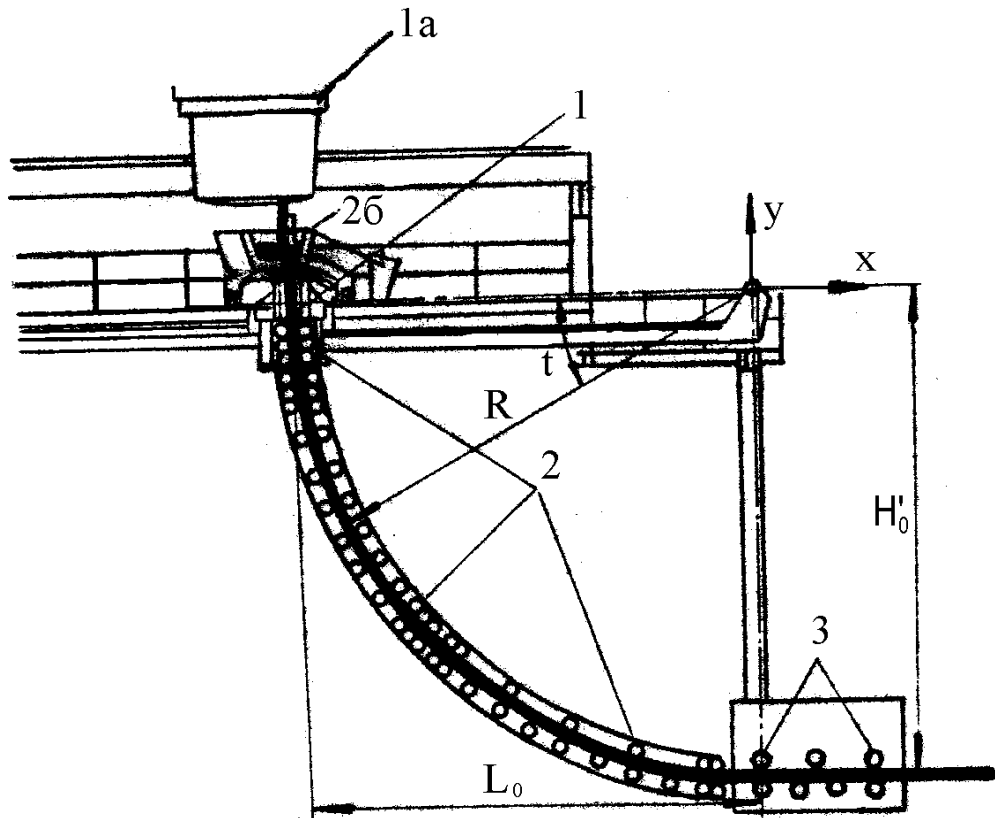


Рисунок 6.6 – Схема МБЛЗ радіального типу

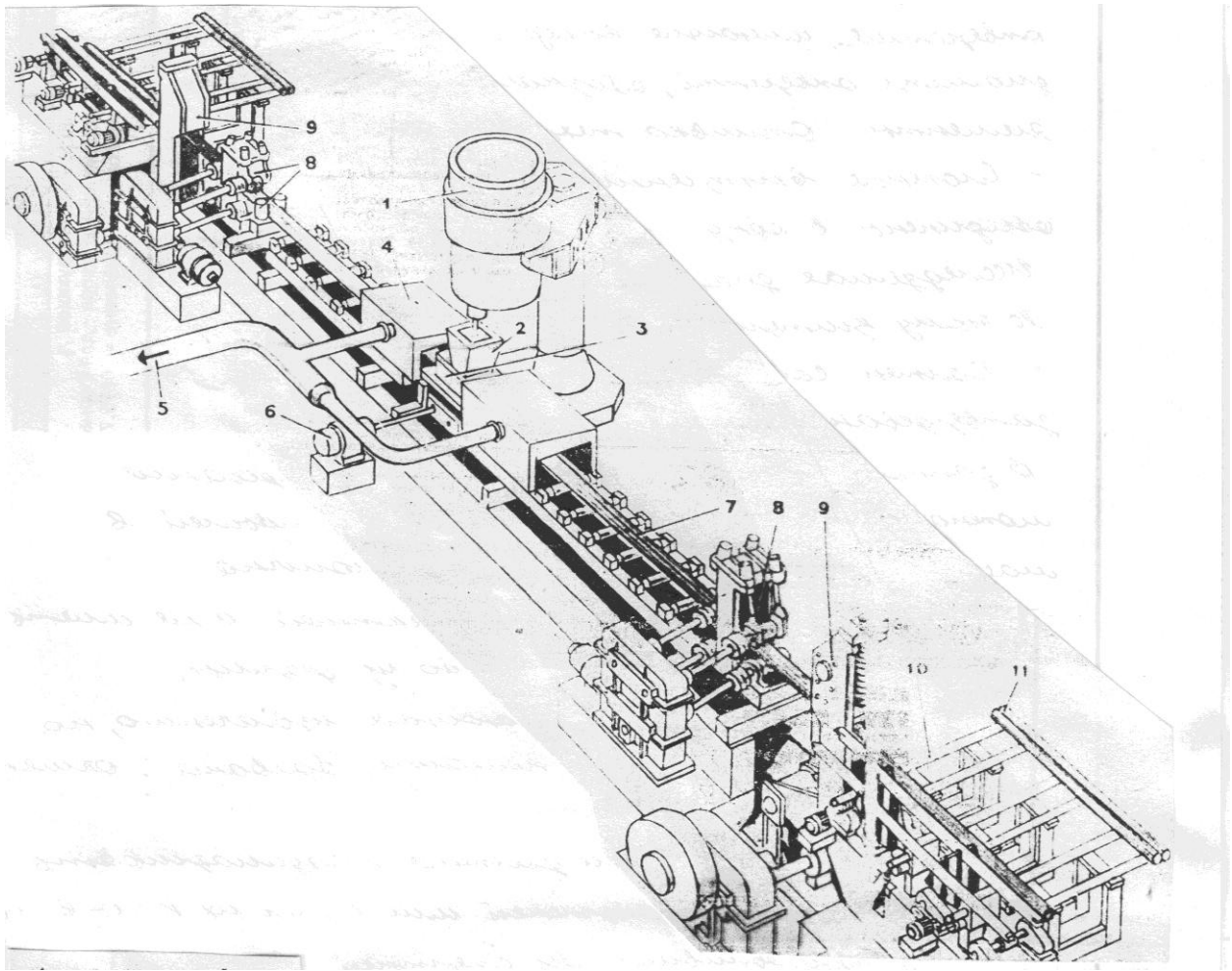
Інший різновид МБЛЗ радіального типу відрізняється тим, що крива осі заготовки має змінний радіус. Спостерігається багатостадійна деформація в повному обсязі затверділої оболонки. За межами радіального кристалізатора заготівлі з віссю кола надається профіль параболи або гіперболи, після чого здійснюється випрямлення заготовки.

Деяке поширення отримали МБЛЗ радіального типу, на яких первісна оболонка злитка формується в вертикальному кристалізаторі, потім заготовці, яка відливається, надається профіль кривої, що має радіус змінної кривизни.

При виборі варіанту радіальної МБЛЗ враховують сортамент заготовок і марки сталей. Деякі сталі при температурі кристалізації характеризуються дуже низькою пластичністю, так що при наявності рідкої фази можна деформувати заготовки обмеженого сортаменту марок сталей.

#### 6.2.4 Горизонтальні МБЛЗ

Загальні недоліки установок вертикального і радіального типу (значні капіталовкладення, велика висота, звідси утруднені умови установки їх в діючому цеху, утруднене обслуговування) викликали необхідність по створенню установок безперервного розливання горизонтального типу (установка в діючому цеху, полегшується обслуговування (рис. 6.7).



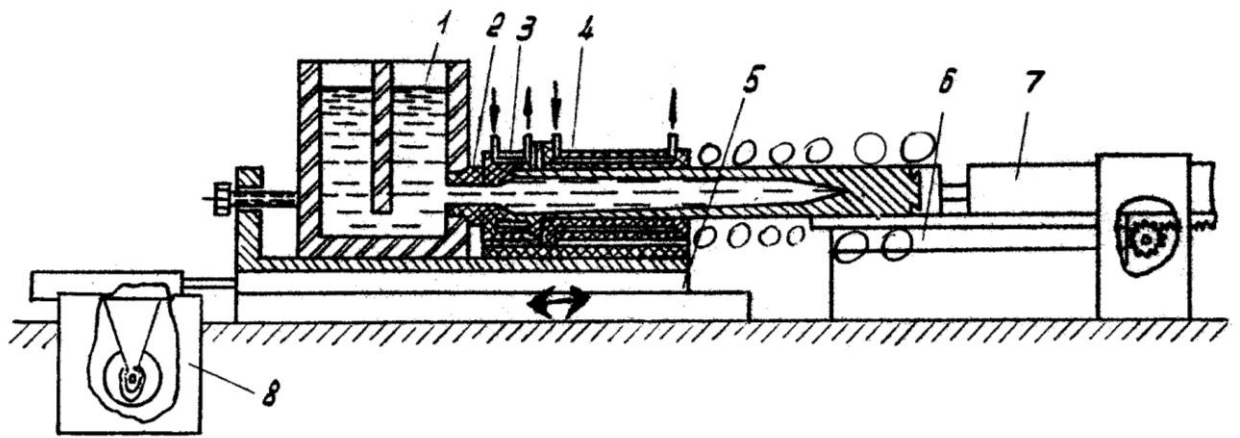
1 – сталерозливних ківш; 2 –металоприймач; 3 – кристалізатор;  
 4 – короб для уловлювання пари; 5 – відвід пари; 6 – привід механізму  
 хитання кристалізатора; 7 – метал, який кристалізується; 8 – тягучі  
 валки; 9 – ножиці; 10 – стелаж; 11 – заготовки  
 Рисунок 6.7 – Горизонтальні МБЛЗ з двостороннім витягуванням заготовок

Технологічні переваги:

- наявність металоприймача, з'єднаного з кристалізатором, дозволяє вивести меніск металу з кристалізатора, що сприяє видаленню газів, неметалевих шлакових включень, запобігає вторинне окислювання металу (рис. 6.8);
- ліквідовані дефекти злитка від впливу струменя, що падає в кристалізатор;
- відсутні вигини металевої заготовки.

Можливо витягування заготовки за принципом «пауза-ривок», в т.ч. і з віддачею назад під час паузи.

Вогнетривкі стакани і кільце виконують з кремнію, циркону, нітриду бору.



1 – металопріймач (проміжний ківш); 2, 3 – вогнетривкі стани і кільце; 4 – кристалізатор; 5 – рухомий стіл; 6,7 – механізм витягування злитка із кристалізатора; 8 – механізм гойдання кристалізатора

Рисунок 6.8 – Схема дослідної МБЛЗ горизонтального типу

## 7 ЛЕКЦІЯ 7

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПОЄДНАНИХ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ І ПРОКАТКИ. ЛИВАРНО-ПРОКАТНІ АГРЕГАТИ (ЛПА)

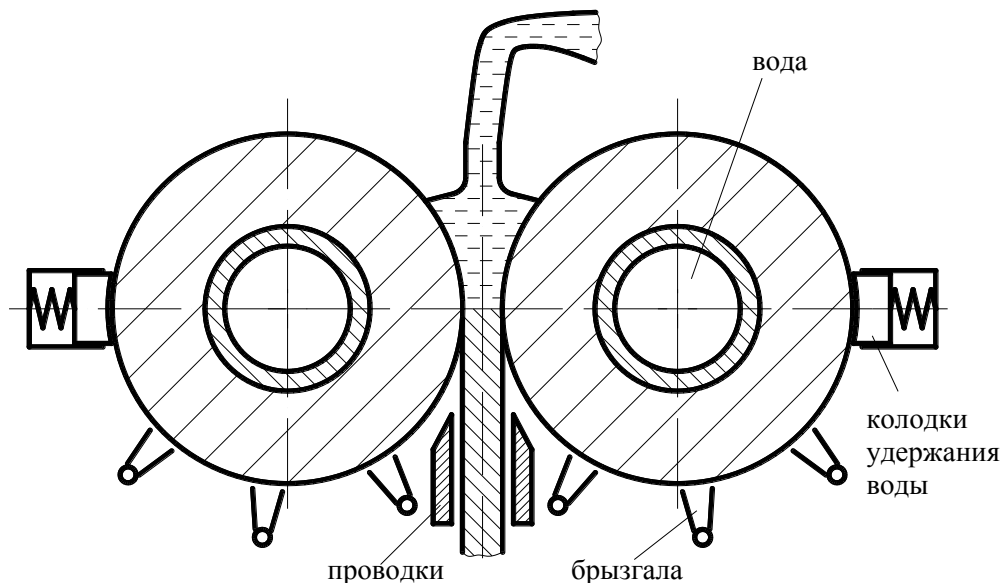
#### 7.1 Способи поєднання прокатки з безперервним литтям

З відомих способів поєднання прокатки з безперервним литтям слід зазначити три:

- 1 Рідкий метал безпосередньо надходить в міжвалковий простір (беззлиткова прокатка).
- 2 Початок процесу кристалізації відокремлено від деформації, але деформація (прокатка) починається коли серцевина злитка ще має рідку фазу («м'яке» обтиснення).
- 2 Прокатка безупинно утворюється після повного закінчення кристалізації злитка.

#### 7.2 Спосіб беззлиткової прокатки

Було запропоновано Бессемером і названий беззлитковою прокаткою. Тоді здійснення цього способу не вдалося (1890 г.). У 30-ті роки ХХ століття в США і СРСР зроблені спроби (рис. 7.1), але невдало. Основна причина – розриви (по мірі обертання валків) скоринки (викликало неоднорідність структури металу і ін. дефекти).



*Рисунок 7.1 – Схема беззлиткової прокатки*



Надалі процес вдосконалили – метал стали подавати не безпосередньо на валки, а через проводки. Таким чином було стабілізовано кут захоплення, який повинен бути відносно невеликим і постійним. У цьому виді процес беззлиткової прокатки для кольорових металів відпрацьований в двох варіантах (рис. 7.2).

Перший варіант (див. рис. 7.2, а) знайшов застосування на ряді заводів. Наприклад, при виробництві алюмінієвих смуг  $8...12 \times 1030$  мм в рулонах до 2 т на Ленінградському «ЦВЕТМЕТ» (С.-Петербург).

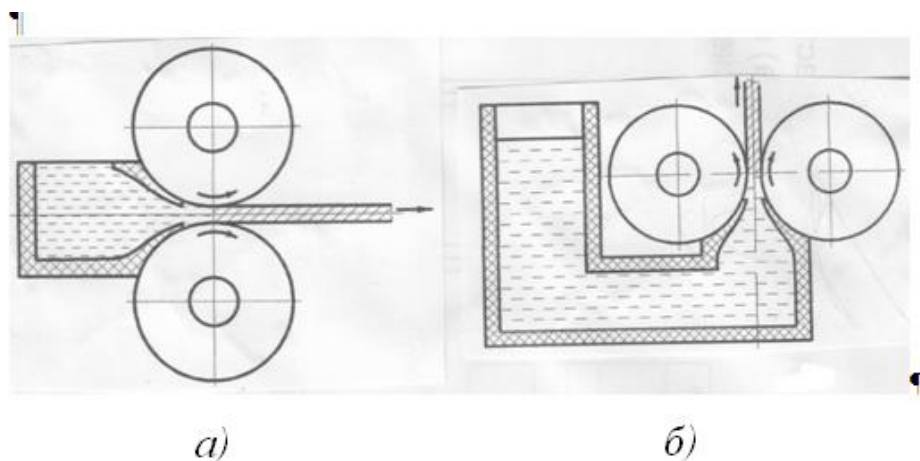


Рисунок 7.2 – ЛПА для виробництва смуг з алюмінію з горизонтальним (а) і вертикальним (б) виходом металу з валків

Другий варіант знайшов застосування на декількох агрегатах ВНІМЕ-ТАМАШ для виробництва алюмінієвих смуг  $3...8 \times 1000...1600$  мм (Канакерський алюмінієвий завод, заводи Нехтерштеде – Німеччина).

Недолік цих агрегатів з кристалізаторами валкового типу - мала протяжність контакту (обмежена кутом захоплення) і, отже, низька швидкість смуги ( $0,017...0,035$  м / с). Однак спосіб особливо ефективний, якщо агрегати встановлювати безпосередньо у електролізерів.

### 7.3 Спосіб суміщення лиття і прокатки з «м'яким» обтисканням заготовки

Цей спосіб почав застосовуватися в Австрії на початку 70-х років ХХ століття (рис. 7.3).

В агрегаті використовували кристалізатор звичайного типу (мідний). При цьому способі не утворюється усадочна раковина в центральній частині зливки, але можлива поява тріщин в металі, так як він деформується при температурі переходу металу з рідкої фази в тверду, коли пластичні властивості дуже низькі. Ці тріщини будуть заповнюватися маточним розчином більш високим вмістом інгредієнтів сплаву, що призведе до неоднорідності зливки,

крім того маточний розчин буде витіснитися в задню частину зливка – неоднорідність хімічного складу по довжині. Незважаючи на такі недоліки спосіб застосовується (Німеччина – відливається заготовка перетином  $160 \times 160$  і прокочується до перетину  $90 \times 90$  мм).

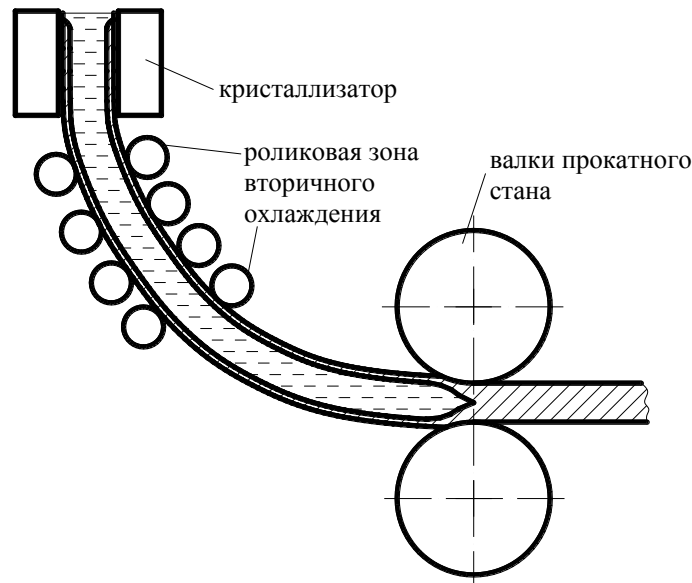


Рисунок 7.3 – Схема ЛПА з «м'яким» обтисканням заготовки

#### 7.4 Спосіб суміщення лиття і прокатки повністю кристалізованої заготовки

З точки зору якості металу цей спосіб поєднання лиття з прокаткою найбільш прийнятний. Прокатка не знижує якостей безперервно відлитого металу щодо його однорідності, а доповнює поліпшенням механічних властивостей і розширенням можливого сортаменту.

У багатьох країнах для спільної прокатки з литтям алюмінію, міді, сталі, цинку цей спосіб був прийнятий як основний.

Головна проблема, яка тут виникла – пошук такої системи кристалізатора, яка забезпечила б вихід зливка зі швидкістю, достатньою для нормального завантаження безперервного прокатного стану. Кристалізатори класичного типу (з мідними стінками) забезпечують лише  $0,003 \dots 0,07$  м/с. Крім того має місце надмірний розігрів валків. Падає температура металу.

У зв'язку з цим велися пошуки інших кристалізаторів, у яких стінки рухаються одночасно з металом досить довго.

ЦНІЧМ була запропонована і випробувана машина конвеєрного типу. Випробування ВНІМЕТМАШ показали, що для зливка великого перерізу, який не в змозі утворити петлю ця система прийнятна. Однак наявність траків (окремих ланок кристалізатора) в конвеєрах викликало в місцях їх стиків

підвищений «розпал» і отже затікання металу між ними. Поверхня зливка ставала неякісною, з'являлися тріщини.

З інших систем кристалізаторів з тривалим контактом металу довго відчували кристалізатор у вигляді обода колеса зовні обтягнутий сталеву стрічкою. Ця система була названа роторною (рис. 7.4).

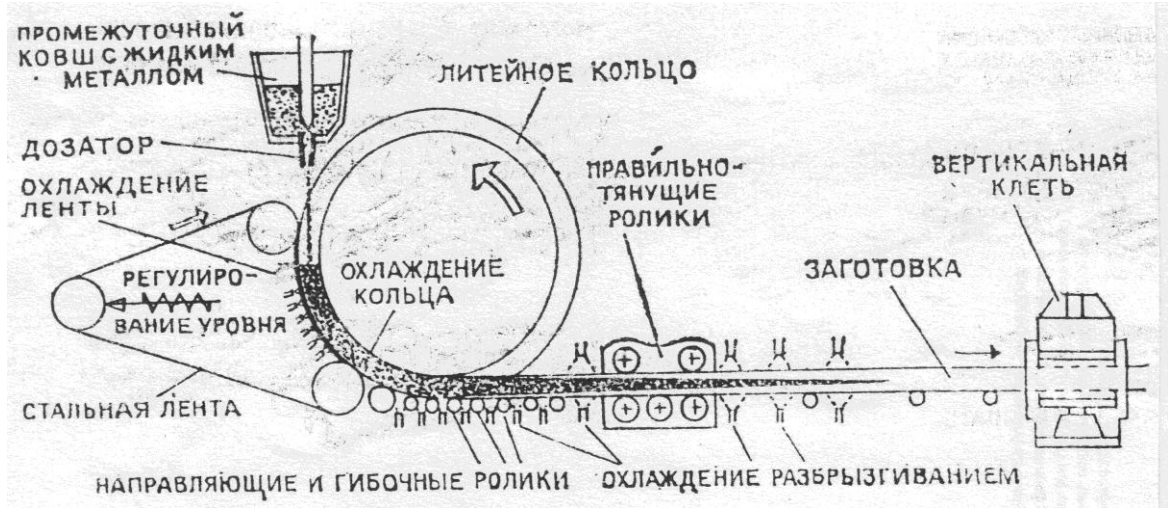


Рисунок 7.4 – Схема ЛПА з роторним кристалізатором

В Україні в 1961 був побудований агрегат на Запорізькому алюмінієвому заводі (рис. 7.5) для виробництва алюмінієвого дроту. При цьому були забезпечені висока ефективність і рівень автоматизації. Тоді ж подібні ЛПА були виготовлені для Кандалакського, Канакерського і Сумгайтського алюмінієвих заводів. Було прийнято рішення про застосування методу на Іркутському і Братському заводах кольорових металів.

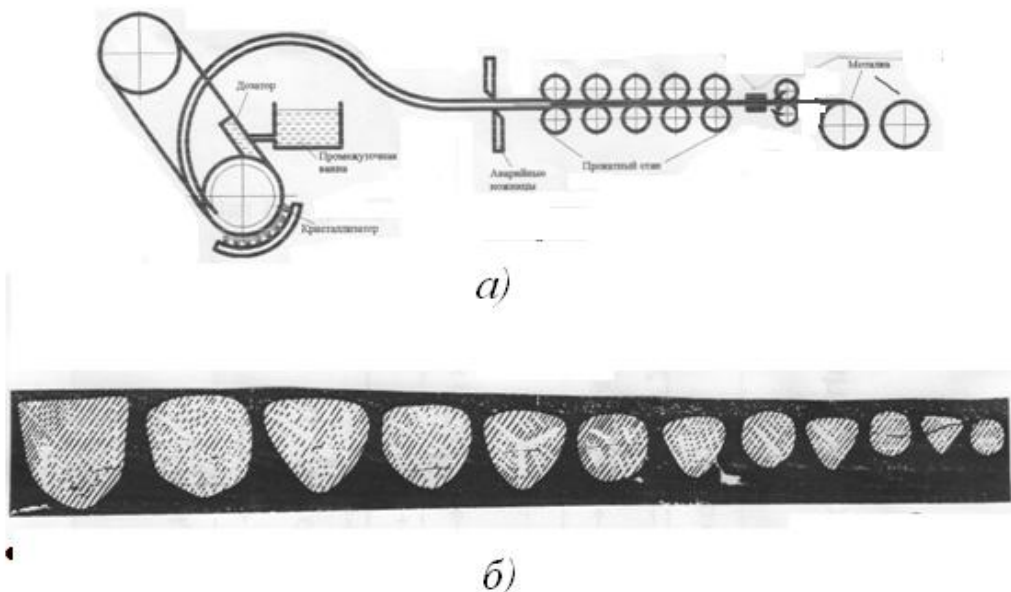


Рисунок 7.5 – Схема ЛПА з кристалізатором роторного типу (а) і перетину металу (б) в процесі обробки

Застосовують такий агрегат і для безперервного лиття міді з подальшим плющенням в дріт.

Швидкість на агрегаті становить 7 м/с, продуктивність 4,5...5 т/рік (Іркутський алюмінієвий завод), маса бунту до 2 т.

До числа багатьох переваг тут слід віднести і практично необмежену вагу бунта. Це значною мірою знижує подальшу обробку дроту особливо під час волочіння. З міді отримують бунт в 3...5 т, що в 10...20 разів більше, ніж на звичайних станах.

Відома система Хазалетта (США). Рідкий метал (рис. 7.6) надходить в простір між двома сталевими стрічками, які безперервно рухаються. Бічні стінки утворюють металеві башмаки. ВНІМЕТМАШ випробував систему і отримав позитивні результати. Швидкість виходу алюмінієвої смуги товщиною 10...15 мм (шириною 1000 мм) була доведена до 0,17 м/с. При такій швидкості вже рентабельна установка за цією машиною прокатного стану.

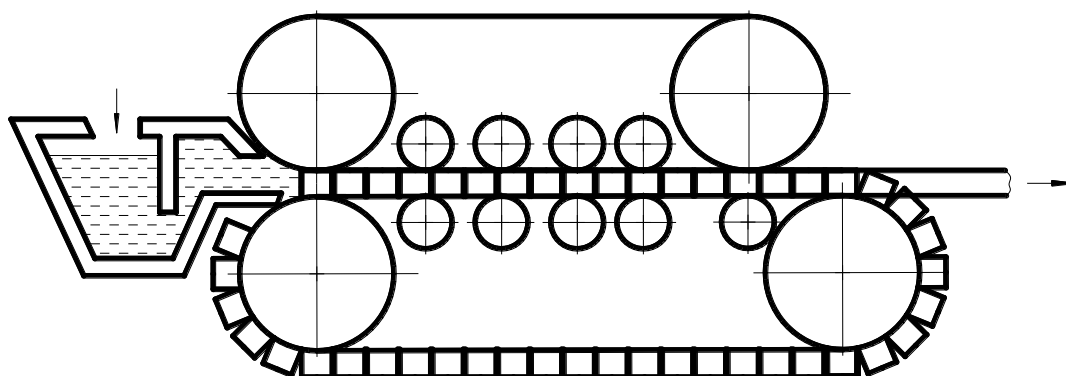


Рисунок 7.6 – Кристалізатор системи Хазалетта

Результати робіт з освоєння суміщених процесів безперервного лиття і прокатки кольорових металів показують, що майбутнє виробництво листового прокату і катанки з цих металів належить безперервному литтю, який об'єднаний з прокаткою.

Створити агрегати для об'єднання процесів лиття і прокатки стали важче, хоча рішення цієї проблеми обіцяє значні вигоди.

Перша перешкода – низька швидкість виходу злитків з кристалізаторів (0,003...0,07 м/с), що призводить до недовикористання прокатного стану, якщо він розташований в потоці за кристалізатором.

Тут можливі два шляхи:

– в першому випадку, застосування декількох кристалізаторів в потоці з одним прокатним станом; тут слід передбачити відрізок злитків які виходять з кристалізатора, можливо більш довгих шматків, які повинні по черзі надходити в прокатний стан; для вирівнювання температури злитків перед входом в валки стану їх необхідно підігрівати в печах;

– у другому випадку, більш повне з'єднання машини безперервного лиття з прокатним станом (злиток надходить в валки безперервно без розрі-

зання). Ця схема найбільш досконала. Утруднення – низька швидкість. Усунути різницю в швидкостях можна:

- створивши більш досконалі системи машин безперервного лиття, які б забезпечували швидкість, достатню для завантаження прокатного стану (не менше 0,15...0,17 м/с);

- наблизити стани спеціальної конструкції, які б було вигідно експлуатувати при низьких швидкостях, зокрема стани періодичної дії в тому числі, планетарні.

ВНІМЕТМАШ розробив планетарний стан, який обжимає метал з чотирьох сторін. Це дозволяє рентабельно поєднувати процеси лиття і прокатки (рис. 7.7).

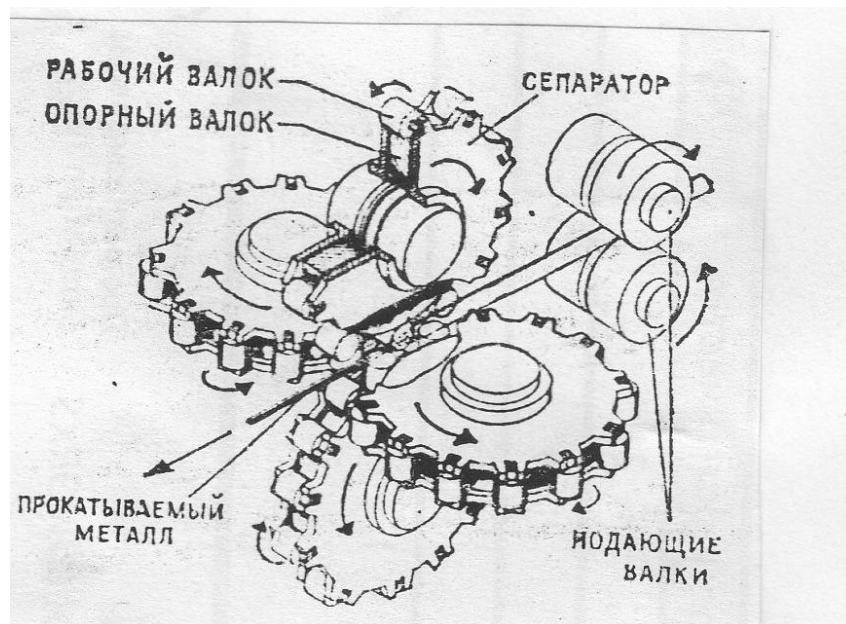


Рисунок 7.7 – Схема універсальної планетарної кліти

ВНІМЕТМАШ розробив агрегат для безперервного лиття і прокатки сталевих дротів (рис. 7.8).

Застосування планетарної кліти дозволяє скоротити необхідну кількість клітей (на 20 клітей). У процесі інтенсивної деформації метал в осередку деформації підвищує свою температуру на 100...200° С, що на звичайних станах з такою кліттю призводить до значного скорочення витрати палива на нагрів металу перед прокаткою.

Це призводить до необхідності поєднати прокатку з неперервним литтям сталі, встановивши у машин радіального типу замість тягнучих і правильних роликів кілька малогабаритних клітей. Такий агрегат вигідний при виробництві квадратних і круглих заготовок перетином 120×120...150×150, діаметром до 200 мм.

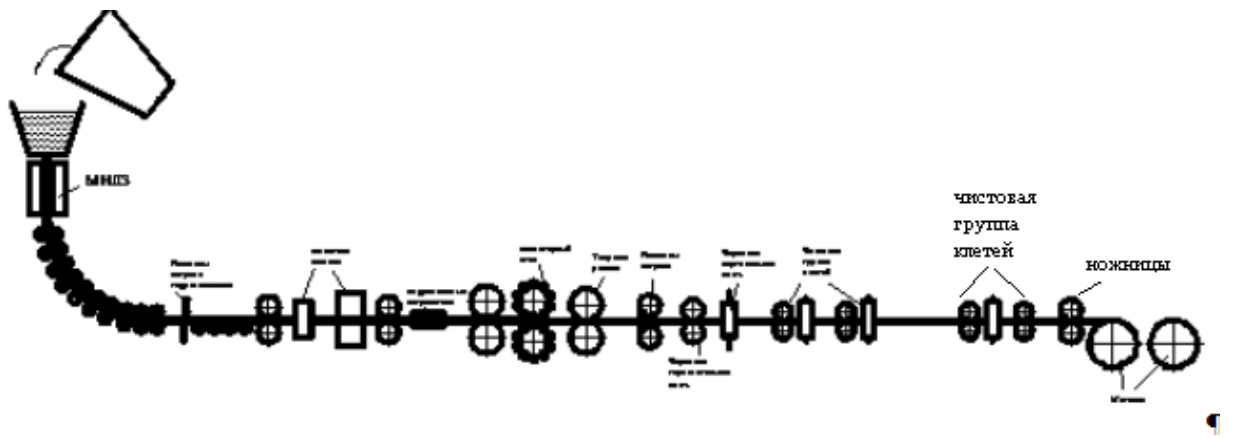


Рисунок 7.8 – ЛПА з планетарної кліткою для виробництва сталевого дроту

## 8 ЛЕКЦІЯ 8 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

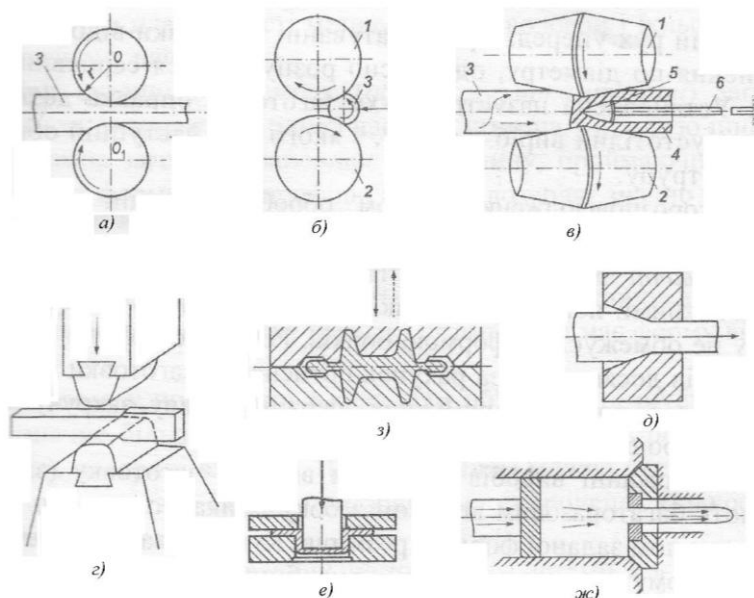
### 8.1 Процеси ОМТ і завдання, які вирішуються в теорії ОМТ

Обробка металів тиском є основною ланкою в ланцюзі технологічних процесів виробництва виробів з металів і сплавів. Призначення цього методу полягає в тому, щоб змінити геометричну форму і розміри тіла, а також надати йому певні механічні і фізичні властивості (при отриманні поковки із злитків, злитки піддають осадці, навіть якщо цього не вимагають розміри виробів). Ця мета в тій чи іншій мірі може бути досягнута і іншими шляхами, головними з яких є лиття та обробка різанням.

Для отримання виробів складної форми і конструкцій застосовують зварювання, клепання, паяння окремих деталей, отриманих цими методами.

Обробка металів тиском заснована на пластичності металів і сплавів. (пластичністю називають здатність металів остаточно змінювати свою форму, деформуватися без руйнування під впливом зовнішніх зусиль).

Залежно від форми і розмірів виробу, а також властивостей металу, який деформується, або сплаву застосовують різні процеси обробки тиском (рис. 8.1).



*а – поздовжня прокатка; б – поперечна прокатка; в – поперечно-гвинтова прокатка (1,2 – валки; 3 – заготовка; 4 – гільза; 5 – оправлення); г – кування; з – штампування; д – волочіння; е – листове штампування; ж – пресування*

*Рисунок 8.1 – Схеми процесів обробки металів тиском*

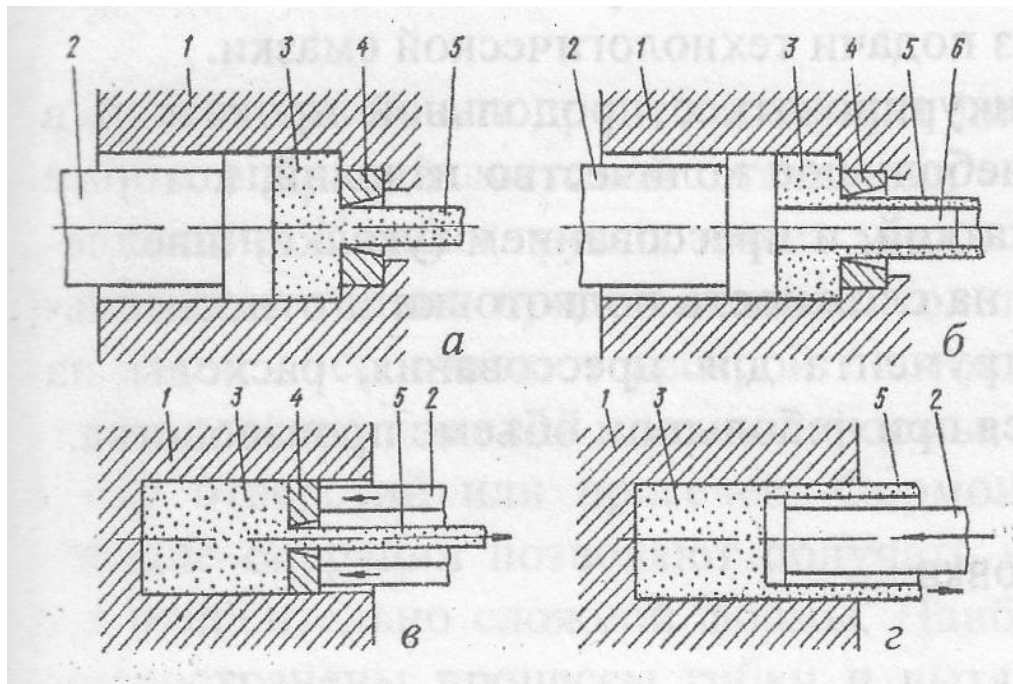
Кування. При вільному куванні (див. рис. 8.1, г) всю заготовку або її ділянки піддають дії бойка, молота або преса (при цьому вплив інструменту на бічні поверхні заготовки відсутнє або невелике).

Застосовують для одержання великих поковок із злитків і для виготовлення середніх і дрібних поковок з прокату.

При серійному і масовому виробництві дрібних і середніх поковок застосовують об'ємне штампування на пресах і молотах (див. рис. 8.1, з). Складні поковки отримують послідовним штампуванням заготовки в ряді штампів.

Для виготовлення виробів з листів, які використовуються при виробництві автомобілів, літаків і ін. Широко застосовують листове штампування (див. рис. 8.1, е).

Для виробництва прутків з різною формою поперечного перерізу і труб застосовують пресування (видавлювання). При пресуванні заготовку поміщають в контейнер і під впливом пуансона метал видавлюють через отвори філь'єри (матриці) (рис. 8.2).



1 – контейнер; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – матриця; 5 – готовий виріб; 6 – дорн

Рисунок 8.2 – Пресування пряме прутків (а) і труб (б), зворотнє пресування прутків (в) і труб (г)

Пресуванню піддаються метали (сплави) зі зниженою пластичністю завдяки схемі всебічного стиснення, але при цьому підвищується витрата енергії на деформацію в порівнянні з волочінням аналогічного профілю. Сортамент пресованих виробів дуже широкий, можна отримувати вироби від найпростіших до надзвичайно складних за формою поперечного перерізу, з великим ступенем асиметрії, з несиметрично розташованими отворами (рис.



8.3). Процес легко перебудовується з одного профілю на інший шляхом заміни філь'єри.

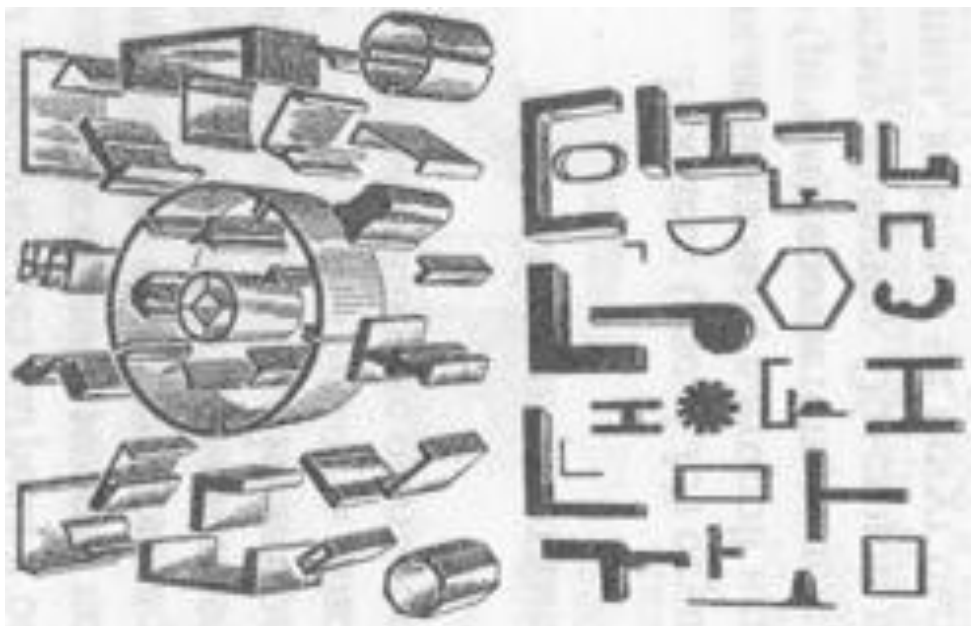


Рисунок 8.3 – Поперечні перерізи профілів отриманих пресуванням

Волочіння застосовують при виробництві дроту, прутків і труб. Сутність процесу полягає в тому, що цей продукт простягається через отвір в матриці (волоку), що має менший перетин, а іноді і іншу форму (рис. 8.4).

Волочіння застосовують іноді для отримання точних розмірів і чистої поверхні гарячекатаних профілів, а також з метою зміцнення виробів.

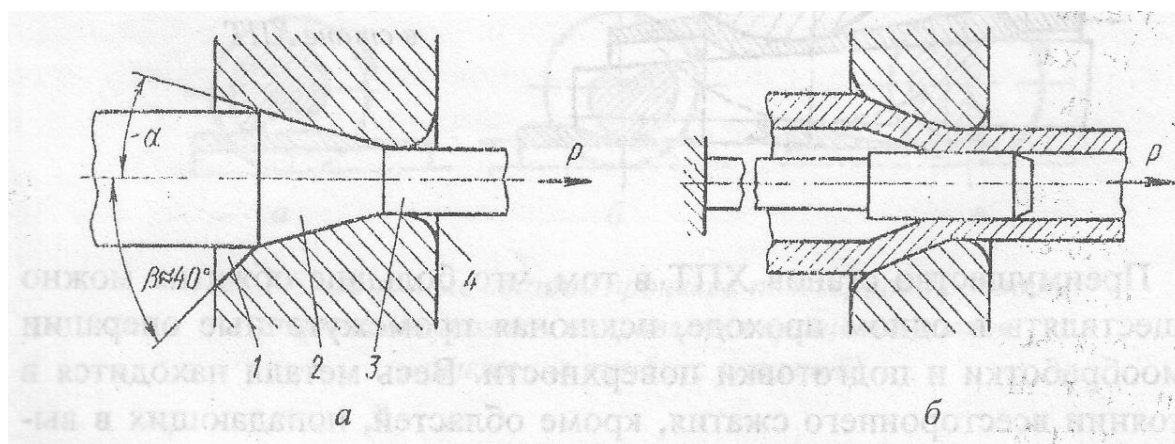


Рисунок 8.4 – Волочіння прутків (а) і труб (б)

Найбільш поширене волочіння через отвір в монолітній волоку з отриманням виробу, що має форму вихідного отвору волоки. Для того, щоб почати процес, передній кінець заготовки повинен мати перетин, вільно проходить через волоку (головку). Ця головка захоплюється тягнучим пристроєм, яке і простягає метал через інструмент. Форма волоки характеризується напі-

вкучом  $\alpha$ . У волоку розрізняють вхідну зону 1, зону деформації 2, калібруючий поясок 3 і вихідну зону 4 (див. рис. 8.4, а).

Оскільки сила волочіння  $P$  передається через сам метал, нагрівати його для підвищення обтиснень недоцільно через зниження міцності виходить кінця і можливості обривів.

Виключно велике значення в народному господарстві має прокатка (див. рис. 8.1, а, б, в). Сутність процесу поздовжньої прокатки (див. рис. 8.1, а) полягає в деформації металу між двома валками, що обертаються в різні боки. При цьому заготовка приймає форму зазору між валками (калібру). При виробництві деяких видів прокату, зокрема безшовних труб, застосовують поперечно-гвинтову (косу) прокатку (див. рис. 8.1, в). Поздовжня, поперечна (див. рис. 8.1, б) і поперечно-гвинтова прокатки дозволяють на спеціальних станах отримувати різного роду вироби (рис. 8.5).

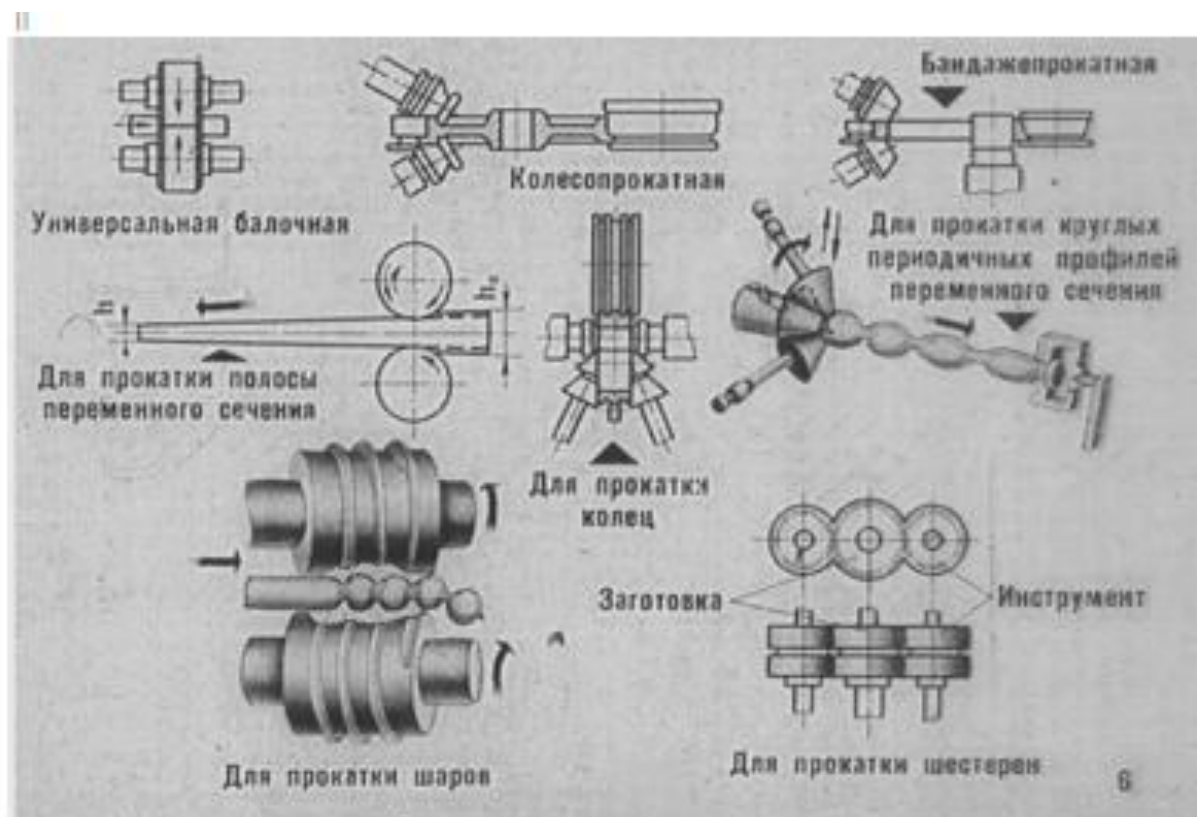


Рисунок 8.5 – Схеми прокатки на спеціальних станах

Такі процеси ОМТ як прокатка, волочіння і частково пресування характеризуються послідовністю, безперервністю дії інструменту на оброблюваний метал і є більш досконалим, ніж періодичні (кування, штампування).

Понад 80 % металу, що виплавляється в країні, піддається прокатці. В якості вихідних заготовок для інших видів ОМТ також служить прокат.

Теорія обробки металів тиском – прикладна інженерна дисципліна, що розробляє загальні основи раціональної побудови і аналізу технології всіх процесів ОМТ.

Завдання, які вирішуються в теорії ОМТ:

а) визначення зусиль деформування в різних технологічних процесах, забезпечення зниження зусиль і витрат енергії;

б) отримання заготовок і виробів з оптимальним поєднанням фізико-механічних властивостей;

в) забезпечення найвищої пластичності металу і тим самим можності максимальної деформації в кожній стадії обробки металу;

г) вивчення закономірності перебігу металу в осередку деформації і фізичних основ деформації.

Теорія обробки металів тиском розвивається в трьох напрямках: механіко-математичному, фізичному і фізико-хімічному та тісно пов'язана з теорією пружності, теорією пластичності, фізикою металів і металознавства.

Механіко-математичний напрямок вивчає напруги і деформації в тілі, яке пластично деформується, і умови переходу пружної деформації в пластичну. Вітчизняні вчені домоглися великих успіхів в розвитку математичної теорії пластичності. Широко відомі праці С. А. Христіановича, Л. С. Лейбензона, А. А. Ільюшина, В. В. Соколовського.

Потрібно відзначити іноземних вчених, які заклали основи теорії пластичності (Сен-Венан, Генки, Мізес) і сприяли подальшому її розвитку (Карман, Надаї, Хілл).

Математична теорія пластичності тісно пов'язана з теорією пружності, використовує основні поняття і математичний апарат останньої. Однак при математичній розробці питань пластичної деформації є великі труднощі в порівнянні з теорією пружності. Якщо при пружною деформацією основним законом є пропорційність напруг і деформацій  $\sigma = E\varepsilon$ , то в умовах пластичної деформації при безперервній зміні фізичних і фізико-хімічних властивостей тіла цей закон непридатний.

Фізичне напрямок теорії пластичності теоретично і експериментально вивчає механізм пластичної деформації з урахуванням анізотропності металів. При цьому досліджують вплив на процес пластичної деформації, швидкості і ступеня деформації, температури і зовнішнього тертя.

Фізико-хімічний напрямок вивчає зв'язок хімічного складу і фазового стану металу з процесом пластичної деформації.

Основи фізичного та фізико-хімічного напрямку розвитку теорії ОМТ закладені М. В. Ломоносовим, Д. Л. Черновим, Н. С. Курчатовим і були розвинені в працях В. Д. Кузнецова, А. А. Бочвара, Н. Н. Давіденкова, Я. Б. Фрідмана та ін.

Теорія обробки металів тиском як прикладна наука почала створюватися з 20-х років XIX століття. В останні роки досягнуто великих успіхів у цьому напрямку і можна стверджувати, що створені основи теорії ОМТ.

Великий внесок у теорію ОМТ внесений С. І. Губкіним, Г. А. Смирновим-Аляєвим, І. М. Павловим, А. І. Целіковим, А. Д. Томленовим, А. П. Чекмарьовим, І. А. Перлиним і ін.

Сучасний стан теорії ОМТ дозволяє виробляти інженерні розрахунки з метою визначення силових параметрів, оптимізацію умов здійснення процесу.

## 8.2 Фізичні основи пластичної деформації

Тверді металеві тіла при впливі на нього зовнішніх сил змінюють свої розміри і форму – деформуються. Деформація являє собою сукупність трьох процесів, які взаємно накладаються і йдуть послідовно: пружної деформації, пластичної деформації і руйнування.

Якщо тіло після зняття сил, що викликають деформацію, повністю відновлює свою первинну форму і розміри, то така деформація називається пружною.

В процесі пружної деформації тіло накопичує потенційну енергію (зміна відстані між атомами в кристалічній решітці). При розвантаженні накопичена енергія витрачається на відновлення розмірів і форми тіла (рис. 8.6).

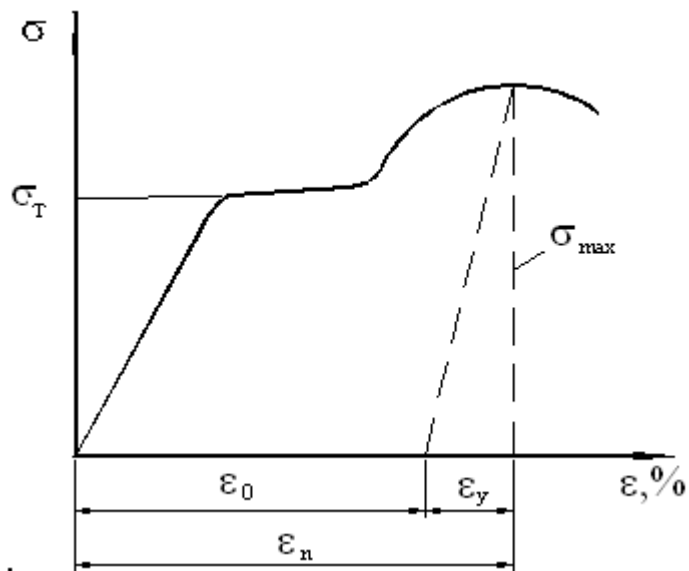


Рисунок 8.6 – Діаграма розтягування

Закон Гука, що описує зв'язок між  $\sigma$  і  $\epsilon$ :

$$\sigma = E\epsilon. \quad (8.1)$$

Для зсувної деформації

$$\tau = G\varphi, \quad (8.2)$$

де  $\tau$  – дотичне напруження;

$G$  – модуль зсуву (модуль другого роду);

$\varphi$  – кут перекошу решітки щодо рівноважної конфігурації, тобто пружна деформація зсуву.

Величина  $E$  зветься модуль нормальної пружності і пов'язана з модулем зсуву таким відношенням:

$$G = \frac{E}{2(1 + m)}, \quad (8.3)$$

де  $m \leq 0,5$  – коефіцієнт Пуассона.

Якщо після видалення доданих сил тіло не відновлює повністю первинну форму і розміри, то така деформація називається залишковою. Будь-яка залишкова деформація супроводжується пружною деформацією і їх сума є повною деформацією. Після зняття навантаження форма тіла частково відновлюється в результаті пружної деформації.

Таким чином пластична деформація є частина повної деформації, що не зникає після усунення причини, які її викликають.

Напруга, при якому починається пластична деформація, називається межею плинності. Для технічних цілей вводять поняття макроскопічної межі текучості як напруги, при якому залишкова деформація досягає величини  $\sim 0,2\%$  ( $\sigma_{0,2}$ ).

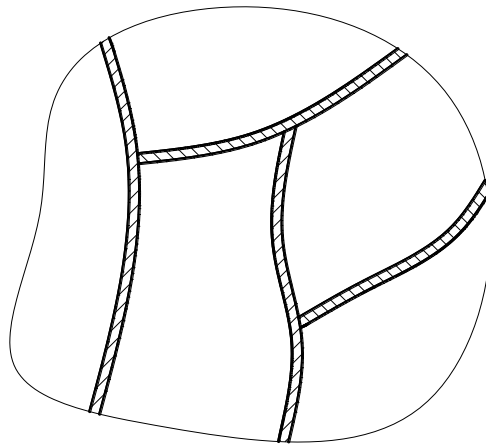
При пластичній деформації зовнішні сили, що діють на тіло, здійснюють роботу, яка частково переходить у внутрішню енергію тіла, але в основному йде на подолання опору пластичної деформації, тобто переходить в тепло.

### 8.3 Механізм пластичної деформації

Метали або їх сплави в твердому стані мають кристалічну будову. Їх деформація під дією прикладених навантажень залежить від типу кристалічної структури, а також від наявності недосконалостей в цій структурі.

Полікристалічне тверде тіло складається з безлічі хаотично орієнтованих кристалів або зерен з яскраво вираженою анізотропією. Зерна обмежуються поверхнею твердого тіла або поверхнями інших зерен, причому останні утворюють кордон зерен. На кордонах зерен знаходяться нерозчинні включення (оксиди, неметалеві включення, атоми основного металу, що мають невпорядковане розташування) звані міжкристалічною речовиною. Кожен окремий кристал складається з правильно розташованих в просторі однотипних елементарних осередків з атомами, розташованими в вузлових точках.

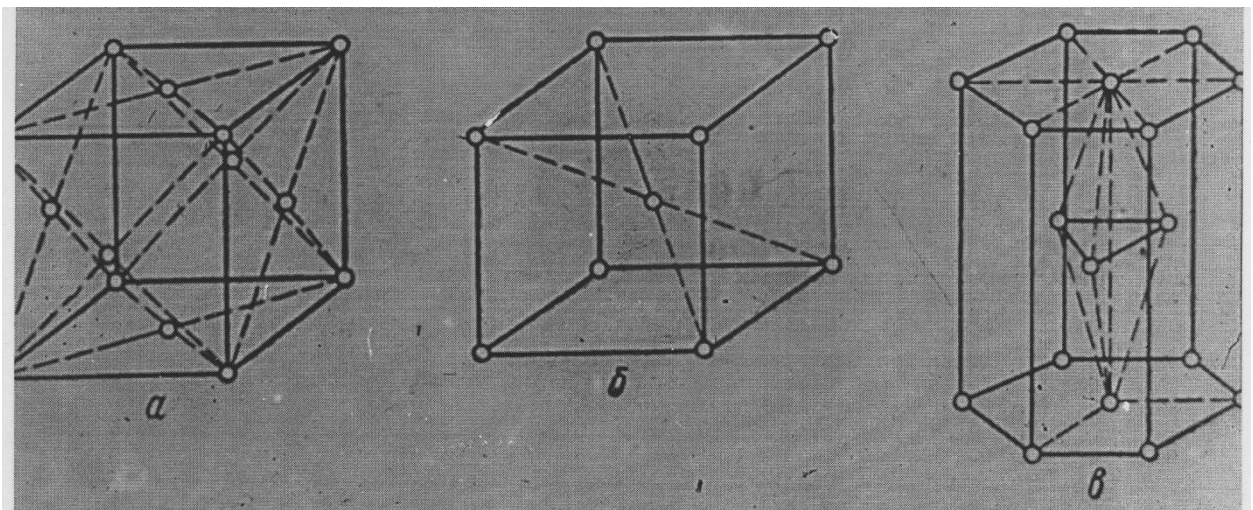
Сукупність таких ячілок утворюють просторову атомну решітку (рис. 8.7).



*Рисунок 8.7 – Будова полікристала*

За своїм кристалографічною будовою метали відрізняються один від одного і їх можна звести до 32 кристалічних класам. З них тільки три становлять інтерес для технології обробки металів, тому що більшість металів відноситься саме до цих трьох груп (рис. 8.8):

- а) гранецентрована кубічна решітка (Cu, Ag, Au, Al, Pb,;
- б) об'ємно-центрована кубічна решітка (Na, V, Mo, W,  $\alpha$ Fe,  $\delta$ Fe);
- в) гексогональна щільноупакована решітка (Be, Mg, Zn, Cd, Cr).



*Рисунок 8.8 – Типи решіток деяких металів*

Характер решітки визначає пластичні властивості металу. Чим більше граней з щільною упаковкою атомів, тим більш пластичний матеріал (рис. 8.9).

Додатком зовнішніх сил в кристалі можна викликати як пружну, так і пластичну деформацію. Щоб пластична деформація могла статися, необхідно, щоб дотичні напруження досягли певної критичної величини. Такі дотичні напруження можуть викликати два основних види деформації: так зване трансляційне ковзання по деяким площинах або ж двійникування (рис. 8.10).

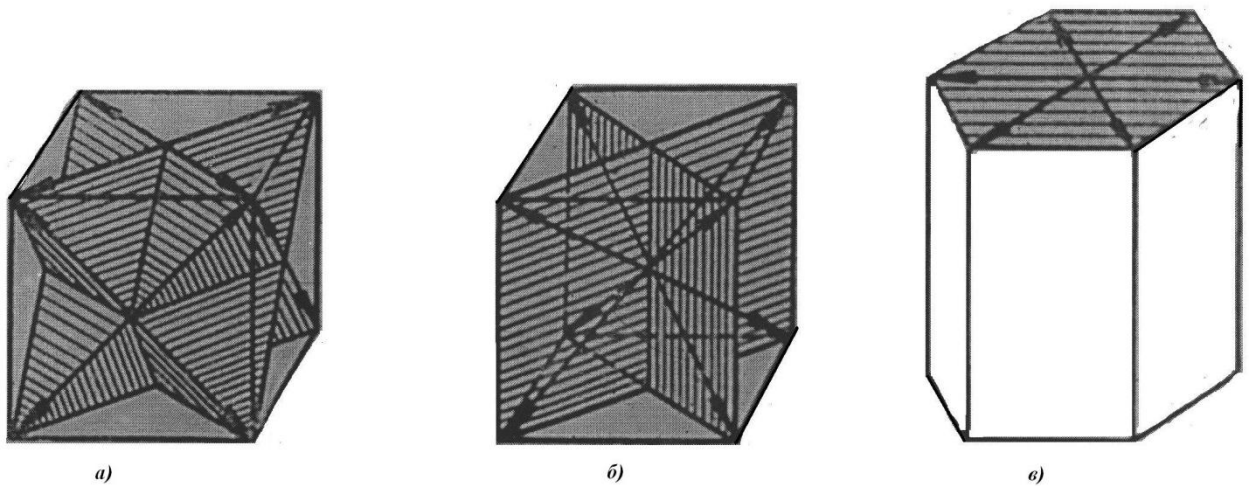
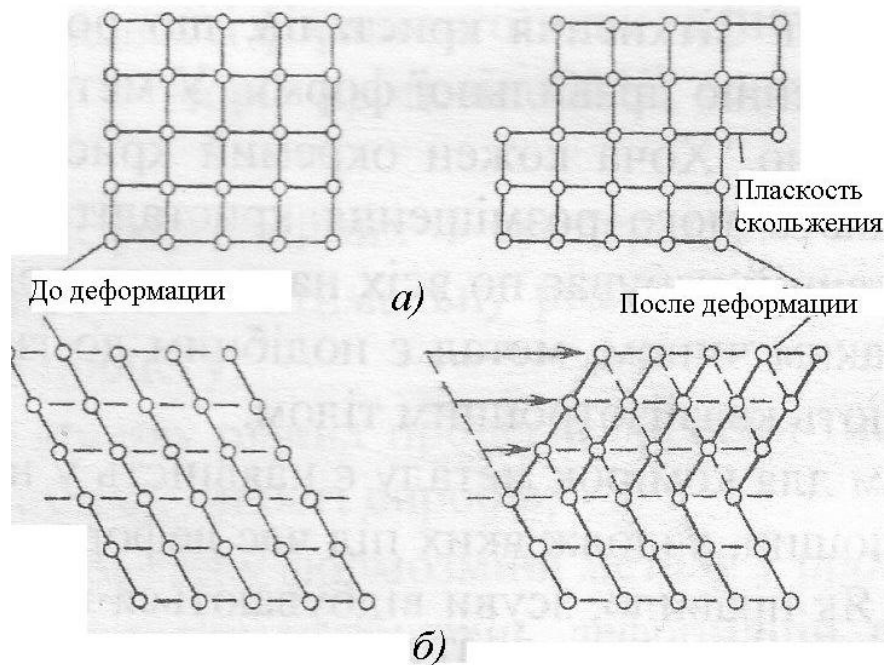


Рисунок 8.9 – Системи ковзання в граніцентованій кубічній (а), об'ємно-центрованої кубічній (б) і гексогональній (в) решітках



а – ковзання; б – двійникування

Рисунок 8.10 – Механізми пластичної деформації монокристала

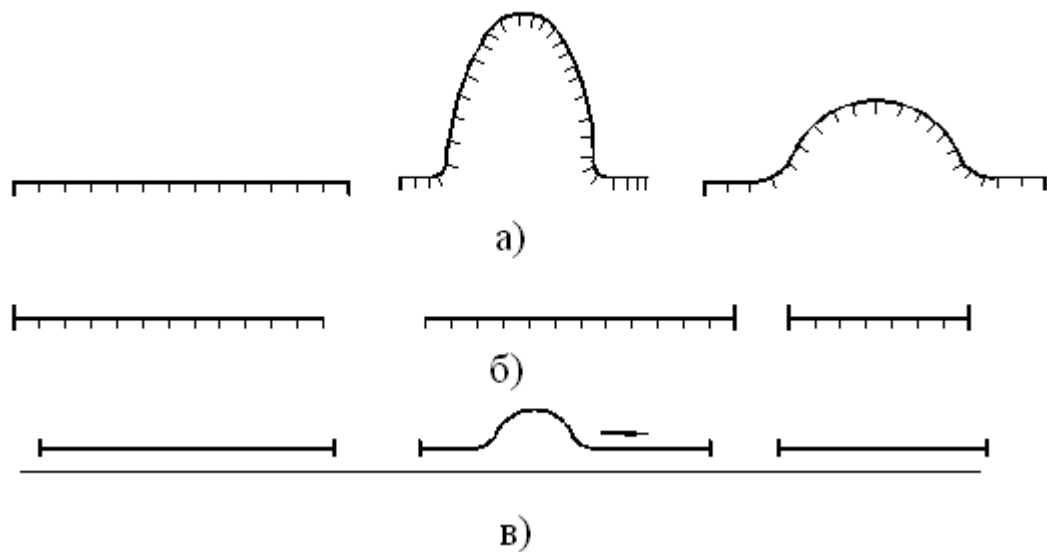
Трансляційне ковзання є звичайним механізмом ковзання при холодній та гарячій обробки металів тиском. При трансляційному ковзанні один шар атомів кристала ковзає по іншим верствам, причому переміщення відбувається на дискретну величину (переривчасто, стрибкоподібно), що дорівнює цілому числу міжатомних відстаней (див. рис. 8.10, а).

Розташування атомів в елементарних комірках після кожного ковзання зберігається і тверде тіло не змінює свого кристалічної будови під час пластичної деформації. Деформація цього типу відбувається не по суміжних атомним площинах, а по площинах, що знаходяться на значно більших відстанях один від одного. Така деформація зазвичай носить гетерогенний (неоднорідний) характер і відбувається по площинах з найбільшою упаковкою

атомів. Таким чином, чим більше можливих площин ковзання, тим більш пластичний метал (ГЦК, ОЦК).

При додатку дотичних напружень до реальних кристалів зрушення не відбувається відразу по всій площині ковзання. Ковзання починається в точці дефекту в кристалі і поширюється при значно меншій напрузі зсуву, ніж при одночасному ковзанні будь-якого цілого блоку атомів. Цей процес являє собою поширення дефекту в формі дислокацій.

Цей процес аналогічний переміщенню гусениці (рис. 8.11, а) або черв'яка (рис. 8.11, б), або процесу переміщення великого килиму по підлозі (рис. 8.11, в).



*Рисунок 8.11 – Схема поширення дефекту в формі дислокацій (механізму ковзання)*

Дислокація є лінійним дефектом кристалічної решітки, тобто лінією, уздовж якої порушені зв'язки між сусідніми атомами в кристалічній решітці.

Причинами виникнення дислокацій в кристалах можуть бути потрапляння в розплав стороннього мікророзчинення, зародження дефектів під дією прикладених напружень.

Зародження дислокацій в результаті додатка напружень є одним з головних механізмів, за яким протікає пластична деформація в технічних металах і сплавах. Дислокації виникають під час росту кристалів. Винятком є ніткоподібні кристали «вуса», висока міцність яких пояснюється відсутністю дислокацій.

Скупчення вакансій, під якими маються на увазі вільні від атомів вузли атомної решітки, також можуть бути причиною утворення дислокацій. Дислокації утворюються і в процесі пластичної деформації, причому їх джерелом служать самі дислокації.



Двійникування також відбувається тільки при досягненні дотичними напруженнями деякої критичної величини. Однак цей вид ковзання являє собою гомогенну (однорідну) деформацію (див. рис. 8.10, б).

Кожен шар кристала зміщується на пропорційну відстань. В результаті такої деформації новий кристал є дзеркальне відображення початкового кристала. Таким чином в кінцевому результаті деформації кристалічну будову зберігається, хоча під час процесу деформації воно тимчасово порушується.

Слід зауважити, що крім основних двох видів деформації в полікристалічних твердих тілах можуть відбуватися вторинні деформації, такі як згинання і скручування площини ковзання.

#### **8.4 Холодна деформація металів**

Обробку металів тиском здійснюють переважно при високих температурах, використовуючи зниження опору деформації при підвищенні температури. Однак в ряді випадків необхідно обробляти метали тиском в холодному стані, незважаючи на те, що для цього потрібні великі зусилля і підвищена витрата енергії:

а) коли перетини оброблюваного металу малі і неможливо забезпечити високу температуру в зоні деформації у зв'язку з швидким охолодженням металу;

б) під час волочіння, коли необхідно забезпечити міцність кінця, що виходить з волокна;

в) для підвищення міцності наклепом особливо чистих металів, збільшити міцність яких термічною обробкою неможливо;

г) для додання спеціальних фізичних, зокрема, магнітних властивостей;

д) для отримання виробів підвищеної точності розмірів і високої якості поверхні.

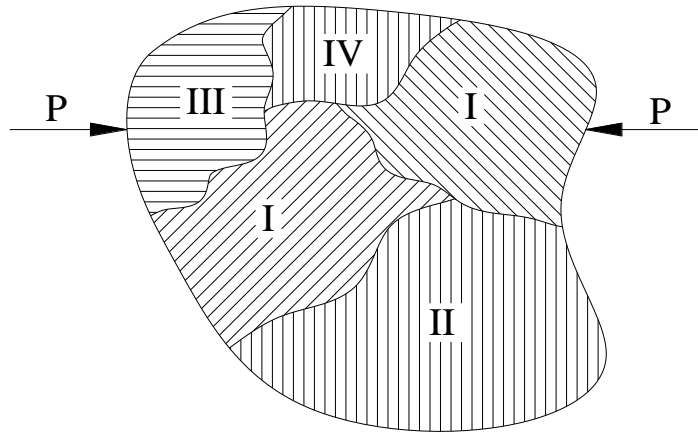
Деформація реальних металів, які представляють собою полікристали, здійснюється в результаті деформації кожного окремого зерна і переміщення, повороту зерен відносно один одного.

Перший механізм називають внутрикристалічною деформацією, а другий – міжкристалічною.

Внутрикристалічна пластична деформація відбувається ковзанням і двійникуванням.

У відпаленому металі зерна розташовані хаотично своїми кристаліграфічними елементами, можливі площині ковзання розташовані під різними кутами до напрямку діючої сили.

Розглянемо схему деформації полікристала, що складається з різно орієнтованих зерен (рис. 8.12).

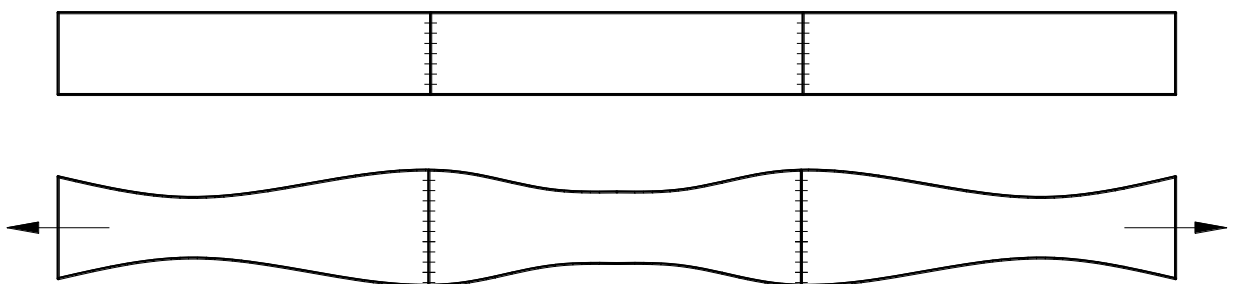


*Рисунок 8.12 – Схема деформації полікристала з різним орієнтуванням площин ковзання в зернах*

В першу чергу створюються умови для деформації зерен (I), площини ковзання яких розташовані під кутом  $45^{\circ}$  до напрямку дії сили, так як в цих площинах дотичні напруження досягнуть максимального значення. У зернах (II і III), у яких площини ковзання перпендикулярні або паралельні напрямку дії сили, умови для пластичної деформації відсутні, так як дотичні напруження на цих площинах рівні 0. Зерна, що мають проміжну орієнтування (IV) площин ковзання також не будуть деформуватися пластично, так як дотичні напруження на цих площинах  $\tau_{II,III} < \tau < \tau_I$ .

В результаті зерна I в першу чергу можуть деформуватися пластично, інші пружно. Для того, щоб деформувати пластично все зерна полікристала, зусилля повинне бути підвищено.

Розглянемо тепер умови міжзеренної деформації (рис. 8.13). Досліди з розтягуванням зразків, що складаються з 2-3 кристалів, показують, що поблизу кордонів зерна деформуються в меншій мірі, ніж далеко від них.



*Рисунок 8.13 – Результати дослідів з розтягуванням зразків у холодному стані*

Прикордонний шар виявляється більш міцним, ніж основне тіло зерна, завдяки спотворенню решітки в шарах, що прилягають до кордону, а також завдяки великому скруті деформацій зсуву поблизу кордонів з-за взаємодії

різноорієнтованих зерен. Зерна мають нерівні кордони, що викликає заклиннювання їх при деформації, енергії на здійснення міжкристалічної деформації потрібно більше, ніж на здійснення внутрикристалічної деформації, таким чином при деформації в холодному стані міжкристалічна деформація не протікає.

У полікристалах зони труднощів деформації розташовані по всіх кордонах зерен і їх зміцнююча дія тим більше, чим більше протяжність кордонів. Протяжність кордонів залежить від числа зерен в одиниці об'єму полікристала. Чим дрібніше зерна, тим більше опір деформації полікристала.

Міцність кордонів зерен – необхідна умова міцності полікристалів. Міжкристалічна деформація небажана, тому що навіть невеликий розвиток її може призводити до руйнування металу.

### 8.5 Зміна властивостей металу при холодній обробці тиском

Під час холодної обробки металів тиском відбувається суттєва зміна властивостей металу.

Зі збільшенням ступеня деформації підвищуються всі показники міцності – межа пружності, межа пропорційності, границя текучості, межу міцності (рис. 8.14). Це явище називається наклепом. Справа в тому, що зерна дробляться, зростає обсяг міжкристалічної речовини, змінюється відстань між атомами в кристалічній решітці, що викликає збільшення опору пластичної деформації.

В процесі деформації відбуваються міжкристалічне і внутрикристалічне руйнування, з'являються субмікроскопічні тріщини, які з підвищенням ступеня деформації збільшуються, що призводить до зменшення пластичності металу.



Рисунок 8.14 – Зміна механічних властивостей металу при холодній деформації

Зниження пластичності більше при схемах напруженого стану, що мають напруги, які розтягують, ніж при схемі всебічного стиснення.

Під час холодної обробки змінюється форма зерен відповідно до схеми деформації всього полікристала – зерна витягуються в напрямку деформації розтягування і зменшують розміри в напрямку деформацій стиснення. Так, під час волочіння і прокатці метал отримує волокнисту будову, внаслідок чого механічні властивості наклепаного металу будуть неоднаковими в різних напрямках.

Поряд зі зміною форми зерен відбувається зміна орієнтування їх решітки в результаті кристалографічної спрямованості ковзання по певним площинам і напрямками, тобто утворюється текстура деформації.

В процесі деформації утворюються міжкристалічні порожнечі, тріщини, що зменшує щільність і збільшує обсяг металу, але це зміна щільності і об'єму вельми мало (0,1...0,25 %), що дозволяє знехтувати цією зміною.

Крім того відбувається зміна електропровідності, корозійної стійкості, модуля пружності, магнітних властивостей.

## 8.6 Зміна властивостей наклепаного металу при нагріванні

Наклепаний метал знаходиться в нерівноважному стані з підвищеною вільною енергією атомів. Неоднорідність напруженого стану і нерівномірність розподілу енергії, створені пластичною деформацією, можуть бути усунені при термічній обробці. При цьому утворюються нові, менш спотворені зерна, відбувається з'єднання декількох зерен в одне зерно, що володіє меншою поверхнею на одиницю об'єму.

При нагріванні металів до порівняно низьких температур (приблизно до  $0,3 T_{пл}$  за абсолютною шкалою) в металах відбувається процес повернення або відпочинку, при якому наклепаний метал частково знеміцнюється (процеси відпустки). В результаті знижуються внутрішні напруги, підвищується пластичність. Структура металу залишається деформованою.

При підвищенні температури до  $0,4 T_{пл}$  і вище відбувається рекристалізація металу. Температура рекристалізації залежить від ступеня попередньої деформації: чим більше ступінь деформації, тим легше і при більш низьких температурах протікає процес рекристалізації.

В процесі рекристалізації відбувається глибока зміна всіх властивостей металу, характерних для наклепаного стану – метал повністю знеміцнюється, пластичність підвищується до рівня, відповідного ненаклепаного стану. Змінюється структура металу: відбувається зародження нових зерен рівно вісної форми, волокнисту будову і пов'язана з ним механічна анізотропія зникають (рис. 8.15). Разом із зародженням зерен відбувається їх зростання. Розмір зерен до моменту закінчення рекристалізації залежить від багатьох факторів:

температури, тривалості відпалу, ступеня попередньої деформації і величини зерен до холодної деформації.



Рисунок 8.15 – Схема впливу пластичної деформації і рекристалізації на мікроструктуру сталі

Зі збільшенням температури і тривалості відпалу, розміри зерен збільшуються. Великий вплив на величину зерна в рекристалізованому металі надає ступінь деформації (рис. 8.16).

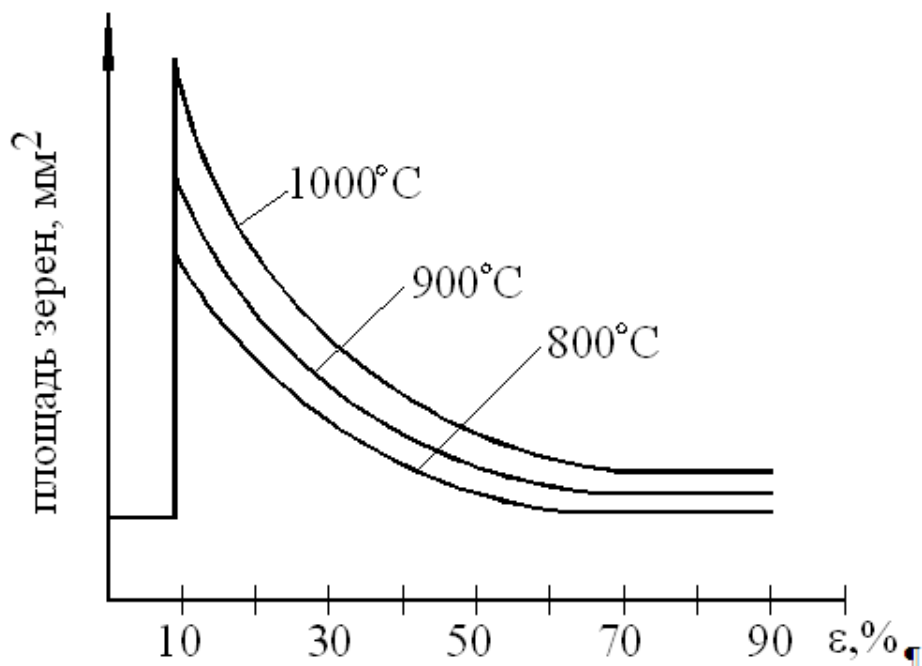


Рисунок 8.16 – Залежність розмірів зерен від температури рекристалізаційного відпалу і ступеня попередньої деформації ( $\epsilon$ )

З підвищенням ступеня деформації росте спотворення решітки, завдяки цьому зростає швидкість зародження центрів кристалізації, тому, чим більше ступінь деформації, тим дрібніше зерна. При малих ступенях деформації, до 5...10 %, спотворення решітки малі, кордони між зернами не зруйновані і ре-

кристалізація не відбувається. Отже, при середнім відносно невисоким ступенем деформації, але достатнім для протікання процесів рекристалізації зерна будуть особливо великими. Цю ступінь деформації називають критичною, вона відповідає приблизно 5...15 % відносної деформації.

Для обробки тиском, коли відпал рекристалізації є проміжним між етапами холодної деформації, отримання великого зерна небажано, так як крупнозернистий метал має знижену пластичність.

## 8.7 Релаксація

В процесі пластичного деформування поряд зі зміцненням йде процес знеміцнення. Явище, що зі зменшенням напружень в тілі, що деформується з плином часу – називають релаксацією. Релаксація відбувається тому, що атоми з плином часу переходять в положення стійкої рівноваги.

При холодному стані металу релаксація протікає дуже повільно і не робить істотного впливу на деформацію, так як швидкість зміцнення набагато вище швидкості знеміцнення (рис. 8.17).

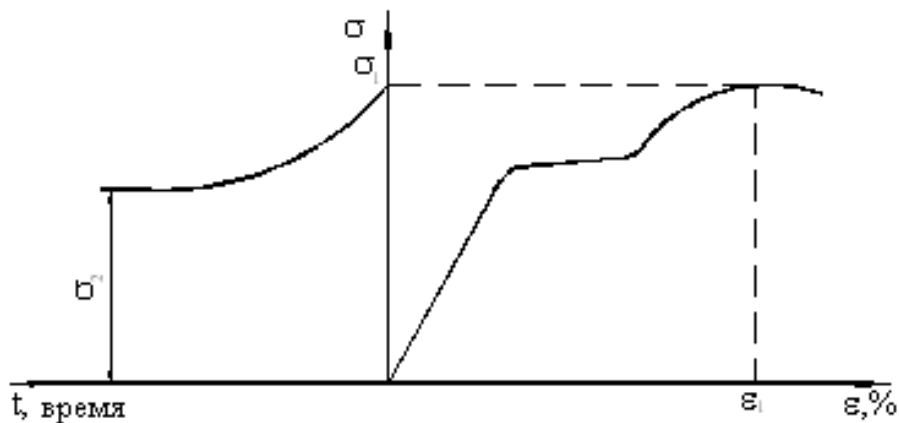


Рисунок 8.17 – Зміна напружень в деформованому металі в часі

## 8.8 Гаряча деформація

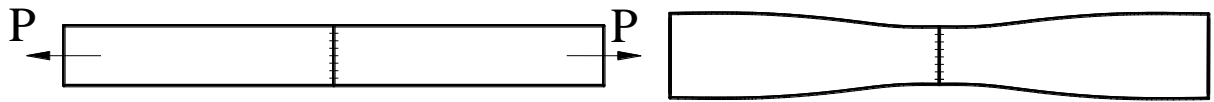
Гаряча обробка тиском є основним видом обробки. Її перевага в порівнянні з обробкою в холодному стані – значне зменшення опору деформації і, як правило, збільшення пластичності з ростом температури.

При гарячій обробці поряд з процесом деформації (отже, і зміцнення) відбувається процес рекристалізації. Швидкість протікання цих процесів залежить від умов деформації (швидкості і ступеня деформації) і будови металу. Залежно від того, який процес протікає швидше, результати деформації

будуть різні. Під гарячою деформацією розуміється деформація, в процесі якої все зерна встигають рекристалізуватися (знеміцнитися). Неповною гарячою деформацією називається така деформація, в процесі якої знеміцнення зерен йде в повному обсязі (поряд із знеміцненими зернами залишаються зміцнені). Така деформація при обробці тиском небажана, тому що виникають при цьому великі напруги в металі і можливе руйнування.

Неповна холодна (тепла) деформація застосовується при прокатці і волочіння сплавів, які трудно деформуються.

Основні механізми пластичної деформації при гарячій обробці: внутрізеренний ковзанням і двійникуванням і межзеренного взаємним переміщенням і поворотом зерен. Причому при гарячій обробці міжкристалічна речовина має меншу міцність, ніж основний метал і швидше подрібнюється (рис. 8.18).



*Рисунок 8.18 – Результати дослідів з розтягуванням зразків в гарячому стані*

## 9 ЛЕКЦІЯ 9 НАПРУЖЕНИЙ І ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛУ

### 9.1 Поняття про напружений стан. Тензор напружень

Технічні метали є полікристалічний. У більшості випадків розміри кристалів малі в порівнянні з розмірами тіла і напрямки їх орієнтації різні. У зв'язку з цим полікристалічні тіла в першому наближенні поведуться так само як тіла однорідні і ізотропні. Хоча анізотропію полікристалічних тіл при відповідному режимі обробки легко виявити, наявністю її в теорії пружності та пластичності зазвичай нехтують, що значно спрощує ці теорії.

Візьмемо суцільне, однорідне та ізотропне тіло довільної форми, що знаходиться під дією системи сил (рис. 9.1) і подумки розсічемо його площиною на дві частини А і В. Частина В відкинемо. Напрямок січної площини будемо характеризувати зовнішньою нормаллю  $\vec{n}$ . Шлях  $dS$  – рівнодіюча всіх сил, що діють на елементарній площадці  $dF$ , виділеної в площині перетину. Тоді вектор  $\vec{P} = dS/dF$  – повна напруга на даному майданчику.

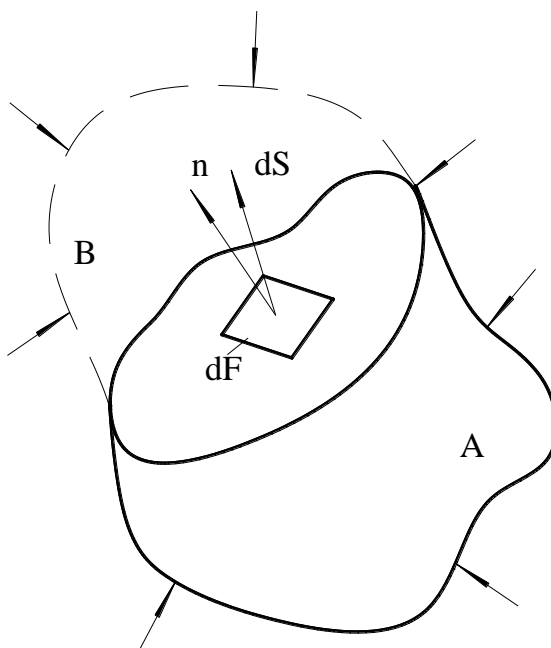


Рисунок 9.1 – Схема до визначення напруги на елементарній площадці

Повна напруга на даній елементарній площадці може бути розкладено по правилу паралелепіпеда на три складових напруги: одне по нормалі до площадки (нормальне напруга) і два в площині майданчики (дотичні напруження).

Напруга – це інтенсивність внутрішніх зусиль під дією зовнішніх сил, прикладених до тіла. Термін «напруга» можна застосовувати і для інтенсив-



ності зовнішніх сил, які зазвичай називають тиском, контактною (робочою) напругою.

Розрізняють лінійний, плоский і об'ємний напружений стан. При обробці металів тиском домінують плоске і об'ємне напружені стани.

Напруження в тілі, яке деформується різне в різних його точках. У зв'язку з цим необхідно вміти визначати напруги в точці з будь-якого напрямку. Це можливо за умови, що відомі три вектора напружень, що діють в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Знаючи ці напруги можна визначити напругу в будь-якому майданчику, що проходить через дану точку. Таким чином напружений стан характеризується сукупністю трьох векторів. Величина, яка характеризується сукупністю трьох векторів називається тензоромю. Виділяємо точку з деформованого тіла у вигляді нескінченно малого паралелепіпеда (рис. 9.2). Замінюючи дію відкинутої частини тіла відповідними силами і висловлюючи останні через проекції напруг на координати осі, отримаємо:

$$T_H = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (9.1)$$

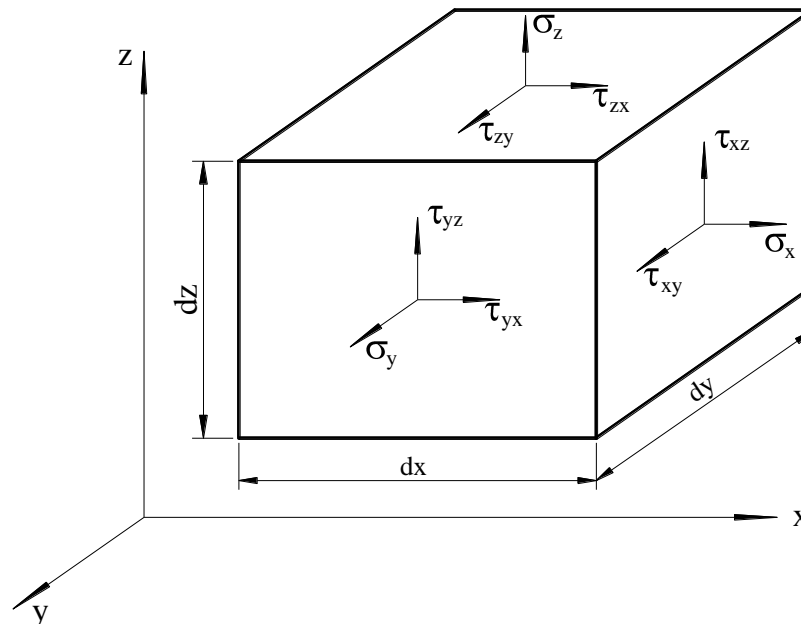


Рисунок 9.2 – Схема до визначення напружень в точці деформованого тіла

Сукупність цих дев'яти величин носить назву тензора напруги.

Припускаючи, що елементарний паралелепіпед знаходиться в рівновазі і, прирівнюючи на цій підставі нулю суми моментів сил щодо осей, що проходять через напрямки нормальних напружень, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

Наприклад  $\tau_{xy} \frac{dx}{2} dydz = \tau_{yx} \frac{dy}{2} dx dz$ ;  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ .

Отримані співвідношення висловлюють закон парності дотичних напружень.

Нами отримано дев'ять величин, за допомогою яких можна описати напружений стан в кожній точці тіла. Оскільки дотичні напруження попарно рівні, напружений стан довільної точки тіла може бути охарактеризоване шістьма величинами.

Тензор  $T_n$  можна уявити як суму кульового тензора напружень  $T_n^0$  і девіатора напруг  $D_n$

$$T_n = T_n^0 + D_n.$$

Введемо позначення  $\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ . Тоді можна написати:

$$T_n = \begin{vmatrix} \sigma_{cp} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{cp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_{cp} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{cp} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_{cp} \end{vmatrix}. \quad (9.3)$$

Кульовий тензор напружень характеризує такий напружений стан елемента, при якому буде відбуватися тільки зміна його обсягу. Девіатор напруг характеризує напружений стан, при якому відбувається тільки зміна форми елементарного обсягу. При досягненні напругою цієї величини починається пластична деформація.

## 9.2 Головні нормальні напруги. Еліпсоїд напруг

Виділимо в тілі, що деформується точку  $O$  і приймаємо її за початок координат  $XUZ$ . Проведемо похилу площину  $ABC$ , отримаємо тетраедр  $OABC$ . Положення площини визначаємо напрямними косинусами кутів між нормаллю  $N$  до цієї площини і осях координат:

$$\cos(NX) = \cos \alpha_x = a_x;$$

$$\cos(NY) = \cos \alpha_y = a_y;$$

$$\cos(NZ) = \cos \alpha_z = a_z.$$

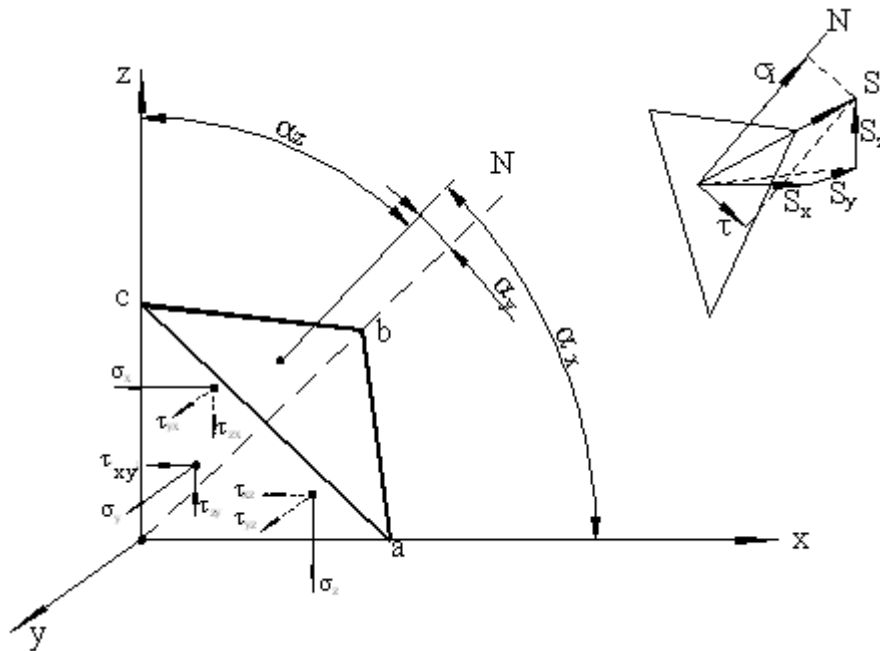


Рисунок 9.3 – Схема до визначення напружень на довільному майданчику

На координатних майданчиках діють повні напруги  $S'_x, S'_y, S'_z$ , які можна розкласти на нормальні і дотичні напруження паралельні осям координат (індексація: 1-й індекс – паралельна вісь; 2-й індекс – перпендикулярна вісь).

На похилій площадці тетраедра діє повна напруга  $S$ , яку розкладають на  $S_x, S_y, S_z$ .

$$S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2. \quad (9.4)$$

Виділений тетраедр знаходиться в рівновазі, отже, сума проєкцій на осі координат всіх сил, що діють на тетраедр дорівнює нулю.

Прийmemo  $\Delta F$  – площа похилого майданчика, тоді площі координатних майданчиків:

$$\Delta F_x = \Delta F a_x; \Delta F_y = \Delta F a_y; \Delta F_z = \Delta F a_z.$$

Напишемо умови рівноваги тетраедра:

Наприклад:

$$\Delta F S_x = \Delta F \sigma_z a_x; \Delta F \tau_{xy} a_y + \Delta F \tau_{xz} a_z$$

Маємо:

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \sigma_x a_x + \tau_{xy} a_y + \tau_{xz} a_z \\ S_y &= \sigma_y a_y + \tau_{yx} a_x + \tau_{yz} a_z \\ S_z &= \sigma_z a_z + \tau_{zx} a_x + \tau_{zy} a_y \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

Тоді:

$$S^2 = (\sigma_x a_x + \tau_{xy} a_y + \tau_{xz} a_z)^2 + (\sigma_y a_y + \tau_{yx} a_x + \tau_{yz} a_z)^2 + (\sigma_z a_z + \tau_{zx} a_x + \tau_{zy} a_y)^2. \quad (9.6)$$

При виділенні обсягу тетраедра ми не обмежували його розмірів, тому вираз (9.6) справедливо і для точки O.

Отже для визначення напруги в точці тіла необхідно знати напруги на координатних майданчиках (їх 9, а з огляду на умову парності – 6).

Визначимо нормальні  $\sigma_n$  і дотичні напруження на похилій площадці:

$$\sigma_n = S_x a_x + S_y a_y + S_z a_z. \quad (9.7)$$

Підставами в (9.7) значення  $S_x, S_y, S_z$  і беручи до уваги формулу парності, отримуємо:

$$\sigma_n = S_x a_x^2 + S_y a_y^2 + S_z a_z^2 + 2\tau_{xy} a_x a_y + 2\tau_{xz} a_x a_z + 2\tau_{yz} a_y a_z; \quad (9.8)$$

$$\tau^2 = S^2 - \sigma_n^2. \quad (9.9)$$

Перетворимо вираз (9.8). Відкладемо в напрямку нормалі N вектор r

$$r^2 = C^2 / \sigma_n,$$

де C – const.

Проекції вектора r на осі координат

$$x = r a_x, \quad y = r a_y, \quad z = r a_z,$$

Звідки

$$a_x = x / r; \quad a_y = y / r; \quad a_z = z / r.$$

Підставим ці вирази в (9.8), отримаємо:

$$C^2 = \sigma_x x^2 + \sigma_y y^2 + \sigma_z z^2 + \sigma_x x^2 + 2\tau_{xy} xy + 2\tau_{xz} xz + 2\tau_{yz} yz. \quad (9.10)$$

Це рівняння еліпсоїда, віднесене до центру. З аналітичної геометрії відомо, що рівняння поверхні другого порядку, яке віднесене до центру, може бути перетворено обертанням координатної системи до збігу осей координат з осями поверхні. Таке рівняння поверхні буде віднесено до центру та осей. Похідні координати в цьому випадку обернуться в нулі.

Отже, через точку тіла, що знаходиться в напруженому стані, можна провести три взаємно перпендикулярні осі. На майданчиках, перпендикулярних до цих осей дотичні напруження відсутні і діють тільки нормальні напруження. Ці напруження називають головними нормальними напруженнями, майданчики, на яких вони діють – головними майданчиками, а напрямки головних нормальних напружень – головними напрямками.

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$

У головних напружених:  
складові повної напруги:

$$S_x = \sigma_1 a_x; S_y = \sigma_2 a_y; S_z = \sigma_3 a_z; \quad (9.11)$$

повне напруження

$$S^2 = \sigma_1^2 a_x^2 + \sigma_2^2 a_y^2 + \sigma_3^2 a_z^2; \quad (9.12)$$

нормальне напруження

$$\sigma_n = \sigma_1 a_x^2 + \sigma_2 a_y^2 + \sigma_3 a_z^2; \quad (9.13)$$

дотичне напруження:

$$\tau^2 = \sigma_1^2 a_x^2 + \sigma_2^2 a_y^2 + \sigma_3^2 a_z^2 - (\sigma_1 a_x^2 + \sigma_2 a_y^2 + \sigma_3 a_z^2). \quad (9.14)$$

Поняття тензора напруги може бути інтерпретовано алгебраїчно:  
З рівняння (9.11)

$$a_x^2 = \frac{S_x^2}{\sigma_1^2}; a_y^2 = \frac{S_y^2}{\sigma_2^2}; a_z^2 = \frac{S_z^2}{\sigma_3^2},$$

враховуючи, що

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1, \quad (9.15)$$

отримуємо

$$\frac{S_x^2}{\sigma_1^2} + \frac{S_y^2}{\sigma_2^2} + \frac{S_z^2}{\sigma_3^2} = 1. \quad (9.16)$$

Це рівняння еліпсоїда, віднесене до центру і головних осей, називають еліпсоїдом напруг (рис. 9.4). Напівосі еліпсоїда напруг рівні головним напруженням. Будь відрізок від центру до перетину з поверхнею еліпсоїда є величину повної напруги  $S$  на майданчику перпендикулярної до відрізка, а проєкції відрізка на осі координат дорівнюють складовим повної напруги по осях.

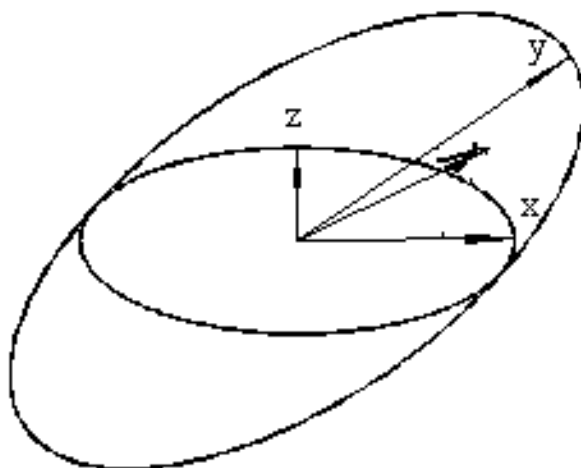


Рисунок 9.4 – Еліпсоїд напружень

### 9.3 Кругова діаграма Мора. Головні дотичні напруження

При заданих величинах головних нормальних напруг величини напружень на похилій площадці  $\sigma_n$  і  $\tau$  змінюються при зміні нахилу майданчика до головних осей.

Визначимо максимальні дотичні напруження і положення похилих площадок, за якими вони діють. Для цього скористаємося колами Мора, графічно представляють співвідношення між нормальними і дотичними напруженнями. Маємо:

$$S^2 = \sigma_n^2 + \tau^2. \quad (9.17)$$

Рівняння (9.12)–(9.15), (9.17) вирішимо щодо квадратів косинусів, для чого до правої і лівої частин рівняння (9.17) додамо  $\sigma_2\sigma_3$  і віднімемо  $\sigma_n(\sigma_2 + \sigma_3)$ :

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 a_x^2 + \sigma_2^2 a_y^2 + \sigma_3^2 a_z^2 - (\sigma_2 + \sigma_3)(\sigma_1 a_x^2 + \sigma_2 a_y^2 + \sigma_3 a_z^2) + \sigma_2 \sigma_3 &= \\ &= \sigma_n^2 + \tau^2 - \sigma_n(\sigma_2 + \sigma_3) + \sigma_2 \sigma_3; \\ \sigma_1^2 a_x^2 + \sigma_2^2 a_y^2 + \sigma_3^2 a_z^2 - \sigma_2 \sigma_1 a_x^2 - \sigma_2^2 a_y^2 - \sigma_2 \sigma_3 a_z^2 - \sigma_1 \sigma_3 a_x^2 - \\ - \sigma_2 \sigma_3 a_y^2 - \sigma_3^2 a_z^2 + \sigma_2 \sigma_3 &= \tau^2 + \sigma_n^2 - \sigma_n \sigma_2 - \sigma_n \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3; \\ a_x^2 (\sigma_1^2 - \sigma_2 \sigma_1 - \sigma_1 \sigma_3) + \sigma_2 \sigma_3 (1 - a_y^2 - a_z^2) &= \tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3); \\ 1 - a_y^2 - a_z^2 &= a_x^2, \end{aligned}$$

тоді

$$\begin{aligned} a_x^2 (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) &= \tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3); \\ \rightarrow a_x^2 (\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) &= \tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3); \quad \P \\ \rightarrow a_x^2 &= \frac{\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (+) \rightarrow \quad (9.18) \P \end{aligned}$$

¶  
Аналогічно¶  
¶

$$\rightarrow a_y^2 = \frac{\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_1)(\sigma_n - \sigma_3)}{(\sigma_2 - \sigma_1)(\sigma_2 - \sigma_3)}; \quad (-) \rightarrow \quad (9.19) \P$$

$$\rightarrow a_z^2 = \frac{\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_1)(\sigma_n - \sigma_2)}{(\sigma_3 - \sigma_1)(\sigma_3 - \sigma_2)} \quad (+) \rightarrow \quad (9.20) \P$$

Квадрати косинусів завжди позитивні, тоді

$$\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3) \geq 0; \quad (9.21)$$

$$\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_1)(\sigma_n - \sigma_3) \leq 0; \quad (9.22)$$

$$\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_1)(\sigma_n - \sigma_2) \geq 0. \quad (9.23)$$

У граничному випадку ці вирази перетворюються в рівняння кіл в координатах  $\sigma - \tau$  з центром на осі  $\sigma$  (рис. 9.5)

$$\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3) = 0. \quad (9.24)$$

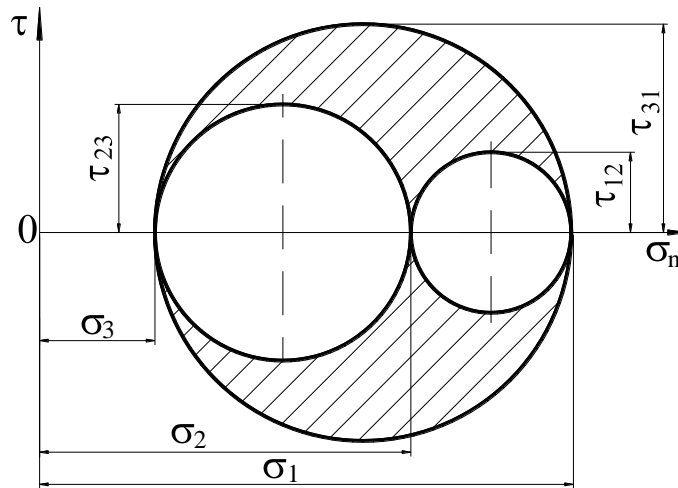


Рисунок 9.5 – Кругова діаграма Мора

Додамо до обох частин виразу (9.24)  $\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2$ , отримаємо

$$\tau^2 + (\sigma_n - \sigma_2)(\sigma_n - \sigma_3) + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2$$

або

$$\tau^2 + \sigma_n^2 - \sigma_n(\sigma_2 + \sigma_3) + \sigma_2\sigma_3 + \frac{\sigma_2^2 - 2\sigma_2\sigma_3 + \sigma_3^2}{4} = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2.$$

отримуємо

$$\tau^2 + \left(\sigma_n - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right)^2.$$

Це рівняння кола з діаметром  $\sigma_2 - \sigma_3$  і з центром на осі  $\sigma_n$  на відстані  $\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$ . Аналогічно можна отримати ще два кола діаметром  $\sigma_1 - \sigma_2$  і  $\sigma_1 - \sigma_3$ .

Так як (9.21) і (9.23) більше або дорівнює нулю, а (9.22) менше або дорівнює нулю, то співвідношення між  $\sigma_n$  і  $\tau$  визначаються координатами точок, що лежать в заштрихованій частини кола.



З рис. 9.5 видно, що є три максимальних значення дотичних напружень:

$$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \tau_{23} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_{31} = \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}. \quad (9.25)$$

Ці напруги називають головними дотичними напруженнями. З рис. 9.5 видно, що головні дотичні напруження діють на майданчиках, де нормальні напруги відповідно рівні:

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}, \quad \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}.$$

Для визначення майданчиків, в яких діють головні дотичні напруження, скористаємося виразами (9.18)–(9.20), підставивши в них значення максимальних дотичних напружень (9.24).

Визначимо положення майданчиків дії  $\tau_{31}$ :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad \text{и} \quad \sigma_n = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}; \\ a_x^2 &= \frac{\left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} - \sigma_2\right)\left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} - \sigma_3\right)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} = \\ &= \frac{\left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}\right)^2 - \sigma_3\left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}\right) - \sigma_2\left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}\right) + \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} = \\ &= \frac{\frac{\sigma_3^2 - 2\sigma_3\sigma_1 + \sigma_3^2 + 2\sigma_3\sigma_1 + \sigma_1^2}{4} - \frac{\sigma_3^2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_2}{2} + \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} \left( \sigma_3^2 + \sigma_1^2 - \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 \right)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

або

$$a_x = \pm \frac{1}{\sqrt{2}},$$

Тобто кут між нормаллю до майданчика і віссю 1 дорівнює  $45^\circ$ ;

$$a_y^2 = 0,$$

тобто нормаль до майданчика перпендикулярна осі 2;

$$a_z^2 = \frac{1}{2}.$$

Отже, площі дії  $\tau_{31}$  паралельні осі 2 і нахилені під кутом  $45^\circ$  до осей 1 і 3. Таких майданчиків дві і вони взаємно перпендикулярні. Аналогічно можна визначити положення майданчиків дії дотичних напружень  $\tau_{12}$  і  $\tau_{23}$  (рис. 9.6).

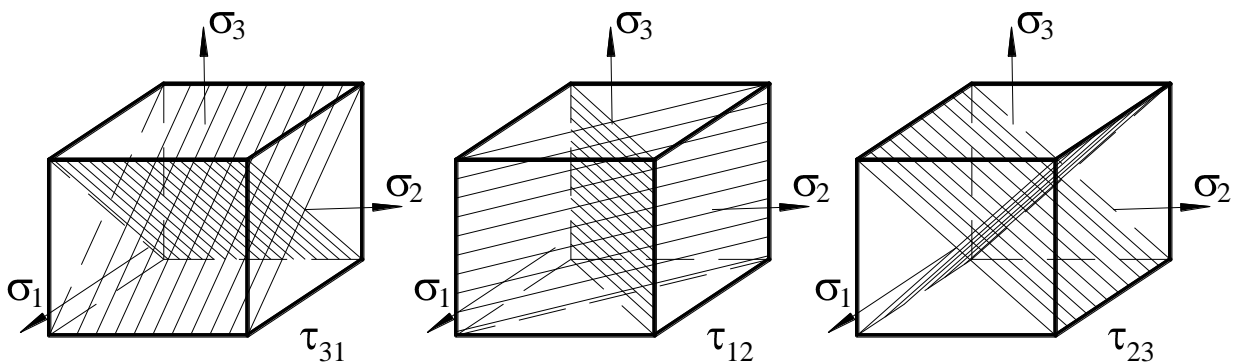


Рисунок 9.6 – Майданчик дії максимальних дотичних напружень

Всього майданчиків, на яких діють максимальні дотичні напруження, шість.

З кіл Мора видно, що

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \underbrace{\sigma_2 - \sigma_3}_{\tau_{31}} + \underbrace{\sigma_1 - \sigma_2}_{\tau_{12}}$$

або

$$(\sigma_1 - \sigma_2) + \underbrace{\sigma_2 - \sigma_3}_{\tau_{23}} + \underbrace{\sigma_3 - \sigma_1}_{\tau_{31}} = 0.$$

Розділивши обидві частини цієї рівності на 2, отримаємо:

$$\tau_{12} + \tau_{23} + \tau_{31} = 0. \quad (9.26)$$

Сума головних дотичних напружень дорівнюють нулю.

## 9.4 Октаедричні напруги

Велике значення в теорії пластичної деформації мають майданчики, які рівнонахилені до головних осей. Ці майданчики називають октаедричними. Всього їх 8 і разом вони утворюють октаедр. Напруження, що діють на таких майданчиках, називають октаедричними.

Визначимо нормальне і дотичне октаедричні напруження:

$$a_x = a_y = a_z = a; \quad a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1; \quad a = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Повне октаедричне напруження:

$$S_{\text{окт}}^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3}. \quad (9.27)$$

Нормальне октаедричне напруження:

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (9.28)$$

Цю напругу називають також гідростатичним тиском.

Октаедричне дотичне напруження:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{окт}}^2 &= S_{\text{окт}}^2 - \sigma_{\text{окт}}^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3} - \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{9} (3\sigma_1^2 + 3\sigma_2^2 + 3\sigma_3^2 - \sigma_1^2 - \sigma_2^2 - \sigma_3^2 - 2\sigma_1\sigma_2 - 2\sigma_1\sigma_3 - 2\sigma_2\sigma_3); \\ \tau_{\text{окт}}^2 &= \frac{1}{9} (2\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2 + 2\sigma_3^2 - 2\sigma_1\sigma_2 - 2\sigma_1\sigma_3 - 2\sigma_2\sigma_3); \\ \tau_{\text{окт}}^2 &= \frac{1}{9} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]; \\ \tau_{\text{окт}} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \end{aligned} \quad (9.29)$$

При відомих напруженнях на довільній площадці:

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}; \quad (9.30)$$

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2}. \quad (9.31)$$

Скалярна величина, яка чисельно рівна октаедричному дотичному напруженню, називається інтенсивністю дотичних напружень  $\tau_i$ , і викликає зміну не обсягу деформованого тіла, а його форми. Ця напруга має велике значення при дослідженні та пластичної деформації.

### 9.5 Схеми напруженого стану

За класифікацією С. І. Губкіна розрізняють лінійне, плоске і об'ємне напруження стану металу (рис. 9.7).

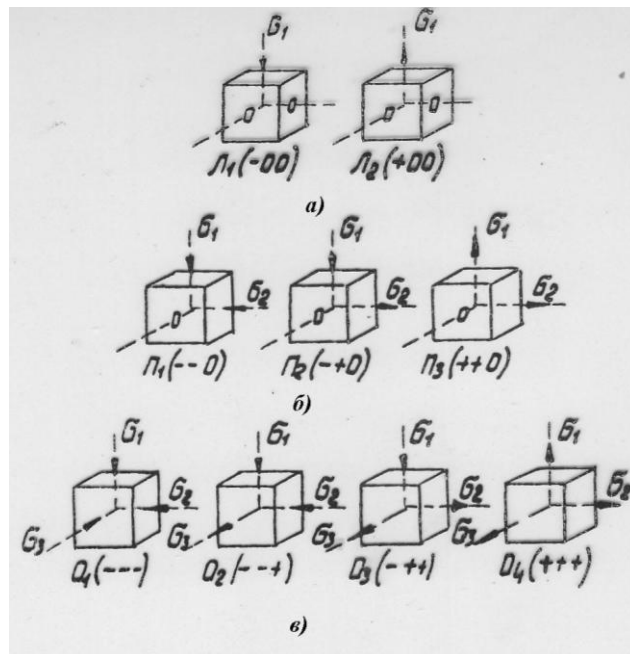


Рисунок 9.7 – Схеми напруженого стану металу: лінійного (а), плоского (б) і об'ємного (в)

Схеми  $L_1$ ,  $L_2$  (див. рис. 9.7, а) і  $O_4$  (див. рис. 9.7, в) на практиці не зустрічаються.

### 9.6 Поняття про деформованому стані металу (малі деформації)

У процесі пластичної деформації тіло змінює свою форму і розміри. Аналогічно напруження деформації змінюються від точки до точки тіла, що деформується, тому співвідношення між деформаціями визначимо для малого обсягу тіла. Виділимо в тілі нескінченно малий паралелепіпед (рис. 9.8).

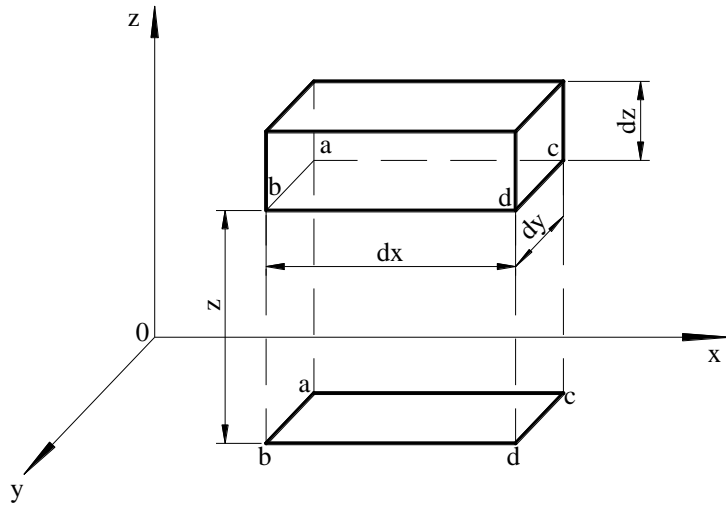


Рисунок 9.8 – Елементарний об'єм металу до деформації

При деформації паралелепіпед переміщається, довжина його ребер і кути між гранями змінюються. При цьому спостерігається деформація двох видів – лінійна (подовження, укорочення) і кутова (зсуву).

Розглянемо проекцію паралелепіпеда на координатну площину ХОУ (рис. 9.9).

Тут, наприклад,  $\frac{\partial U}{\partial x}$  – інтенсивність розвитку функції  $U$  в напрямку осі  $X$ , а  $\frac{\partial U}{\partial x} dx$  – приріст переміщення  $U$  на довжині  $dx$ .

Відносне подовження ребра  $ac$ , рівного до деформації  $dx$ :

$$\epsilon_x = \frac{\left( dx + U + \frac{\partial U}{\partial x} dx - \varphi \right) - dx}{dx} = \frac{\partial \varphi}{\partial x};$$

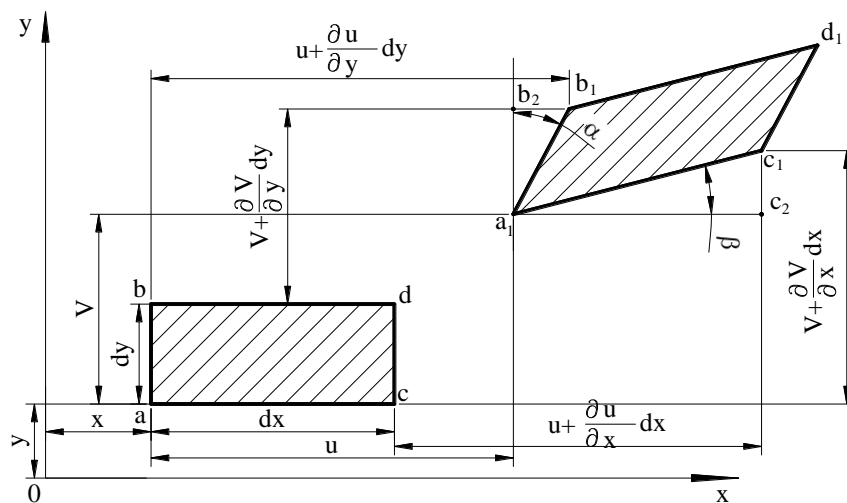


Рисунок 9.9 – Проекція паралелепіпеда на площину ХОУ

$$\varepsilon_y = \frac{\left( dy + V + \frac{\partial V}{\partial y} dy - V \right) - dy}{dy} = \frac{\partial V}{\partial y};$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z}.$$

Відносна деформація елемента уздовж осі дорівнює частині похідної від переміщення по цій осі.

Деформація зсуву в площині XOY:

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta.$$

З трикутника  $a_1 C_1 C_2$ :

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{C_1 C_2}{a_1 C_2} = \frac{V + \frac{\partial V}{\partial x} dx - V}{dx + U + \frac{\partial U}{\partial x} dx - U};$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\frac{\partial V}{\partial x} dx}{dx + \frac{\partial U}{\partial x} dx} = \frac{\frac{\partial V}{\partial x} dx}{\left(1 + \frac{\partial U}{\partial x}\right) dx}.$$

Так як  $\frac{\partial U}{\partial x} \ll 1$  і при малих деформаціях можна вважати, що  $\operatorname{tg}\beta = \beta$ :

$$\beta = \frac{\partial V}{\partial x}.$$

Аналогічно

$$\alpha = \frac{\partial U}{\partial y}.$$

Отже деформація зсуву:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}.$$

Аналогічно

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}.$$

Деформований стан в точці визначається дев'ятьма складаючими, які можна розташувати в наступній таблиці:

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}. \quad (9.32)$$

Це тензор деформації.

Деформований стан в точці цілком визначено, якщо для неї заданий тензор деформації. Тензор деформації має ті ж властивості, що і тензор напружень.

Отже, в кожній точці тіла існує три взаємно перпендикулярних напрямки, які називають головними осями деформації. Уздовж цих осей відбувається тільки лінійна деформація

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3;$$

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix}. \quad (9.33)$$

Всі формули в теорії деформації можна записати по аналогії з відповідними формулами теорії напружень.

При пластичної деформації зміна обсягу практично не відбувається. Збільшенням обсягу при холодній деформації і зниженням його при гарячій деформації можна знехтувати (рис. 9.10).

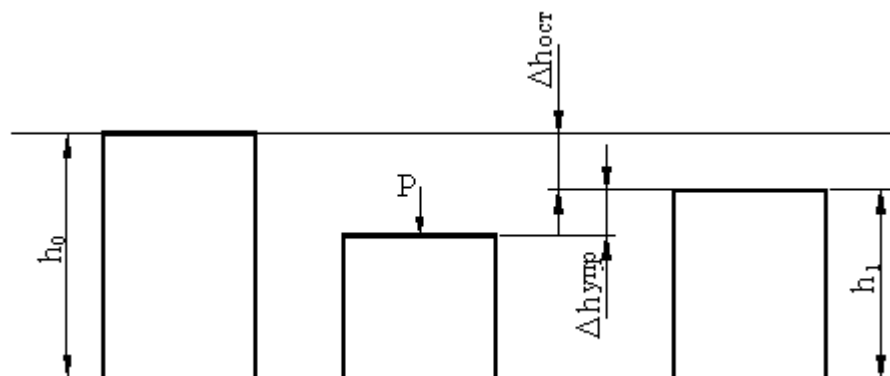


Рисунок 9.10 – Схема поведінки металевого тіла після деформації

З умови сталості обсягу слід, що сума малих лінійних деформацій дорівнює нулю. Дійсно приріст обсягу елементарного кубика (нехай довжина його ребра в початковому стані дорівнює 1) після його деформації можна уявити

$$\Delta V = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 = 1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3 - 1 = 0.$$

Нехтуючи творами малих деформацій, отримуємо:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (9.34)$$

## 9.7 Великі деформації

При обробці металів тиском відбуваються великі деформації, коли в процесі деформації розміри тіла значно змінюються. В цьому випадку правильніше абсолютну деформацію за малий проміжок часу відносити до розміру тіла в початковий момент цього проміжку. Тоді повна відносна деформація визначиться як сума малих деформацій за весь процес деформації.

Розглянемо осадку тіла з початковою висоти  $h_0$  до кінцевої висоти  $h_1$  (рис. 9.11). Припустимо, що в якийсь момент часу висота тіла дорівнює  $h$ , а нескінченно мала зміна його висоти (зменшення) одно  $dh$ , тоді нескінченно мала деформація

$$d\delta_h = \frac{dh}{h}. \quad (9.35)$$

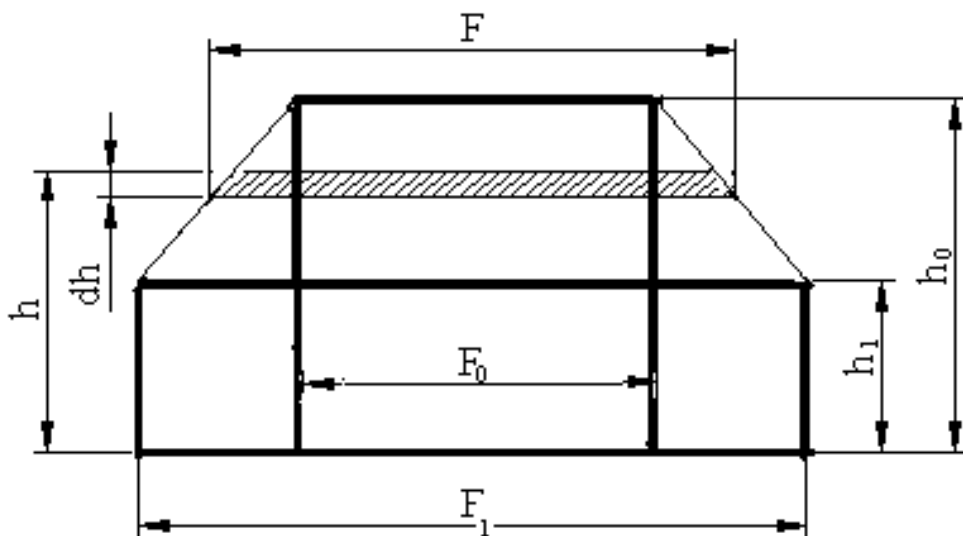


Рисунок 9.11 – Схема до визначення великих деформацій



Сумарна відносна деформація осадки тіла від  $h_0$  до  $h_1$

$$\delta_h = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = (\ln h) \Big|_{h_0}^{h_1} = \ln h_1 - \ln h_0;$$

$$\delta_h = \ln \frac{h_1}{h_0}. \quad (9.36)$$

Припустимо, що вихідні розміри тіла  $h_0, l_0, b_0$ , а кінцеві розміри тіла –  $h_1, l_1, b_1$ , тоді

$$\delta_l = \ln \frac{l_1}{l_0}; \quad \delta_b = \ln \frac{b_1}{b_0}. \quad (9.37)$$

Відносні деформації  $\delta_h, \delta_b, \delta_l$  називають істинними, логарифмічними, інтегральними.

Відношення розмірів тіла після деформації до його розмірів до деформації називають коефіцієнтами деформації.

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{h_1}{h_0} - \text{коефіцієнт обтиснення;} \\ \beta = \frac{b_1}{b_0} - \text{коефіцієнт розширення;} \\ \lambda = \frac{l_1}{l_0} - \text{коефіцієнт витягування.} \end{array} \right. \quad (9.38)$$

З умови сталості обсягу

$$h_0 b_0 l_0 = h_1 b_1 l_1.$$

$$\frac{h_1 b_1 l_1}{h_0 b_0 l_0} = \eta \beta \lambda = 1.$$

Після логарифмування:

$$\ln \eta + \ln \beta + \ln \lambda = 0, \quad (9.39)$$

тобто сума справжніх деформацій дорівнює 0. Отже, справжні деформації не можуть бути одного знака.

Визначимо співвідношення між істинними і відносними деформаціями:

$$\delta_h = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{h_0 + (-\Delta h)}{h_0};$$

$$\begin{cases} \delta_h = \ln(1 + \varepsilon_h); \\ \delta_b = \ln(1 + \varepsilon_b); \\ \delta_l = \ln(1 + \varepsilon_l). \end{cases} \quad (9.40)$$

Розбіжність між істинними і відносними деформаціями при зміні останніх в межах 5...20 % становить 2...10%. Справжні деформації більше відносних. В інженерних розрахунках при відносних деформаціях менше 0,1, можна приймати  $\delta \approx \varepsilon$ . Справжні деформації мають властивість адитивності, тобто їх можна складати при певній сумарній деформації, здійсненої за кілька операцій.

Припустимо  $h_0 - h_1; h_1 - h_2$ ;

$$\delta_{\Sigma} = \ln \frac{h_2}{h_0} = \ln \left( \frac{h_1}{h_0} \frac{h_2}{h_1} \right) = \ln \frac{h_1}{h_0} + \ln \frac{h_2}{h_1} = \delta_I + \delta_{II}.$$

Відносні деформації цієї властивості не мають.

У розрахунках процесів ОМТ вибір характеристики деформації визначається зручностями обчислення і необхідною точністю розрахунку.

## 9.8 Швидкість деформації

Швидкістю деформації називають зміну ступеня деформації в одиницю часу. Так, швидкість деформації при осадці паралелепіпеда:

$$\omega_h = \frac{d\delta_h}{dt} = \frac{\frac{dh}{h}}{dt} = \frac{V}{h} \quad (c^{-1});$$

$$dt = \frac{dh}{V}, \quad (9.41)$$

де  $V$  – швидкість деформування (м/с).

Швидкість деформації залежить від швидкості деформування і розміру тіла в напрямку деформування.

При прокатці  $\omega = 2 \frac{V_y}{h_\gamma}$  (рис. 9.12)

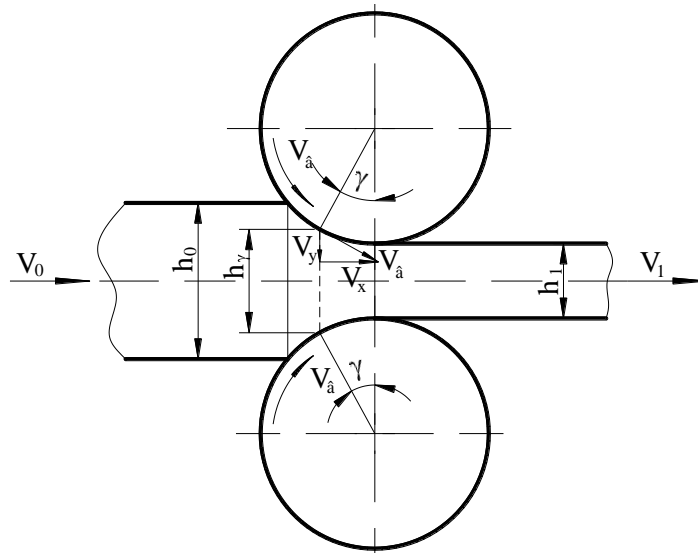


Рисунок 9.12 – Схема до визначення швидкості деформації при прокатці

При незмінній ширині смуги з умови сталості секундних обсягів:

$$\begin{aligned}
 V_0 h_0 &= V_1 h_1 = V_x h_\gamma; \\
 V_x &= \frac{V_1 h_1}{h_\gamma}; \quad V_y = V_x \operatorname{tg} \gamma; \\
 V_y &= \frac{V_1 h_1}{h_x} \operatorname{tg} \gamma; \\
 \omega &= 2 \frac{V_1 h_1}{h_\gamma^2} \operatorname{tg} \gamma; \\
 \omega &\approx \frac{V}{l} \varepsilon.
 \end{aligned} \tag{9.42}$$

### 9.9 Зв'язок між напруженнями і деформаціями

При пружних деформаціях залежності між напруженнями і відповідними деформаціями лінійні:

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_x - \varepsilon_{cp} &= \frac{1}{2G} (\sigma_x - \sigma_{cp}); \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}; \\
 \varepsilon_y - \varepsilon_{cp} &= \frac{1}{2G} (\sigma_y - \sigma_{cp}); \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}; \\
 \varepsilon_z - \varepsilon_{cp} &= \frac{1}{2G} (\sigma_z - \sigma_{cp}); \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}
 \end{aligned} \right\} \tag{9.43}$$

де  $G$  – модуль пружності другого роду (модуль зсуву),  $G = \text{const}$ .

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}; \quad \sigma_{\text{ср}} = P; \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

При пластичній деформації є аналогічні залежності тільки при простому навантаженні тіла, коли зусилля, яке до тіла, зростає пропорційно зміні одного параметра. У цьому випадку напрямки основних осей напруг і деформацій не змінюються протягом процесу деформації.

Наприклад, якщо ці напруги будуть рости пропорційно ( $\sigma_2$  і  $\sigma_3$  пропорційно  $\sigma_1$ ), то брус, деформуючись, залишається брусом, в іншому випадку змінюється його форма (рис.9.13).

Враховуючи, що при пластичній деформації  $\varepsilon_{\text{ср}} = 0$ :

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) = 0,$$

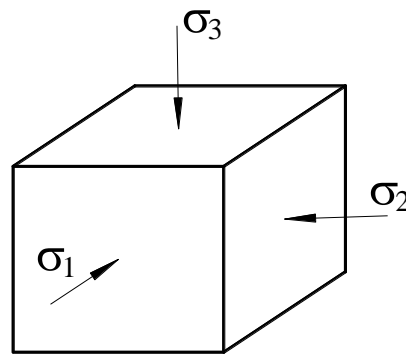


Рисунок 9.13 – Схема до випадку простого навантаження тіла

можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{2G'}(\sigma_x - \sigma_{\text{ср}}); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{2G'}(\sigma_y - \sigma_{\text{ср}}); \quad \varepsilon_z = \frac{1}{2G'}(\sigma_z - \sigma_{\text{ср}}); \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G'}\tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G'}\tau_{yz}; \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G'}\tau_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (9.44)$$

де  $G'$  – модуль пластичності другого роду,  $G'$  – var (залежить від умов деформації і структури металу).

Це ускладнює визначення деформацій по напруженням при пластичній деформації на відміну від пружної.

## 10 ЛЕКЦІЯ 10

### УМОВА РІВНОВАГИ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ І ПЛАСТИЧНІСТЬ

#### 10.1 Умова рівноваги в осередку деформації

У тілі, що знаходиться в напруженому стані, величина напруг змінюється від точки до точки і є безперервною функцією координат. Визначимо умову рівноваги нескінченно малого паралелепіпеда, виділеного в осередку деформації (рис. 10.1).

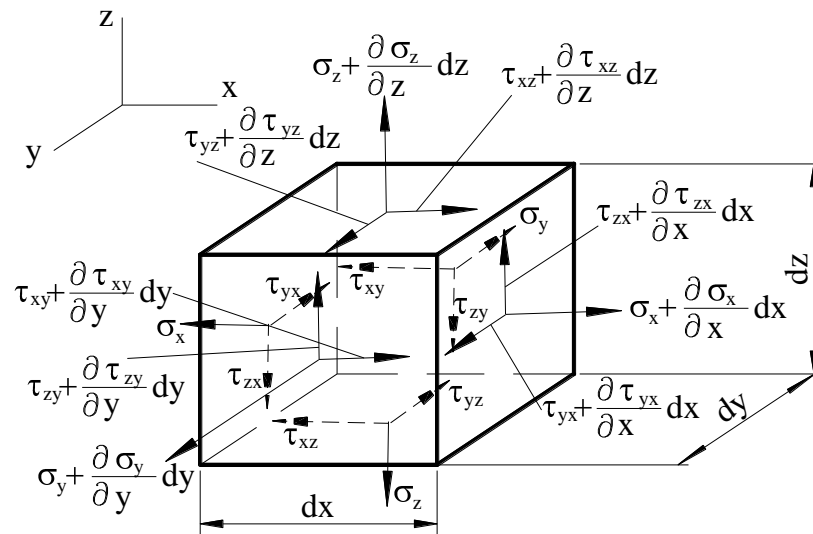


Рисунок 10.1 – Напруги на гранях нескінченно малого паралелепіпеда

$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}, \frac{\partial \sigma_y}{\partial y}, \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$  – інтенсивність зміни  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  відповідно з  $x, y$  і  $z$ .

Сили, що діють на грані паралелепіпеда, дорівнюють добуткам напружень на площі відповідних граней.

Проектуючи сили, що діють на вісь  $x$  і прирівнюючи їх нулю, отримаємо:

$$\left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dydz - \sigma_x dydz + \left( \tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dx dy - \tau_{xz} dx dy +$$

$$+ \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx dz - \tau_{xy} dx dz = 0.$$

Після перетворення, отримуємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (10.1)$$

Ці рівняння називають диференціальними рівняннями рівноваги. Вони описують об'ємну деформацію.

## 10.2 Плоске напружене і плоске деформоване стани металу

При обробці металів тиском, крім об'ємного, може бути плоский напружений стан (наприклад, в деяких випадках листового штампування), коли напруга по одній з осей незначна і їй можна знехтувати (рис.10.2). Деформація при цьому може відбуватися по всіх трьох осях.

$$\sigma_z = 0; \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0; \tau_{zy} = \tau_{yz} = 0.$$

Умови рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (10.2)$$

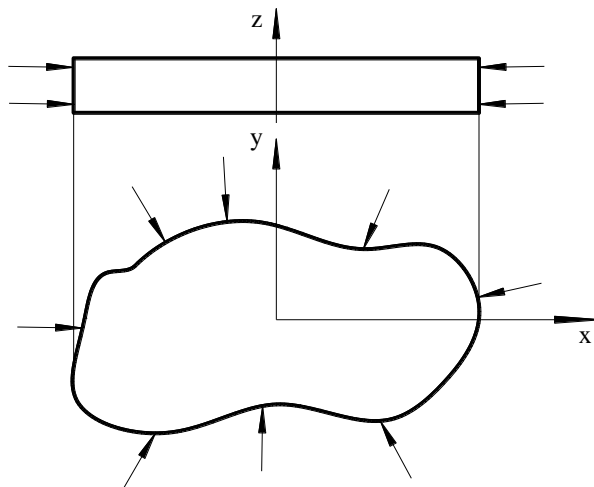


Рисунок 10.2 – Схема до випадку плосконапруженого стану металу

Гідростатичний тиск:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{3}; \\
 \varepsilon_x &= \frac{1}{2G'}(\sigma_x - P) = \frac{1}{6G'}(2\sigma_x - \sigma_y); \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{2G'}(\sigma_y - P) = \frac{1}{6G'}(2\sigma_y - \sigma_x); \\
 \varepsilon_z &= -\frac{1}{2G'}P = -\frac{1}{6G'}(\sigma_x + \sigma_y); \\
 \varepsilon_z &= \varepsilon_x + \varepsilon_y.
 \end{aligned}
 \tag{10.3}$$

У разі такої деформації тензор напружень набуває вигляду:

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix},$$

а еліпсоїд напруг трансформується в еліпс.

У деяких випадках нехтують деформацією по одній з осей при дії напружень по всіх трьох осях. Такий деформований стан називають плоским деформованим станом. Прикладом плоскої деформації є прокатка широких тонких листів (рис. 10.3). Так як відносна деформація в напрямку ширини листа мала (близько 1 %), процес деформації можна розглядати в площині, перпендикулярній осях валків.

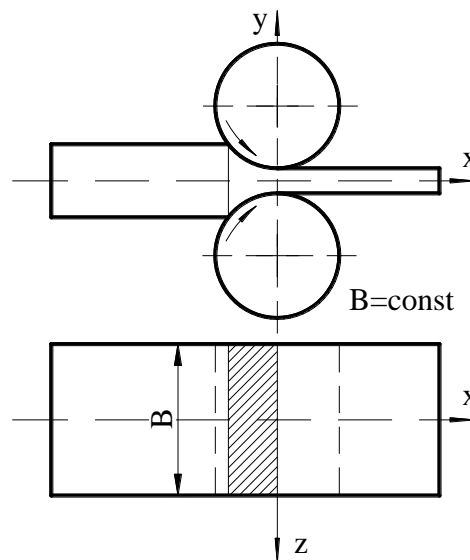


Рисунок 10.3 – Схема до випадку плоскодеформованого стану металу

$$\varepsilon_z = 0.$$

Тоді з умови сталості обсягу

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = 0;$$
$$\varepsilon_z = \frac{1}{2G'}(\sigma_z - P) = 0; \sigma_z - P = 0; \sigma_z = P,$$

але

$$P = \sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3},$$

звідси

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}. \quad (10.4)$$

Отже, при рівності нулю деформації з якої-небудь осі напруга уздовж цієї осі дорівнює напівсумі двох інших напруг. Так як  $\sigma_z$  є постійною величиною, це напруга є однією з головних, а вісь  $Z$  – головним напрямком, отже:

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0.$$

Так як  $\sigma_z = \text{const}$  і  $\tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{zy}$ , умови рівноваги для цього випадку однакові з умовами рівноваги для плоского напруженого стану.

### 10.3 Умова пластичності Тріска-Сен-Венана

При одноосьовому розтягуванні пластична деформація починається тоді, коли нормальна напруга досягає межі текучості, тобто  $\sigma_1 = \sigma_T$ .

В процесі деформації  $\sigma_T$  змінюється. Тому  $\sigma_T$  в теорії пластичності слід відрізнити від порогу текучості, що застосовується в теорії пружності, опору металів. Надалі  $\sigma_T$  будемо називати опором деформації і позначати  $\sigma_\phi$ :

$$\sigma_\phi = \sigma_T n_t n_v n_\varepsilon, \quad (10.5)$$

де  $\sigma_\phi$  – фактичний опір деформації при лінійній деформації з урахуванням впливу температури, швидкості і ступеня деформації.



При об'ємному напруженому стані повинно бути певне співвідношення між опором деформації  $\sigma_\phi$  і головними нормальними напруженнями для того, щоб тіло деформувалося пластично.

На підставі досвідчених даних Тріска встановлено, що для початку пластичної деформації  $\tau_{\max}$  має досягти певної, постійної для даного металу величини.

Сен-Венан на підставі дослідів Тріска запропонував умову пластичності, що складається в тому, що тіло тоді починає деформуватися пластично, коли  $\tau_{\max}$  досягає деякого значення незалежно від схеми напруженого стану

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_\phi}{2}. \quad (10.6)$$

При  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  найбільшу величину має  $\tau_{31}$  і досягнення ним граничного значення  $\tau_{\max}$  визначає початок пластичної деформації

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_\phi. \quad (10.7)$$

Отже, пластична деформація настає тоді, коли максимальна різниця головних нормальних напружень досягне величини опору деформації.

При об'ємному напруженому стані, коли є три головні напруги  $\sigma_1, \sigma_2$  і  $\sigma_3$  умова початку пластичної деформації запишеться у вигляді:

$$\left. \begin{array}{l} |\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_\phi \\ |\sigma_1 - \sigma_3| \leq \sigma_\phi \\ |\sigma_2 - \sigma_3| \leq \sigma_\phi \end{array} \right\} \text{или} \left. \begin{array}{l} |\tau_{12}| \leq \frac{\sigma_\phi}{2} \\ |\tau_{31}| \leq \frac{\sigma_\phi}{2} \\ |\tau_{23}| \leq \frac{\sigma_\phi}{2} \end{array} \right\}. \quad (10.8)$$

Необхідною і достатньою умовою пластичної деформації є досягнення однієї із зазначених трьох різниць головних нормальних напружень величини  $\pm \sigma_\phi$ .

У прямокутній системі координат ці умови можна представити у вигляді простору, обмеженого з площинами, проведеними відповідно до рівнянь:

$$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_\phi}{2}; \tau_{13} = \pm \frac{\sigma_\phi}{2}; \tau_{23} = \pm \frac{\sigma_\phi}{2}, \quad (10.9)$$

які в перетині дають куб з центром, що знаходиться на початку координат і зі стороною  $\sigma_{\phi}$  (рис.10.4).

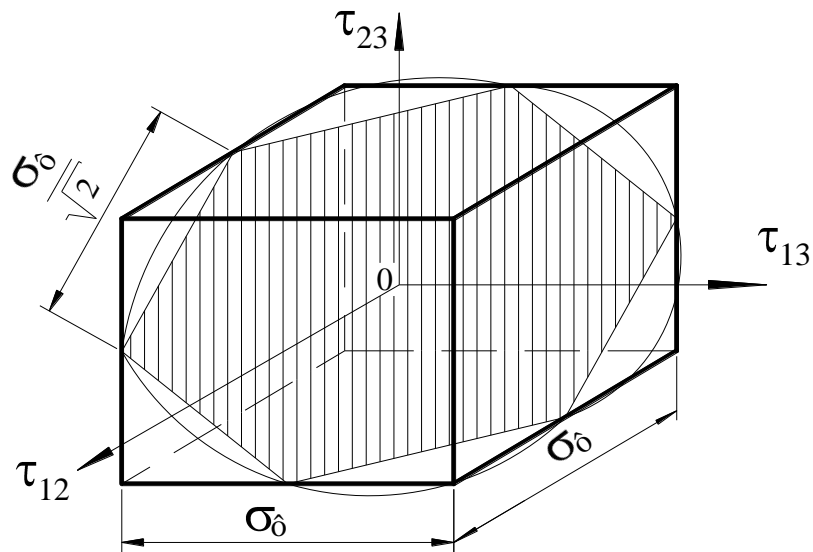


Рисунок 10.4 – Гранична поверхня куба, обмеженого площинами по рівняннях (10.9)

Так як в реальному випадку всі три дотичних напруги одночасно не можуть бути рівні порогу текучості на зсув і

$$\tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{23} = 0, \quad (10.10)$$

то замість граничної поверхні куба, при досягненні якої починалась би пластична деформація виходить граничний замкнутий контур, в результаті перетину куба площиною (10.10). Цей контур представляє собою правильний шестикутник зі стороною, що дорівнює  $\frac{\sigma_{\phi}}{\sqrt{2}}$ .

#### 10.4.Условіє пластичності Губера-Мізеса

Мізес звернув увагу, що в кутових точках шестикутника дві головні дотичні напруги досягають найбільшого значення рівного  $\frac{\sigma_{\phi}}{2}$ , а третє дотичне напруження при цьому дорівнює нулю. Таким чином умова пластичної деформації не враховує впливу третього головного дотичного напруження. У зв'язку з цим він запропонував замінити шестикутник більш простою фігурою – описаним колом. Замість куба тоді повинна бути куля, рівняння якого має вигляд:

$$\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2 = \frac{\sigma_{\phi}^2}{2}; \quad (10.11)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_2 - \sigma_3 = 2\sigma_{\phi}. \quad (10.12)$$

В даний час це рівняння є основним рівнянням пластичності, що показує співвідношення між головними дотичними напруженнями або головними нормальними при пластичній деформації тіла при будь-якому напруженому стані.

### 10.5 Фізична інтерпретація основного рівняння пластичності

Кількість потенційної енергії, що накопичується тілом при пружній деформації, не характеризує початок пластичної деформації.

Наприклад, при всебічному стиску величина цієї енергії може бути досить значною, а тіло при цьому пластично деформуватися не буде (рис. 10.5).

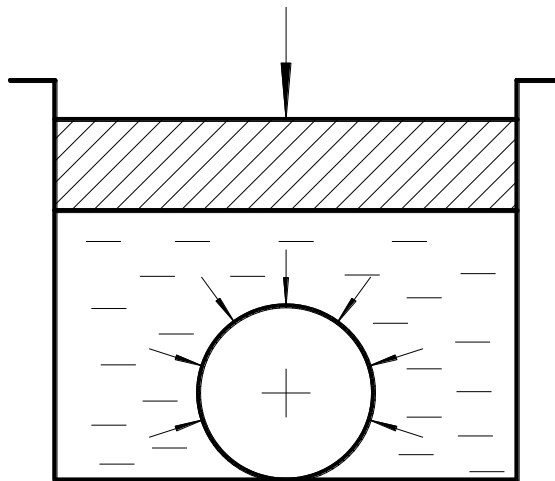


Рисунок 10.5 – Схема всебічного стиснення металевого тіла

Губер запропонував в якості критерія, який визначає співвідношення напруг при пластичній деформації, приймати не повну енергію пружної деформації, а тільки її частину, яка витрачається на зміну форми тіла. Іншу частину потенційної енергії пружної деформації, яка витрачається на зміну обсягу тіла, не слід враховувати.

Таким чином, накопичена тілом потенційна енергія при пружній деформації, спрямована тільки на зміну форми тіла, повинна бути цілком певною величиною, що не залежить від характеру напруженого стану.

Потенційна енергія пружної деформації формозміни:

$$A_{\phi} = A_{\Pi} - A_{об},$$

де  $A_{\Pi}$  – повна потенційна енергія;  
 $A_{об}$  – потенційна енергія, спрямована на зміну обсягу деформованого тіла:

$$dA_{\Pi} = \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z + \tau_{xy} d\gamma_{xy} + \tau_{xz} d\gamma_{xz} + \tau_{yz} d\gamma_{yz}.$$

Підставивши в це рівняння значення пружних деформацій:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] & \gamma_{xz} &= \frac{1}{G} \tau_{xz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} \end{aligned} \right\}$$

отримаємо

$$A_{\Pi} = \frac{1}{2E} \left( \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu (\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z) \right) + \frac{\tau_{xy}^2}{2G} + \frac{\tau_{xz}^2}{2G} + \frac{\tau_{yz}^2}{2G}.$$

Потенційна енергія спрямована на зміну обсягу

$$A_{об} = \frac{P\Delta V}{2},$$

де  $\Delta V$  – зміна обсягу;

$$\Delta V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$$

$$A_{об} = \frac{1-2\mu}{2E} \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2}{3};$$

$$\begin{aligned} A_{\phi} &= \frac{1}{2E} \left( \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu (\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z) \right) + \\ &+ \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) - \frac{1-2\mu}{6E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2; \\ &\frac{1}{2G} = \frac{1+\mu}{E}. \end{aligned}$$

Перетворивши, отримаємо:

$$A_{\phi} = \frac{1+\mu}{8E} \left[ \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right] \quad (10.13)$$

Це значення потенційної енергії пружної деформації формозміни.  
Для лінійної деформації

$$A_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} \sigma_x^2.$$

Пластична деформація почнеться тоді, коли  $\sigma_x = \sigma_{\phi}$ , тоді

$$A_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} \sigma_{\phi}^2. \quad (10.14)$$

Пам'ятаючи те, що величина  $A_{\phi}$  не залежить від напруженого стану, ми можемо прирівняти праві і ліві частини отриманих рівнянь (10.13) і (10.14) і помножити їх на два

$$2\sigma_{\phi}^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2). \quad (10.15)$$

У головних напружених (рівняння Губера-Мізеса)

$$2\sigma_{\phi}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2.$$

## 10.6 Порівняння рівнянь пластичності Тріска-Сен-Венана і Губера-Мізеса

$$1) 2\sigma_{\phi}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2.$$

$$2) \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\phi}.$$

а) припустимо  $\sigma_2 = \sigma_1$

$$2\sigma_{\phi}^2 = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\phi}.$$

б) припустимо  $\sigma_2 = \sigma_3$

$$2\sigma_{\phi}^2 = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_\phi.$$

в) припустимо  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$

$$2\sigma_\phi^2 = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma_3\right)^2;$$

$$2\sigma_\phi^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \frac{3}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)^2;$$

$$4\sigma_\phi^2 = 3(\sigma_1 - \sigma_3)^2;$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\phi;$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1,15\sigma_\phi. \quad (10.16)$$

Максимальна різниця в результатах обчислень за формулами (10.7) і (10.12) – 15 %:

$$1,15\sigma_\phi = 2K; \quad (10.17)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K. \quad (10.18)$$

### 10.7 Рівняння пластичності для двомірної деформації

При прокатці широких смуг деформація по одній з осей відсутня (рис. 10.6)

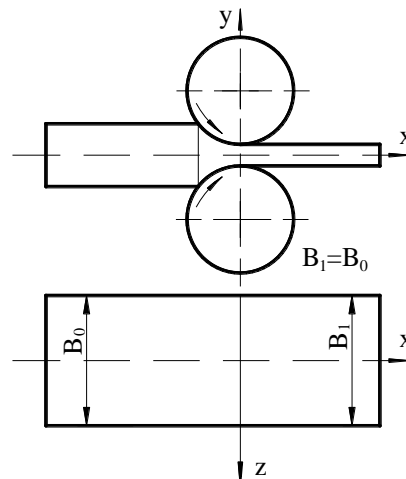


Рисунок 10.6 – Схема прокатки широких смуг

$$\begin{aligned}
2\sigma_{\phi}^2 &= (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2); \\
\tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0; \\
\sigma_z &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}; \\
2\sigma_{\phi}^2 &= (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \left(\sigma_x - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 - 6\tau_{xy}^2; \\
2\sigma_{\phi}^2 &= (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{4}(\sigma_y - \sigma_x)^2 - 6\tau_{xy}^2; \\
2\sigma_{\phi}^2 &= \frac{3}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{xy}^2; \\
4\sigma_{\phi}^2 &= 3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 12\tau_{xy}^2; \\
(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= \frac{4}{3}\sigma_{\phi}^2; \\
\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{\phi} &= 2K; \\
(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= 4K^2; \\
\sigma_1 - \sigma_3 &= 2K.
\end{aligned}$$

Отримуємо рівняння пластичності для двомірної деформації:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4K^2, \quad (10.19)$$

яке в головних напруженнях має вигляд:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K.$$

# 11 ЛЕКЦІЯ 11

## АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНИХ НАПРУГ ПРИ ОМТ. СПРОЩЕНІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ СПІЛЬНО З РІВНЯННЯМИ ПЛАСТИЧНОСТІ

### 11.1 Загальні відомості

При розробці технологічних процесів ОМТ і проектуванні обладнання необхідно знати силу, яку потрібно прикласти до тіла, яке деформується, для подолання опору деформації і тертя на поверхні металу з інструментом. Повна сила визначає характеристику потрібного обладнання – силу преса, потужність двигуна при прокатці і т.п. У ряді випадків поряд з повною силою необхідно знати розподіл напружень по контактній поверхні. Так, крутний момент і потужність двигуна при прокатці залежать від повного тиску металу на валки і відстані від центру валка до повної сили. Ця відстань (плече рівнодіючої) залежить від розподілу нормальних напружень та напружень тертя на контактній поверхні.

В даний час точних рішень задач об'ємної деформації не отримано. При наближеному вирішенні завдань об'ємної деформації застосовують варіаційні методи, метод робіт.

Метод робіт заснований на положенні, що при пластичної деформації робота зовнішніх сил дорівнює сумі робіт внутрішніх опорів. Робота зовнішніх сил дорівнює різниці робіт активних сил, що розвиваються машиною, і сил зовнішнього тертя:

$$A_{\text{в}} = A_{\text{а}} - A_{\text{тр}} = A_{\text{д}}.$$

Варіаційні методи визначення зусиль і деформацій, як і метод робіт, заснований на енергетичному принципі. Основне положення методу звучить так: «Сума робіт всіх зовнішніх і внутрішніх сил на можливих переміщеннях близько стану рівноваги дорівнюють нулю».

При вирішенні більшості завдань доводиться застосовувати ряд припущень, які зводять тривимірну задачу до двомірної або одновимірної.

Так, наприклад, для плоского напруженого і плоского деформованого станів маємо два рівняння рівноваги і одне рівняння пластичності. Всього три рівняння з трьома невідомими:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \\ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4K^2. \end{array} \right. \quad (11.1)$$

Нижче розглянемо методи вирішення цієї системи.

## 11.2 Метод Сен-Венана

Маємо  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  – функції, що залежать від координати  $(xy)$ .

Сен-Венан запропонував замінити  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  через функції  $F = F(xy)$  таким чином, щоб задовольнялася умова рівноваги:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial^3 F}{\partial x \partial y^2} - \frac{\partial^3 F}{\partial x \partial y^2} &= 0; \\ -\frac{\partial^3 F}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 F}{\partial x^2 \partial y} &= 0; \\ \left( \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right) + 4 \left( -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \right)^2 &= 4K^2. \end{aligned}$$

Замість трьох рівнянь ми отримали одне з одним невідомим. Метод розвитку не отримав у зв'язку зі складністю рішення.

## 11.3 Метод Леві (метод ліній ковзання)

При розтягуванні циліндричного зразка на його поверхні виявляється сітка ліній, що перетинаються під прямим кутом один з одним і нахилених під кутом  $45^\circ$  до осі зразка. Ці лінії (їх називають лініями ковзання або лініями Чернова-Людерса) є слідами перетину поверхні зразка площинами максимальних дотичних напружень. Дослідження показали, що лінії ковзання збігаються з траєкторіями найбільших дотичних напружень.

Леві встановив зв'язок між максимальними дотичними напругами і положенням майданчиків, в яких вони діють (рис. 11.1).

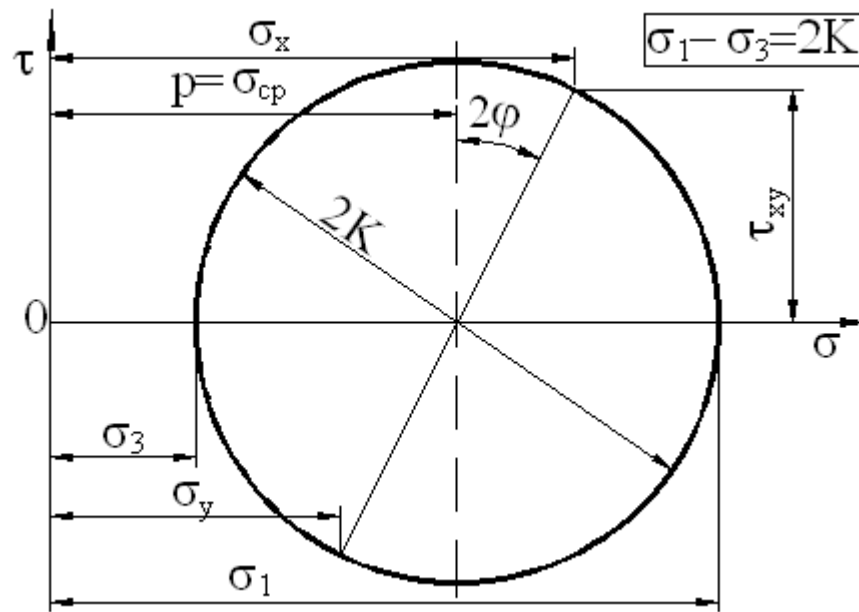


Рисунок 11.1 – Схема до вирішення Леві

$$\begin{cases} \sigma_x = P + K \sin 2\varphi; \\ \sigma_y = P - K \sin 2\varphi; \\ \tau_{xy} = -K \cos 2\varphi; \\ 2K = 1,15\sigma_\phi. \end{cases} \quad (11.1)$$

де  $p$  – гідростатичний тиск;

$\varphi$  – кут між напрямком осі  $X$  і майданчиком, де діє максимальне дотичне напруження.

Вираз (11.1) тотожно задовольняють рівнянню пластичності:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4K^2.$$

При плоскій пластичній деформації

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_\phi}{2}; \quad \tau_{\max} = K.$$

Підставляємо ці вирази в рівняння рівноваги.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} + 2K \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x};$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= \frac{\partial P}{\partial y} - 2K \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \\
\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 2K \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \\
\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} &= 2K \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \\
\frac{\partial P}{\partial x} + 2K \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + 2K \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} &= 0; \\
\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + 2K(\cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}) &= 0; \\ \frac{\partial P}{\partial y} + 2K(\sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}) &= 0. \end{aligned} \right. & \quad (11.2)
\end{aligned}$$

Ці рівняння визначають в системі координат  $x$  і  $y$  значення кута  $\varphi$ , тобто напрямки найбільших дотичних напружень. Рівняння містять два невідомі  $P$  і  $\varphi$ . Рішення цих рівнянь принципово можливо, однак таке рішення утруднено через частинних похідних. Найбільш простіше ці рівняння вирішувати графічно, будуючи сітку ліній ковзання з використанням властивостей ліній ковзання.

#### 11.4 Метод характеристик

У загальному випадку рівняння (11.2) Леві вирішують методом відшукування характеристик. Виключимо з цих рівнянь  $P$ , для чого продиференціюємо перше рівняння по  $Y$ , а друге – по  $X$  і віднімемо з першого рівняння друге.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + 2K[-2 \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \cos 2\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} + 2 \cos 2\varphi (\frac{\partial \varphi}{\partial y})^2 + \sin 2\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}] - \\
- \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} - 2K[2 \cos 2\varphi (\frac{\partial \varphi}{\partial x})^2 + \sin 2\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2 \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \cos 2\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}] = 0.
\end{aligned}$$

Після перетворень

$$-\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + 2 \operatorname{ctg} 2\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} - 4 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + 2 \operatorname{ctg} 2\varphi [(\frac{\partial \varphi}{\partial y})^2 - (\frac{\partial \varphi}{\partial x})^2] = 0.$$

Це квазілінійне диференціальне рівняння в частинних похідних другого порядку.

Знаходячи характеристичне рівняння отриманого рівняння і вирішуюя його відносно  $dy/dx$ , отримаємо два диференціальних рівняння характеристик основного рівняння.

$$\frac{dy}{dx} = tq\varphi; \quad \frac{dy}{dx} = -ctq\varphi. \quad (11.3)$$

Характеристики збігаються з лініями ковзання і володіють усіма їх властивостями.

### 11.5 Спосіб Прандтля

Їм вирішена задача по стисненню пластичної маси між двома паралельними шорсткими плитами (рис. 11.2).

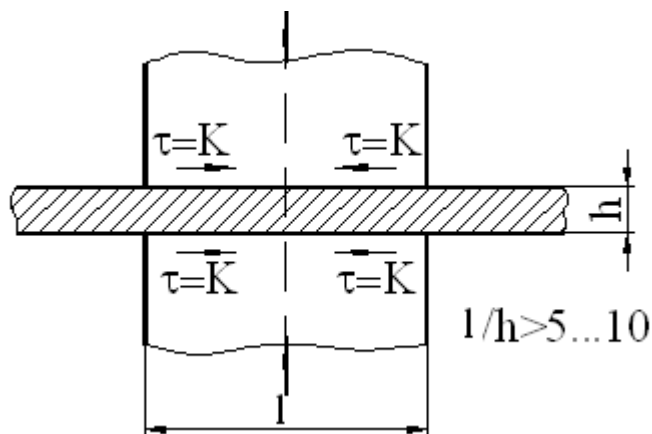


Рисунок 11.2 – Схема до вирішення Прандтля

Продиференціюємо перше рівняння рівноваги (11.1) по  $Y$ , а друге по  $X$ :

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 \tau_{yx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y \partial x} = 0.$$

Віднімемо від першого рівняння друге

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\sigma_x - \sigma_y) &= \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2}; \\
(\sigma_x - \sigma_y)^2 &= 4\tau_{xy}^2 = 4K^2; \\
\sigma_x - \sigma_y &\pm 2K \sqrt{1 - \frac{\tau_{xy}^2}{K^2}}; \\
\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\pm 2K \sqrt{1 - \frac{\tau_{xy}^2}{K^2}}) &= \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2}.
\end{aligned} \tag{11.4}$$

## 11.6 Інженерний метод

Метод заснований на наступних положеннях:

- а) напружено-деформований стан розглядається або вісесиметричним, або плоским;
- б) диференціальне рівняння рівноваги для плоскої задачі спрощується прийняттям припущень, що нормальні напруги залежать тільки від однієї координати (двовірна задача зводиться до одновимірної);
- в) приймається спрощене рівняння пластичності:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K.$$

## 11.7 Спрощене диференціальне рівняння рівноваги і його рішення спільно з рівнянням пластичності

Метод заснований на припущенні про рівномірний розподіл тисків і швидкостей по висоті осередку деформації (рис. 11.3).

Нехай ширина смуги  $B = 1$ , тоді умова рівноваги має вигляд:

$$\begin{aligned}
\sigma_x h + 2\tau dx - (\sigma_x + d\sigma_x)h &= 0; \\
2\tau dx - d\sigma_x h &= 0; \\
d\sigma_x &= 2\tau \frac{dx}{h}; \\
(\sigma_y + \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= 4K^2.
\end{aligned}$$

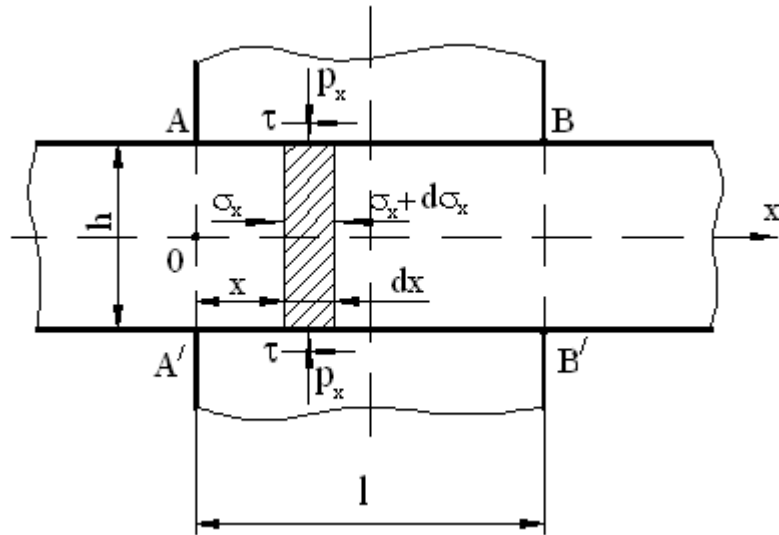


Рисунок 11.3 – Схема до вирішення завдання осаджування смуги інженерним методом

Різниця нормальних напружень залежить від дотичного напруження. Приймаємо, що головні осі відповідають вертикальним і горизонтальним осям.

Тоді:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &\cong 0; \sigma_y - \sigma_x = 2K; \sigma_y = P_x; \\ P_x - \sigma_x &= 2K; dP_x = d\sigma_x; 2K = \text{const}; \\ dP_x &= 2\tau \frac{dx}{h}. \end{aligned}$$

Вважаємо, що

$$\begin{aligned} \tau &= \mu P_x; dP_x = 2\mu P_x \frac{dx}{h}; \\ \frac{dP_x}{P_x} &= 2\frac{\mu}{h} dx; \int \frac{dP_x}{P_x} = 2\frac{\mu}{h} \int dx; \\ \ln P_x &= \frac{2\mu}{h} x + \ln c. \end{aligned}$$

Постійну інтегрування  $\ln c$  знаходимо з граничних умов. При  $X = 0$   $\sigma_x = 0$ . Тоді з умови пластичності  $P_x = 2K$ .

$$\begin{aligned} P_A &= 2K; \\ \ln 2K &= \frac{2\mu}{h} x + \ln c; \\ \ln c &= \ln 2K; \end{aligned}$$

$$\ln P_x = \frac{2\mu}{h} x + \ln 2K;$$

$$\ln \frac{P_x}{2K} = \frac{2\mu}{h} x;$$

$$\frac{P_x}{2K} = e^{\frac{2\mu}{h} x};$$

$$P_x = 2K e^{\frac{2\mu}{h} x}. \quad (11.5)$$

Використовуючи вираз (11.5), побудуємо епюру нормальних напружень (рис. 11.4, а).

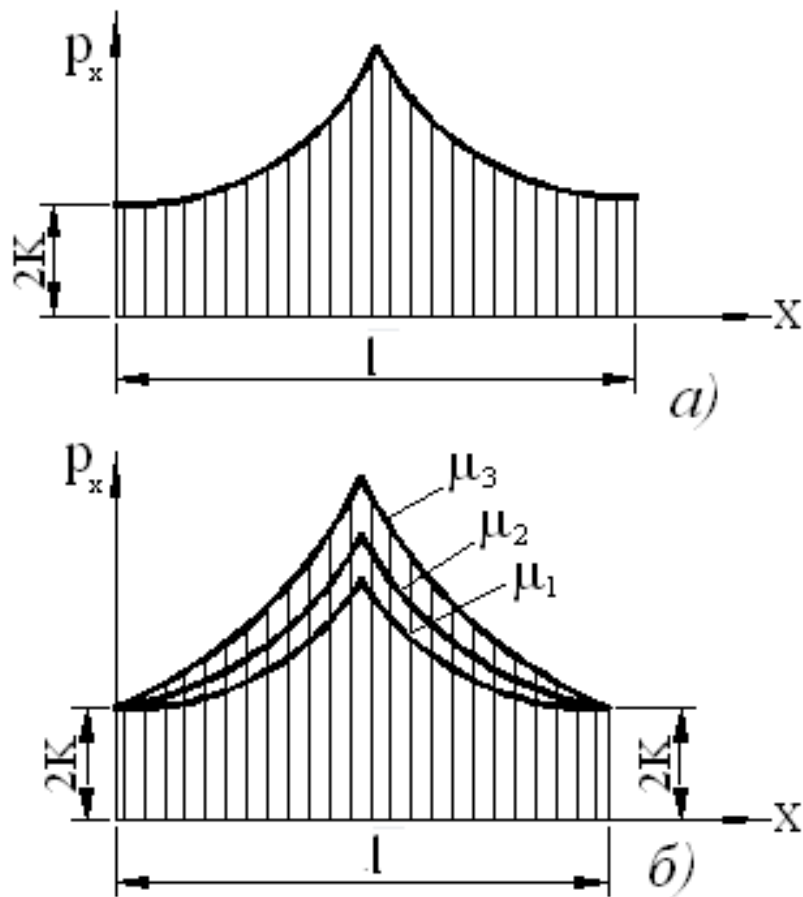


Рисунок 11.4 – Епюри нормальних напружень при осадці смуги (а), в тому числі для різних умов тертя (б)

З ростом коефіцієнта тертя нормальні напруги зростають (див. рис. 11.4, б).

Визначимо силу осаджування:

$$\begin{aligned}
P &= 2b \int_0^{1/2} P_x dx = 2b \int_0^{1/2} 2K e^{\frac{2\mu}{h}x} dx = 2b2K \int_0^{1/2} \frac{h}{2\mu} e^{\frac{2\mu}{h}x} dx = \\
&= 2b2K \frac{h}{2\mu} e^{\frac{2\mu}{h}x} \Big|_0^{1/2} = 2b2K \frac{h}{2\mu} (e^{\frac{\mu l}{h}} - 1).
\end{aligned}$$

З урахуванням того, що середнє значення нормальних контактних напружень рівняється:

$$P_{cp} = \frac{P}{bl},$$

визначимо коефіцієнт напруженого стану металу при осадці:

$$\frac{P_{cp}}{2K} = n_{\sigma}; \quad (11.6)$$

$$n_{\sigma} = \frac{h}{\mu l} (e^{\frac{\mu l}{h}} - 1). \quad (11.7)$$

Цей метод дає хороші результати, коли  $\frac{l}{h_{cp}} > 1$ . При  $\frac{l}{h_{cp}} < 1$  велика похибка.



## 2 ЛЕКЦІЯ 12

### ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ГІПОТЕЗИ ТЕОРІЇ ПРОКАТКИ

Сутність процесу прокатки полягає в тому, що заготовка або злиток внаслідок дії сил тертя втягується обертовими валками в зазор між ними і обтискається. Розрізняють три види прокатки: поздовжню, поперечну і косу (поперечно-гвинтову).

При поздовжньої прокатці заготовка втягується в зазор між валками, що обертаються в різні боки, обтискається по висоті і збільшується по довжині і ширині. При цьому перетин заготовки приймає форму зазору (калібру) між валками.

#### 12.1 Умова захоплення смуги валками

Для втягування заготовки валками необхідно щоб між ними і заготовкою діяли сили тертя достатньої величини. Розглянемо умови, при яких валки стану зможуть захопити смугу і забезпечити її рух (рис. 12.1). Для випадку симетричної прокатки валки надаватимуть на смугу дію у вигляді двох сил  $N$ , спрямованих нормально до поверхні валків і двох сил тертя  $T$ , спрямованих дотично.

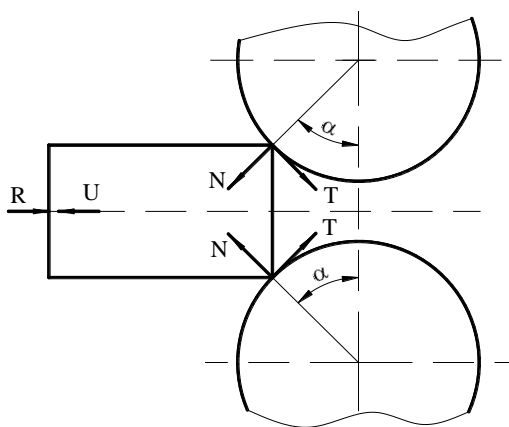


Рисунок 12.1 – Схема сил в момент захоплення металу валками

З умови рівноваги смуги, що прокатується, отримуємо:

$$2T \cos \alpha - 2N \sin \alpha + R - U = 0$$

або

$$T \cos \alpha - N \sin \alpha + \frac{R - U}{2} = 0,$$

де  $\alpha$  – кут захоплення;

$R$  – можлива зовнішня сили, заштовхують смугу в зазор між валками;  
 $U$  – сила інерції.

Знаходимо:

$$T = Ntq\alpha + \frac{U - R}{2\cos\alpha}.$$

Так як  $T$  не може бути більше множення сили  $N$  на коефіцієнт тертя, тобто

$$T \leq N\mu$$

Отримуємо умову захоплення

$$\mu \geq tq\alpha + \frac{U - R}{2N\cos\alpha}. \quad (12.1)$$

Якщо сила  $R$  відсутня, а силою  $U$  знехтувати, то

$$\mu \geq tq\alpha. \quad (12.2)$$

Або, висловлюючи  $\mu$  через кут тертя  $\varphi$ , отримаємо

$$\begin{aligned} tq\varphi &\geq tq\alpha; \\ \varphi &\geq \alpha. \end{aligned} \quad (12.3)$$

Це означає, що захоплення смуги відбудеться тоді, коли кут тертя дорівнює або більше кута захоплення.

У зв'язку з цим допустимий кут захоплення визначається станом контактних поверхонь металу і валків і умовами їхнього зіткнення.

## 12.2 Роль тертя при обробці металів тиском

Зовнішнім тертям називається таке явище, коли при переміщенні одного тіла по поверхні іншого виникає опір. Для подолання цього опору необхідна певна сила, яка називається силою тертя.

Для обробки металів тиском характерно тертя ковзання. Треба відзначити, що в нашому випадку тертя ковзання значно відрізняється від тертя ковзання в вузлах машин не тільки кількісно, але і якісно.

При ОМТ на поверхні тертя діють високі тиски (до  $2500 \text{ Н/мм}^2$ ) в той час, як в вузлах машин тиск не вище  $10\text{...}50 \text{ Н/мм}^2$ .

При ОМТ відбувається значне оновлення поверхні контакту інструменту з металом, що деформується в зв'язку із загальним збільшенням поверхні

останнього. У підшипниках спостерігається незначне оновлення поверхні контакту, що відбувається тільки в результаті зносу.

Зсув частинок металу по контактній поверхні деталей, що труться в машинах однаково в усіх точках контакту, а при ОМТ величина і швидкість зсуву різні для різних точок контакту. Так, при осіданні циліндричного зразка в центрі контактної поверхні зміщення деформованого металу щодо інструменту відсутня. У деяких випадках ковзання відсутнє по всій поверхні контакту і деформація здійснюється зміщенням частинок в обсязі тіла.

При гарячій обробці металів тиском на умови тертя впливає окалина, властивості якої залежать від хімічного складу деформованого металу і температури.

Для здійснення деформації металу при наявності тертя необхідно докласти зусилля більше необхідного природньою міцністю металу в даних умовах, тобто опором деформації. Чим більше тертя, тим більше потрібно зусилля для деформації і тим більше витрата енергії на деформацію.

Тертя є однією з причин нерівномірності деформації. У частинах тіла, що деформується, розташованих поблизу поверхні тертя, дія сил тертя, що утворюють деформацію більше, ніж в частинах тіла, віддалених від контакту з інструментом.

Тертя призводить до зносу і нерівномірним відпрацюванням інструменту, тобто псування його поверхні. Таким чином тертя при обробці металів є небажаним. Для зниження тертя зазвичай застосовують різні способи. У деяких випадках ОМТ тертя бажано.

### 12.3 Осередок деформації і його параметри

При поздовжньої прокатці пластичної деформації одночасно піддається не весь обсяг металу, а тільки його невелика частина, що знаходиться поблизу валків. Цю частину називають осередком деформації (рис. 12.2).

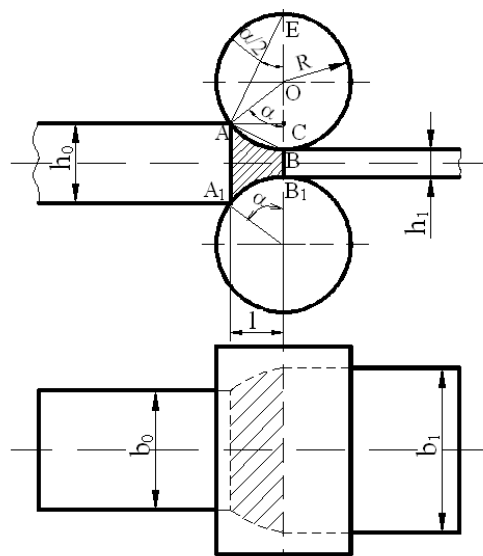


Рисунок 12.2 – Схема осередку деформації при прокатці

В основному осередок деформації складається з обсягу металу, укладеного між валками і відповідного обсягу  $AA_1BB_1$ . Однак експериментальними дослідженнями встановлено, що пластична деформація поширюється також і на відносно невеликі зони, прилеглі до цього обсягу, які називаються зовнішніми або внеконтактними зонами.

У зв'язку з цим обсяг  $AA_1BB_1$  називають геометричним осередком деформації. Форму геометричного осередку деформації характеризують кутом контакту, висотою перерізу  $h_0$  і  $h_1$  входу в валки і виходу з них, довжиною  $l$ , початкової  $v_0$  і кінцевої  $v_1$  шириною.

Кут контакту  $\alpha$  :

$$\cos \alpha = \left( R - \frac{\Delta h}{2} \right) \frac{1}{R},$$

де  $\Delta h$  – абсолютне обтиснення.

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{2R}. \quad (12.4)$$

Величину  $l$  можна визначити за значенням кута захоплення

$$l = R \sin \alpha \quad (12.5)$$

або з трикутника  $ABC$

$$l = AC = \sqrt{AB^2 - BC^2},$$

де  $BC = \frac{\Delta h}{2}$ .

Трикутник  $ABC$  подібний трикутнику  $ABE$ :

$$\begin{aligned} \frac{AB}{BE} &= \frac{BC}{AB}, \\ AB^2 &= BE \cdot BC = 2R \frac{\Delta h}{2}, \\ AB &= \sqrt{R\Delta h}. \end{aligned}$$

Тоді

$$l = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}.$$

Оскільки другий член отриманого виразу дуже малий у порівнянні з першим, то з достатньою точністю можна записати:

$$l \approx \sqrt{R\Delta h}; \quad (12.6)$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{AB}{BE} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{2R};$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}. \quad (12.7)$$

В результаті тиску метала на валки в останніх виникають місцеві пружні деформації стиснення. При холодній прокатці металів пружна деформація стиснення внаслідок високого питомого тиску може бути настільки значною, що помітно збільшує довжину дуги захоплення (на 20...50 %). Це явище має особливо велике значення при холодній прокатці тонких листів і стрічок з малими кутами захоплення.

В цьому випадку наведені формули для розрахунку довжини осередку деформації, які виведені для ідеального (недеформованого) валка стають вже непридатними.

В цьому випадку:

$$l \approx \sqrt{R\Delta h + x_2^2} + x_2, \quad (12.8)$$

$$\text{де } x_2 = \frac{8(1-m^2)}{\pi E} R p \quad \text{при } \frac{1-m^2}{\pi E} = k; \quad x_2 = 8kRp,$$

Тут

$m$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу валків;

$E$  – модуль пружності валків;

$R$  – радіус валків;

$p$  – питомий тиск металу на валки.

Для сталевих валків

$$x_2 = \frac{pR}{95000} \quad (\text{мм}) \quad \text{для } p \text{ в Н/мм}^2.$$

За формулою А. А. Дінніка

$$x_2 = \sqrt[3]{2(4pkR)^2 l}.$$

## 12.4 Нейтральний кут, нейтральний перетин

Після входу смуги в валки і утворення нормального осередку деформації умови руху її істотно змінюються. Нормальні і дотичні сили в цьому випадку діють на метал, який прокатується, по всій дузі захоплення (рис. 12.3). При цьому з огляду на прагнення металу деформуватися в напрямку найменшого опору контактні сили тертя діють на метал в сторону його руху не по всій ду-

зі контакту. В кінці дуги контакту ці сили змінюють напрямок дії на протилежне. Вертикальний перетин, в якому контактні сили тертя змінюють напрямок, називають нейтральним, а кут між радіусом, проведеним в точку перетину нейтрального перетину з дугою контакту і лінією, що з'єднує центри валків називають нейтральним кутом  $\psi$ .

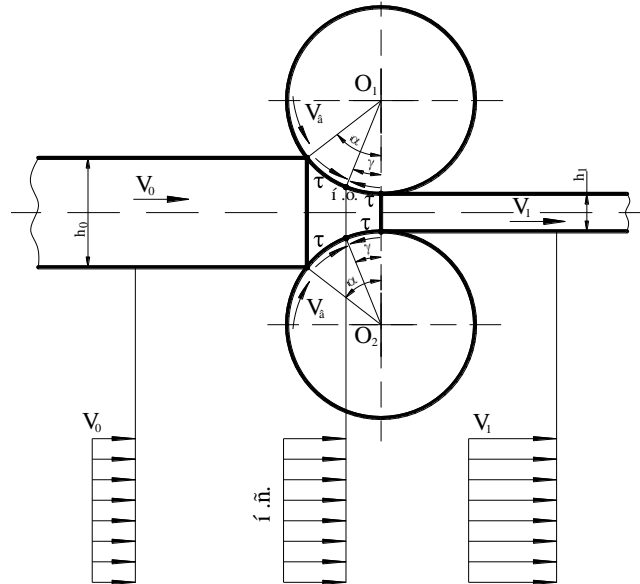


Рисунок 12.3 – Схема до опису кінематики течії металу в осередку деформації при прокатці

Інтервал між  $\gamma$  і  $\alpha$  (I) називають зоною відставання. Тут

$$V_B \cos \varphi > V_{\text{ср}x}, \text{ (рис. 12.4)}$$

де  $\varphi$  – поточний кут.

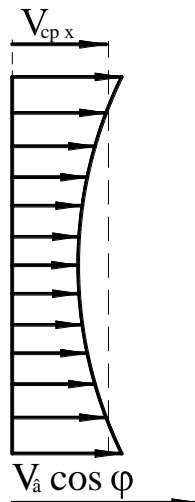
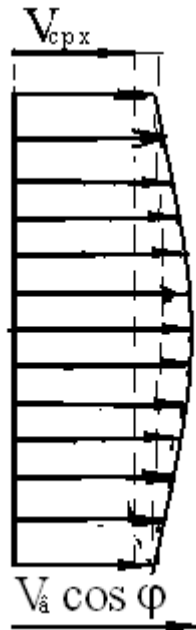


Рисунок 12.4 – Етюра швидкостей металу в зоні відставання

Інтервал між  $\gamma$  і  $O$  (II) називають зоною випередження. Тут

$$V_B \cos \varphi < V_{срх} \cdot \text{(рис. 12.5)}$$



*Рисунок 12.5 – Етюра швидкостей металу в зоні випередження*

У нейтральному перетині, коли  $\varphi = \gamma$ :

$$V_B \cos \gamma = V_{ср\gamma} \cdot \text{(див. рис. 12.3)}$$

## 12.5 Випадки прокатки

Процес поздовжньої прокатки можна розбити на кілька випадків по відношенню  $l/h_{ср}$ . Як відомо поєднання трьох параметрів осередку деформації  $l/h_{ср}$ ,  $\alpha$  і  $v_0/h_0$  або  $v_0/l$ , визначають напружено-деформований стан і кінематику течії металу в осередку деформації.

### 12.5.1 $l/h_{ср} < 0,2 \dots 0,5$ (випадок прокатки високих штаб)

Цей випадок прокатки характерний для перших пропусків на обтискних станах, слябінгах і блюмінгах. Характерною особливістю є те, що пластична деформація не проникає на всю висоту осередку деформації, метал тече не в довжину, а в ширину (рис. 12.6).

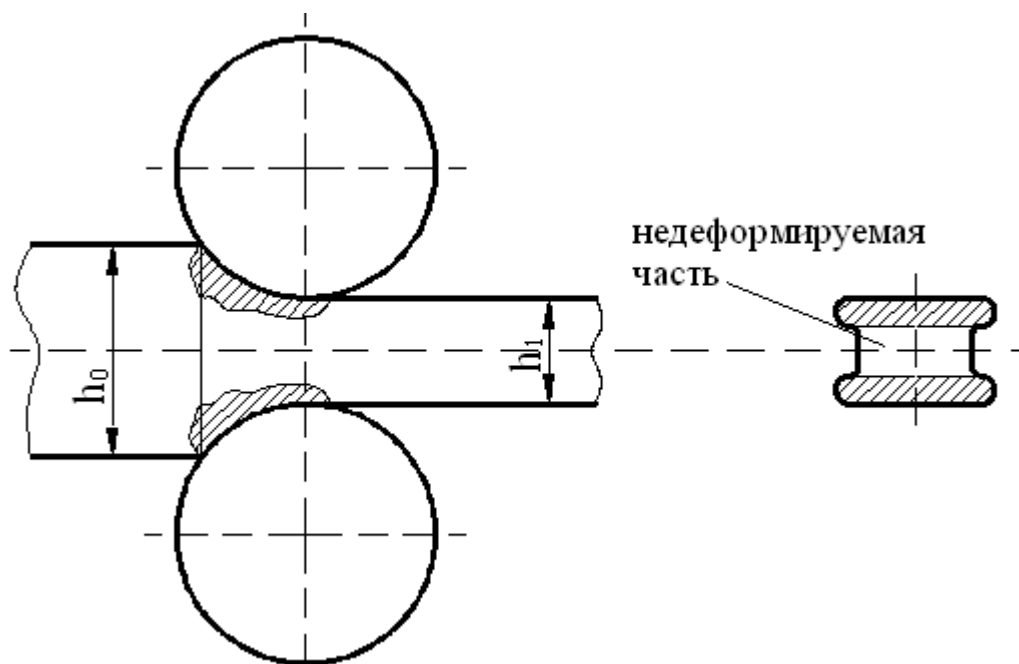


Рисунок 12.6 – Випадок прокатки високих штаб

Прагнення металу до ковзання по контактній поверхні дуже невелика. Має місце область прилипання (тобто певний обсяг металу рухається зі швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості валків) (рис. 12.7).

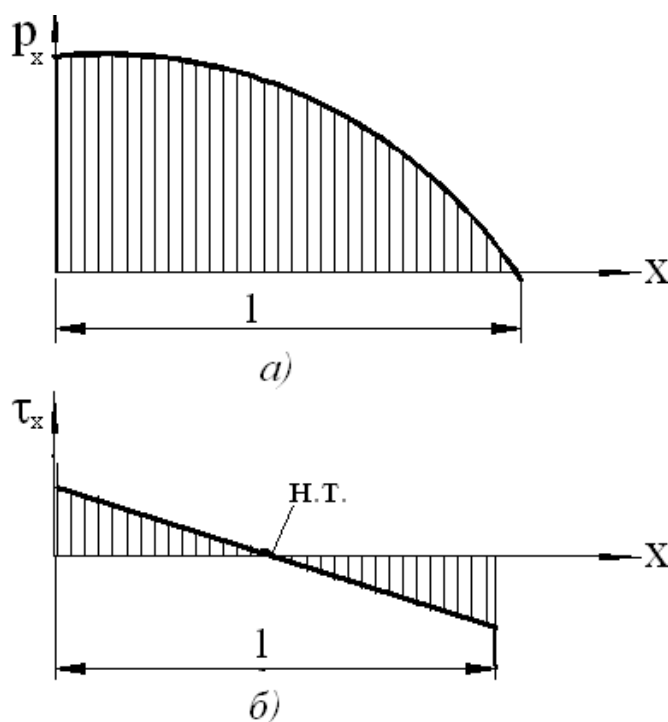


Рисунок 12.7 – Епюри нормальних (а) і дотичних (б) контактних напружень при прокатці високих смуг



### 12.5.2 $0,2 < 1/h_{cp} < 2$ (випадок прокатки товстих смуг)

Пластична деформація проникає на всю висоту осередку деформації. Має місце зона прилипання. З ростом  $1/h_{cp}$  виникає опуклість в середній частині епюри. При  $1/h_{cp} = 2$  на контактній поверхні можуть з'явитися зони ковзання (рис. 12.8).

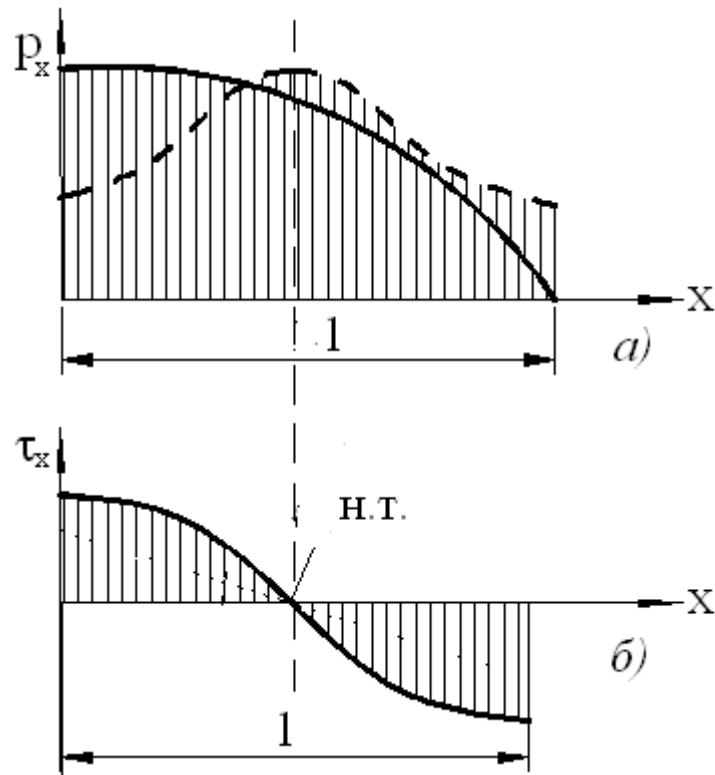


Рисунок 12.8 – Епюри нормальних (а) і дотичних (б) контактних напружень при прокатці товстих смуг

### 12.5.3 $1/h_{cp} = 2...5$ (випадок прокатки середніх по товщині смуг)

Поряд із зоною прилипання на контактній поверхні є зона ковзання на вході металу в осередок деформації і на виході з нього. Дотичні напруження зростають в порівнянні з першим випадком (рис. 12.9).

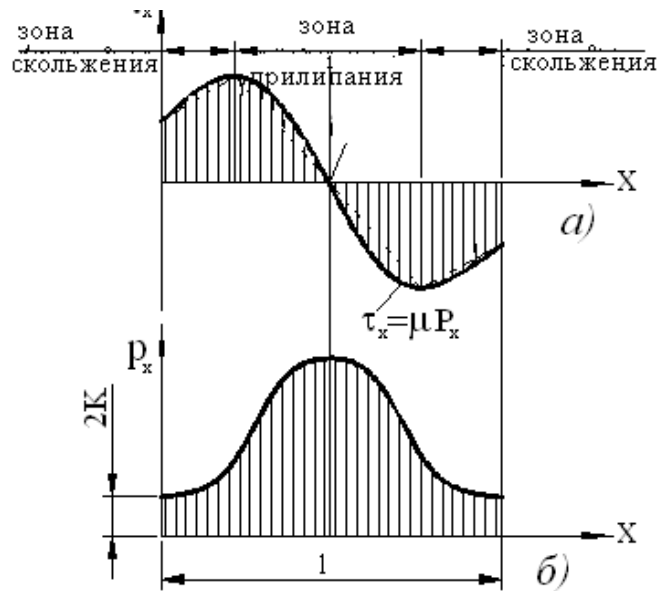
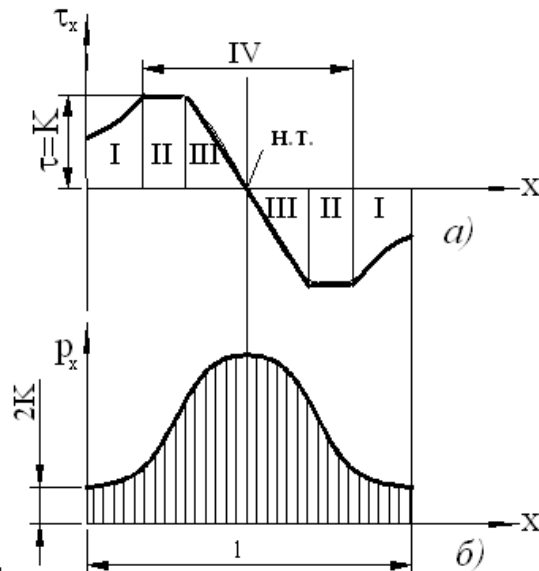


Рисунок 12.9 – Епюри дотичних (а) і нормальних (б) контактних напружень при прокатці середніх по товщині смуг

#### 12.5.4 $l/h_{cp} > 5$ (випадок прокатки тонких смуг)

Цей випадок прокатки характерний для холодної прокатки смуг і прокатки в чистових групах клітей широкосмугових станів гарячої прокатки (рис. 12.10).



*I* – зона сухого тертя  $\tau = \mu P_x$ ; *II* –  $\tau_{max} = K$ ; *III* – зона загальмованої деформації; *IV* – зона прилипания

Рисунок 12.10 – Епюри дотичних (а) і нормальних (б) контактних напружень при прокатці тонких смуг

При математичному описі процесу прокатки з метою визначення силових і швидкісних його параметрів важливо знати розподіл напружень, деформацій і швидкостей по висоті осередку деформації. Теоретичними і експериментальними дослідженнями було виявлено, що напруги, деформації і швидкості по висоті осередку деформації розподіляються нерівномірно.

При  $1/h_{cp} > 5$  цій нерівномірності можна знехтувати (справедлива гіпотеза «плоских перетинів»).

При  $1/h_{cp} < 1$  нерівномірність дуже велика (можна помилитися в 2,5 рази, а то й враховувати нерівномірність напружень, швидкостей і деформацій по висоті перерізу).

## 13 ЛЕКЦІЯ 13

### СИЛА ДЕФОРМАЦІЇ. КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ ТОНКИХ СМУГ І ФАКТОРИ, ЩО ЇХ ВИЗНАЧАЮТЬ

#### 13.1 Диференціальне рівняння контактних напружень

Нерівномірний розподіл напружень, швидкостей і деформацій має місце при будь-якому випадку прокатки. Однак ступінь нерівномірності при прокатці тонких смуг з мастилом, коли  $l/h_{cp} > 5$ , невелика і нею можна знехтувати.

Вперше рішення в загальному вигляді за визначенням сили прокатки було отримано Карманом з наступними припущеннями:

1. Про плоску деформацію (уширення відсутнє);
2. На контактній поверхні мають місце тільки зони ковзання;
3. По висоті осередку деформації має місце рівномірність розподілу напружень, швидкостей і деформацій і передбачається, що нормальна напруга залежить тільки від однієї координати (тобто справедлива гіпотеза «плоских перетинів»);
4. Закон тертя на контактній поверхні підкоряється закону сухого тертя.

Розглянемо умови рівноваги елементарних обсягів металу, виділених в зонах відставання і випередження при прокатці (рис. 13.1).

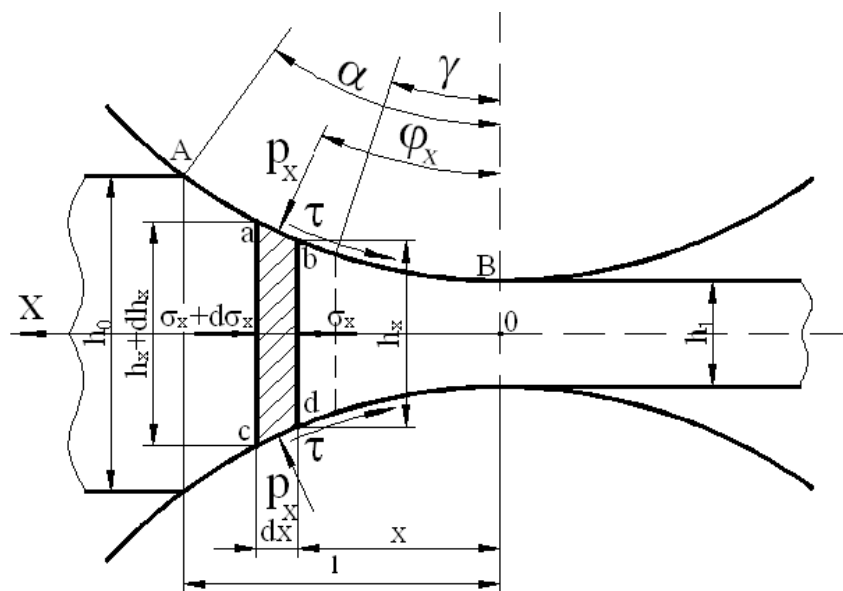


Рисунок 13.1 – Схема до визначення контактних напружень при прокатці

Вважаємо, що  $b = 1$ .

Сума горизонтальних проекцій всіх сил, що діють на елемент:

$$\Sigma X = 2P_x \frac{dx}{\cos \varphi} \sin \varphi + \sigma_x h_x - 2\tau \frac{dx}{\cos \varphi} \cos \varphi - \sigma_x + d\sigma_x h_x + dh_x = 0;$$

$$2P_x \operatorname{tg} \varphi dx + \sigma_x h_x - 2\tau dx - \sigma_x h_x - \sigma_x dh_x - d\sigma_x h_x - d\sigma_x dh_x = 0;$$

Помноження нескінченно малих величин  $d\sigma_x dh_x = 0$

$$2P_x \operatorname{tg} \varphi dx - 2\tau dx - \sigma_x dh_x - d\sigma_x h_x = 0;$$

$$dx = \frac{dh_x}{2\operatorname{tg} \varphi};$$

$$2P_x \operatorname{tg} \varphi \frac{dh_x}{2\operatorname{tg} \varphi} - 2\tau \frac{dh_x}{2\operatorname{tg} \varphi} - \sigma_x dh_x - d\sigma_x h_x = 0;$$

$$P_x dh_x - \tau \frac{dh_x}{\operatorname{tg} \varphi} - \sigma_x dh_x - d\sigma_x h_x = 0.$$

Розділимо на  $h_x$

$$d\sigma_x + \sigma_x \frac{dh_x}{h_x} + \tau \frac{dh_x}{h_x \operatorname{tg} \varphi} - P_x \frac{dh_x}{h_x} = 0$$

і отримаємо рівняння рівноваги елементарного об'єму, виділеного в зоні відсавання:

$$d\sigma_x - \frac{dh_x}{h_x} (P_x - \sigma_x) + \tau \frac{dh_x}{h_x \operatorname{tg} \varphi} = 0. \quad (13.1)$$

Вирішимо отримане рівняння рівноваги спільно з умовою пластичності:

$$\sigma_y - \sigma_x + 4\tau_{xy}^2 = 4K^2.$$

Вважаємо, що головні осі відповідають вертикальній і горизонтальній осям. тоді:

$$\sigma_y - \sigma_x = 2K; \quad \sigma_y \cong P_x;$$

$$P_x - \sigma_x = 2K; \quad \sigma_x = P_x - 2K.$$

Маємо

$$d(P_x - 2K) - \frac{dh_x}{h_x} 2K + \tau \frac{dh_x}{h_x \operatorname{tg} \varphi} = 0;$$

$$d(P_x - 2K) - \frac{dh_x}{h_x} \left(2K - \frac{\tau}{\operatorname{tg} \varphi}\right) = 0.$$

Приймаємо, що  $2K$  не змінюється по дузі захоплення, тобто  $2K = \text{const}$ . Дослідженнями Смирнова було показано, що  $2K$  можна приймати:

$$2K = \frac{(2K)_A + (2K)_B}{2}.$$

Тоді

$$dP_x = (2K \mp \frac{\tau}{\text{tg}\varphi}) \frac{dh_x}{h_x}, \quad (13.2)$$

де знак «-» – для зони відставання;  
знак «+» – для зони випередження.

### 13.2 Рішення рівняння контактних напружень при ковзанні металу з постійним коефіцієнтом тертя

Вважаємо, що  $\tau = \mu P_x$ . (13.3)

Підставляємо це значення в отримане рівняння контактних напружень:

$$dP_x = (2K \mp \frac{\mu P_x}{\text{tg}\varphi}) \frac{dh_x}{h_x}. \quad (13.4)$$

Подальше рішення буде пов'язано з встановленням співвідношень між  $\varphi$  і  $h_x$ . Для простоти рішення А. І. Целіковим було запропоновано замінити дугу захоплення двома хордами: однієї АС – для зони відставання і іншої ВС – для зони випередження (рис. 13.2). Похибки в цьому випадку незначні.

Тоді величина  $\text{tg}\varphi$  для зони відставання:

$$\text{tg}\varphi = \text{tg} \frac{\alpha + \gamma}{2}, \quad (13.5)$$

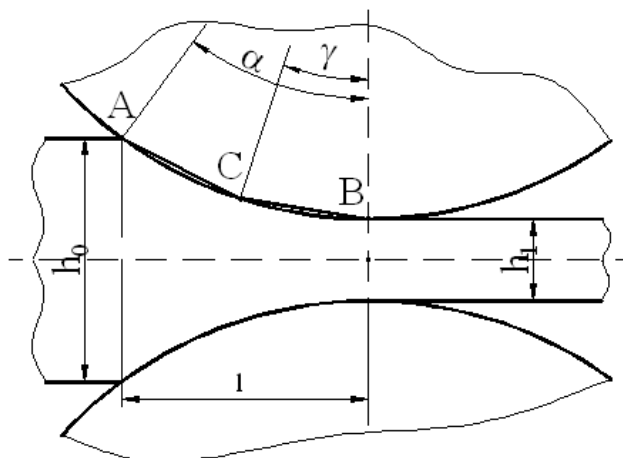


Рисунок 13.2 – Схема осередку деформації при заміні дуг захоплення хордами

для зони випередження

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2}. \quad (13.6)$$

Отримуємо для зони відставання:

$$dP_x = (2K - \delta_0 P_x) \frac{dh_x}{h_x}. \quad (13.7)$$

Для зони випередження:

$$dP_x = (2K + \delta_1 P_x) \frac{dh_x}{h_x}, \quad (13.8)$$

$$\text{де } \delta_0 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\frac{\alpha + \gamma}{2}}; \quad \delta_1 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\frac{\gamma}{2}}. \quad (13.9)$$

У рівнянні, отриманому для зони відставання розділимо змінні:

$$\frac{dP_x}{2K - \delta_0 P_x} = \frac{dh_x}{h_x}.$$

проінтегруємо

$$-\frac{1}{\delta_0} \ln(2K - \delta_0 P_x) = \ln h_x + \ln C_0;$$

$$2K - \delta_0 P_x = h_x^{-\delta_0} C_0.$$

при

$$h_x = h_0; \quad P_x = P_A;$$

$$P_x - \sigma_x = 2K;$$

$$P_A - \sigma_A = 2K;$$

$$P_A = 2K + \sigma_A;$$

$$P_A = 2K + \sigma_0 - \text{задній підпір};$$

$$P_A = 2K - \sigma_0 - \text{задній натяг};$$

$$P_A = 2K - \sigma_0 = 2K\xi_0;$$

$$2K - \sigma_0 \cdot 2K\xi_0 = h_0^{-\delta_0} C_0;$$

$$C_0 = [2K(1 - \delta_0 \xi_0)] h_0^{\delta_0};$$

$$2K - \delta_0 P_x = h_x^{-\delta_0} 2K(1 - \delta_0 \xi_0) h_0^{\delta_0};$$

$$\delta_0 P_x = 2K - 2K(1 - \delta_0 \xi_0) \left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{\delta_0}.$$

Для зони відставання

$$P_x = \frac{2K}{\delta_0} [(\delta_0 \xi_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{\delta_0} + 1]. \quad (13.10)$$

Для зони випередження

$$P_x = \frac{2K}{\delta_1} [(\delta_1 \xi_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1}\right)^{\delta_1} - 1]; \quad (13.11)$$

$$P_b = 2K - \sigma_1 = \xi_1 2K;$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2K}; \quad (13.12)$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2K}. \quad (13.13)$$

При  $\xi_0 = \xi_1 = 1$ ; ( $\sigma_1 = \sigma_0 = 0$ ).

Для зони відставання

$$P_x = \frac{2K}{\delta_0} [(\delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{\delta_0} + 1]. \quad (13.14)$$

Для зони випередження

$$P_x = \frac{2K}{\delta_1} [(\delta_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1}\right)^{\delta_1} - 1]. \quad (13.15)$$

На рис. 13.3 наведені епюри контактних напружень при прокатці тонких смуг, які отримані з урахуванням виразів (13.14), (13.15) і (13.3).

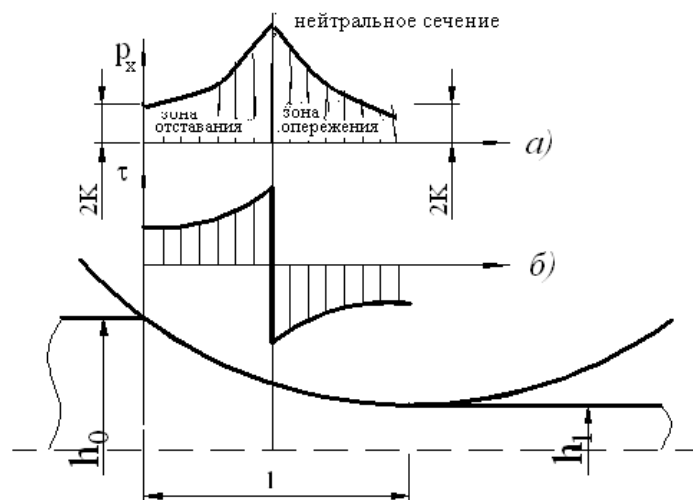


Рисунок 13.3 – Епюри нормальних (а) і дотичних (б) контактних напружень при прокатці



### 13.3 Фактори, що впливають на величину нормальних контактних напружень

Розглянемо, як різні умови прокатки впливають на величину контакт-ного напруження:

$$13.3.1 \frac{1}{h_{cp}} = \text{const}, \alpha = \text{const}; D_{\text{валк}} = \text{const}; \mu = \text{Var} \text{ (рис. 13.4).}$$

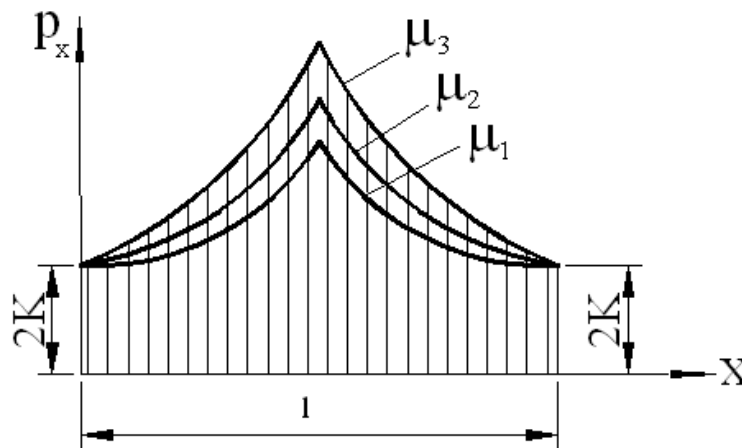


Рисунок 13.4 – Епюри нормальних напружень для різних коефіцієнтів тертя

$$\mu_3 > \mu_2 > \mu_1;$$

$$13.3.2 \frac{1}{h_{cp}} = \text{Var}, h_{cp} = \text{const}; \mu = \text{const}; l = \sqrt{R\Delta h} \text{ (рис. 13.5)}$$

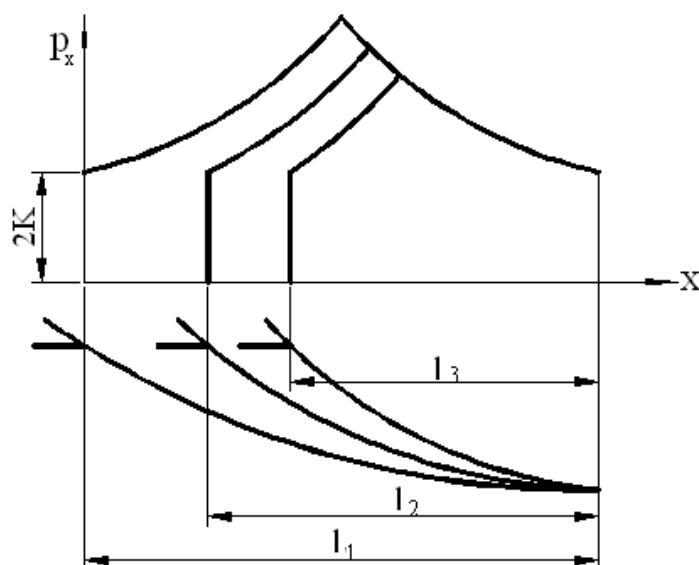


Рисунок 13.5 – Епюри нормальних напружень для різних діаметрів валків

З ростом  $l/h_{cp}$  контактне напруження збільшується.

### 13.3.3 Вплив переднього і заднього натягунів (рис. 13.6)

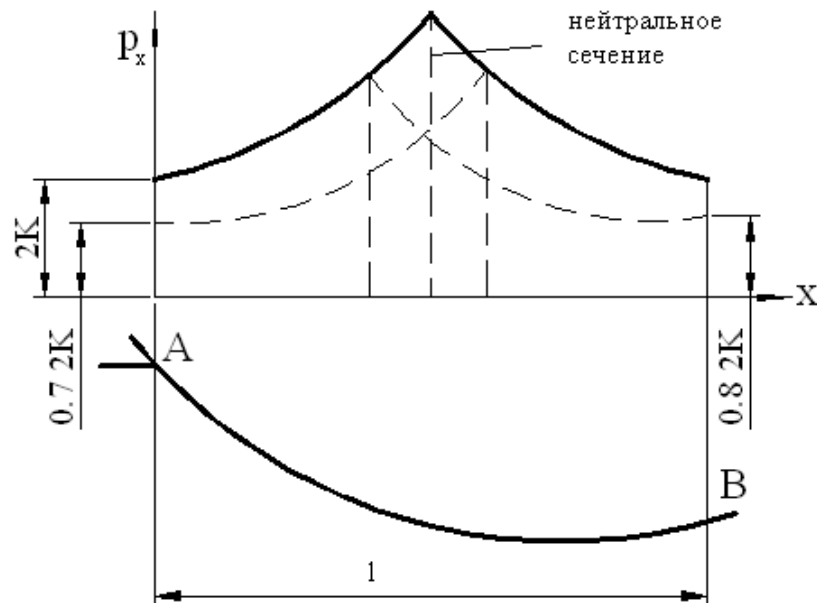


Рисунок 13.6 – Епюри нормальних напружень при прокатці з натягом

$$P_B = 2K - \sigma_1; \sigma_1 = 0,2 \cdot 2K; P_B = 2K - 0,2 \cdot 2K = 0,8 \cdot 2K;$$

$$P_A = 2K - \sigma_0; \sigma_0 = 0,3 \cdot 2K; P_A = 2K - 0,3 \cdot 2K = 0,7 \cdot 2K.$$

При передньому натягу нейтральний кут збільшується, а при наявності заднього – зменшується. При наявності заднього натягу до валків необхідно докласти більший момент. При збільшенні переднього натягуння, момент прокатки зменшується і може звернутися в «0» (прокатка перероджується в волочіння).

Під дією переднього і заднього натягунів контактні напруги знижуються, причому заднє натягуння надає більший вплив, ніж переднє (зона відставання має велику протяжність, ніж зона випередження).

# 14 ЛЕКЦІЯ 14

## СИЛА І МОМЕНТ ПРОКАТКИ. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ

### 14.1 Визначення сили прокатки

Тиск металу на валки складається як сумарна сила від нормальних і дотичних напружень, що діють на контактній поверхні (рис. 14.1).

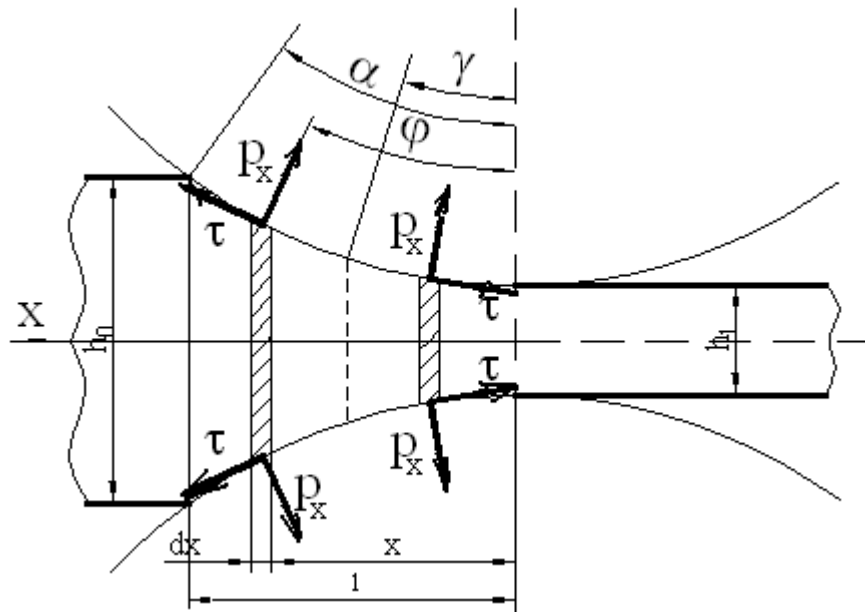


Рисунок 14.1 – Схема до визначення сили прокатки

$$P = \int_0^{\alpha} P_x \frac{dx}{\cos \varphi} \cos \varphi - \int_0^{\gamma} \tau \frac{dx}{\cos \varphi} \sin \varphi + \int_{\gamma}^{\alpha} \tau \frac{dx}{\cos \varphi} \sin \varphi.$$

Другим і третім членами рівняння можна знехтувати через незначності їх різниці в порівнянні з першим членом рівняння:

$$P \cong \int_0^{\alpha} P_x dx. \tag{14.1}$$

Інтеграл у формулі (14.1) виражає площу епюри нормальних контактних напружень, побудованої на горизонтальній проекції довжини дуги захоплення (рис. 14.2).

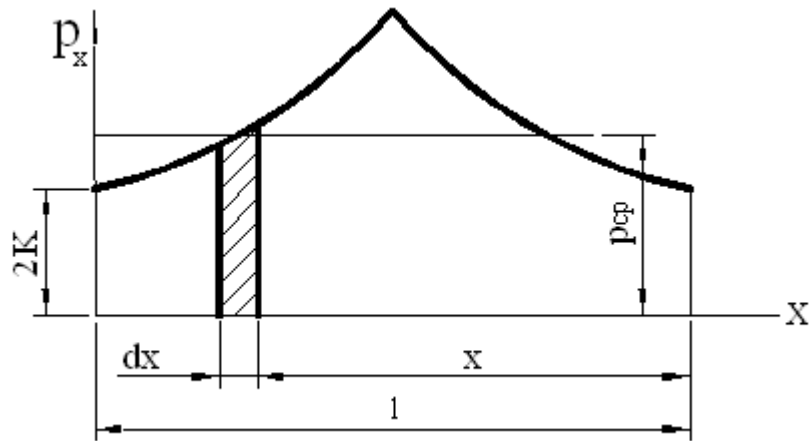


Рисунок 14.2 – Геометрична інтерпретація інтеграла у формулі (14.1)

$$P = p_{\text{ср}}F,$$

де  $F$  – площа контактної поверхні.

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{l} \int_0^l p_x dx. \quad (14.2)$$

Таким чином, щоб визначити силу прокатки, потрібно визначити:

- а) площу контактної поверхні;
- б) середній тиск на валки.

## 14.2 Фактори, що впливають на опір деформації при прокатці

Середній тиск визначається двома групами факторів:

1. Фактори, що залежать від механічних властивостей смуги, що деформується

$$\sigma_{\phi} = \sigma_s k_u k_{\epsilon} k_{\tau}; \quad (14.3)$$

2. Фактори, що впливають на  $p_{\text{ср}}$  через напружений стан металу в осередку деформації (зовнішні сили тертя, зовнішні зони, натягування):

$$p_{\text{ср}} = \sigma_{\phi} \frac{2n_{\sigma}}{\sqrt{3 + \beta^2}}, \quad (14.4)$$

де  $n_{\sigma}$  – коефіцієнт напруженого стану (часто надає найбільший вплив на тиск, ніж інші коефіцієнти і змінюється від 0,8 до 3);

$\frac{2}{\sqrt{3+\beta^2}}$  змінюється від 1 до 1,15 і враховує вплив середнього головного напруження  $\sigma_2$  на співвідношення напруг при пластичній деформації.  
Для плоскої деформації

$$\frac{2}{\sqrt{3+\beta^2}} = 1,15.$$

У загальному випадку

$$n_{\sigma} = n'_{\sigma} n''_{\sigma} n'''_{\sigma}, \quad (14.5)$$

де  $n'_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього тертя;

$n''_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх зон;

$n'''_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив натягу або підпору.

Перші два коефіцієнти зазвичай більше 1, а третій коефіцієнт може досягати значення 0,7...0,8.

$$\left. \begin{array}{l} n'_{\sigma} = (1...3) \\ n''_{\sigma} = (1...2,57) \\ n'''_{\sigma} = (0,7...1) \end{array} \right\} \text{ залежить від } \frac{1}{h_{\text{ср}}};$$

У багатьох випадках прокатку можна розглядати як двомірну деформацію, тоді:

$$p_{\text{ср}} = n_{\sigma} 2K, \quad (14.6)$$

де  $2K=1,15 \sigma_{\phi}$ .

### 14.3 Коефіцієнти впливу зовнішніх зон і зовнішнього тертя

Зі зменшенням коефіцієнт напруженого стану збільшується, незважаючи на зниження впливу зовнішнього тертя. А. І. Целіков пояснив це явище впливом зовнішніх зон.

Смирновим було проведено експеримент (рис. 14.3).

Осаджуванню піддавалися зразки, які мають зовнішні зони і не мають їх.

$$\frac{P'}{P} > 1; \quad \frac{P'}{P} = 1...2,57.$$

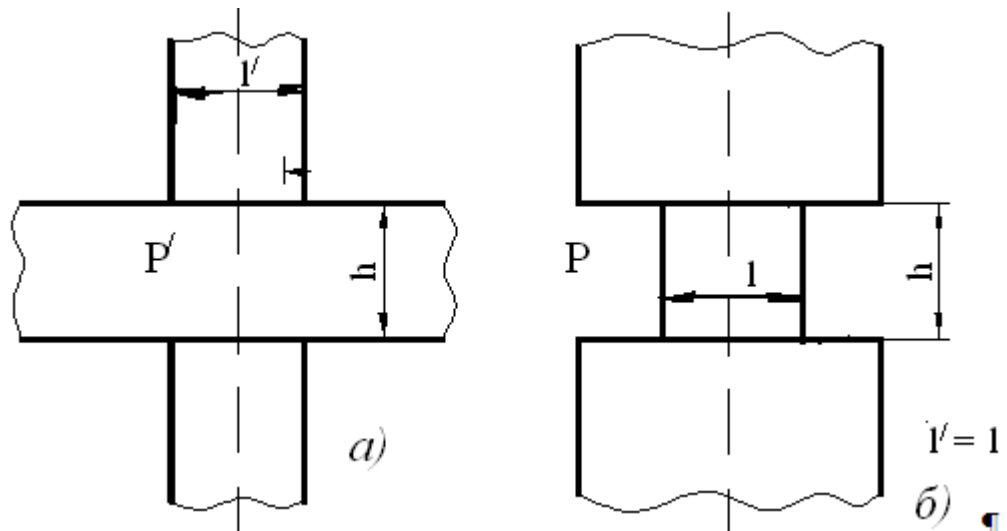


Рисунок 14.3 – Схеми осаджування зразків при наявності зовнішніх зон (а) і без них (б)

Експериментальні дані можна апроксимувати залежністю:

$$\frac{P'}{P} = n_{\sigma}'' = \left(\frac{l}{h_{cp}}\right)^{-0,4}.$$

На рис. 14.4 наведена залежність коефіцієнта напруженого стану  $n_{\sigma}$  від відносини  $l/h_{cp}$  при відсутності натягу (підпорів)

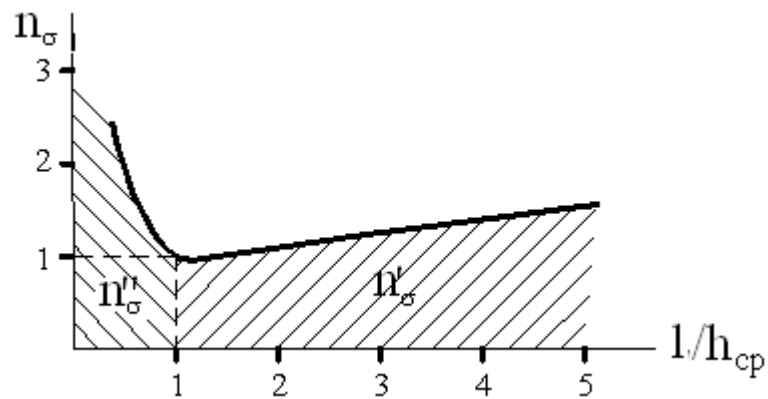


Рисунок 14.4 – Залежність  $n_{\sigma}$  від відносини  $l/h_{cp}$  при  $n_{\sigma} = 1$

При  $n_{\sigma}''' = 1$ ,  $n_{\sigma} = n_{\sigma}'$ , коли  $\frac{l}{h} > 1$ .

$n_{\sigma} = n_{\sigma}''$ , коли  $\frac{l}{h} < 1$ .

При  $1/h_{cp} = 1$ ,  $n_{\sigma_{min}} = 1$  (в цьому випадку деформація наближається до рівномірної. З ростом або зменшенням  $1/h_{cp}$  вплив зовнішніх зон або зовнішнього тертя спотворює рівномірність деформації).

Для визначення  $n'_\sigma$  при прокатці тонких смуг ( $1/h_{cp} > 3$ ) А. І. Целіковим отримана номограма впливу зовнішнього тертя на тиск в залежності від  $\delta$  при різних  $\varepsilon$  (рис. 14.5).

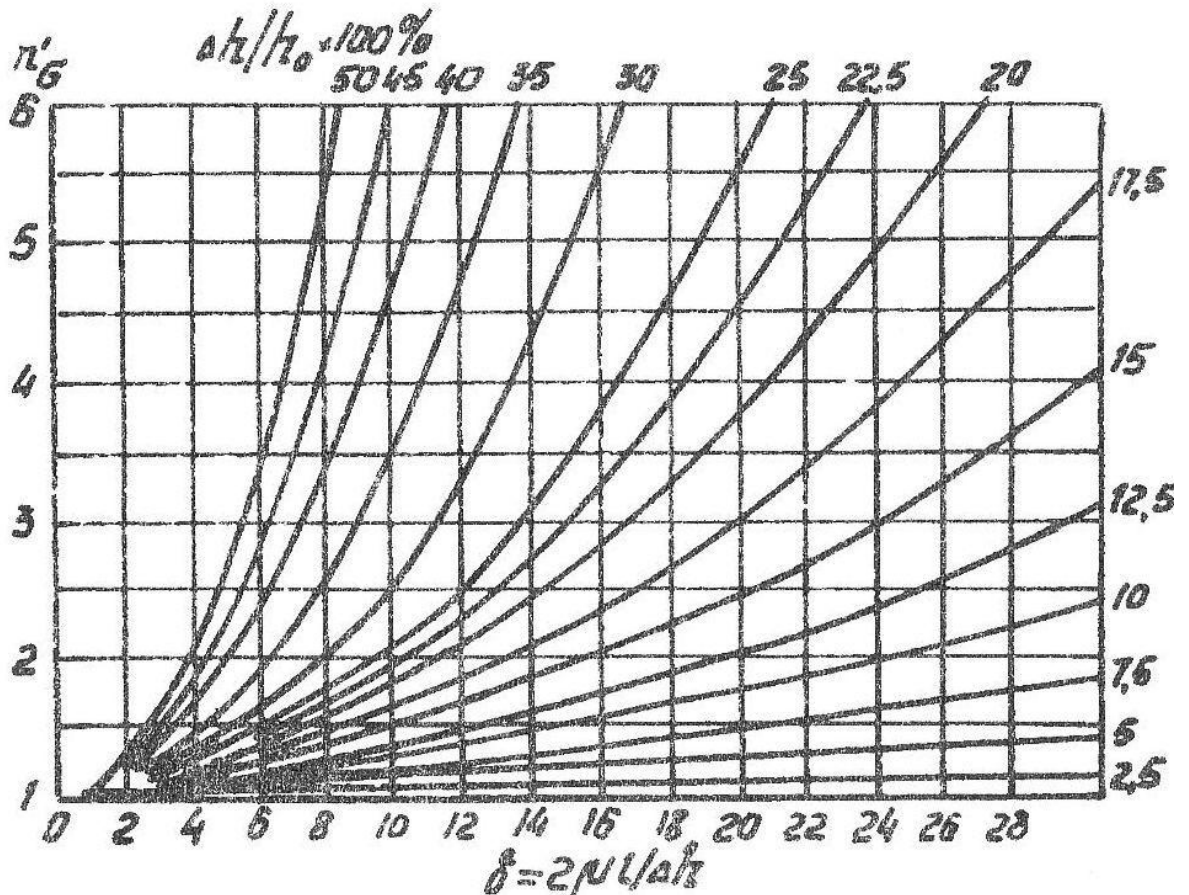


Рисунок 14.5 – Номограма А. І. Целікова

#### 14.4 Методика визначення сили прокатки з урахуванням пружного сплюснення валків

Вирішення цього завдання проводиться методом ітерації. Задаються довжиною дуги захоплення дещо більшою, ніж при абсолютно жорстких валках, а потім перевіряють чи правильно була вона обрана.

1.  $\Delta h = h_0 - h_1$ ;
2.  $\mu$ ;

$$3. \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0};$$

$$4. 2K;$$

$$5. l_1 = \sqrt{R\Delta h};$$

6. Задаємося

$$l = (1,1 - 1,15)l_1;$$

7. Для цієї  $l$  визначаємо

$$\delta = \frac{2\mu l}{\Delta h};$$

8. За номограмою А. І. Целікова визначаємо  $n'_\sigma$  по відомим  $\delta$  і  $\varepsilon$

9. За відомим  $n'_\sigma$

$$p_{cp} = n'_\sigma 2K;$$

10. По формулі

$$X_2 = \frac{p_{cp} R}{95000};$$

$$11. l' = \sqrt{R\Delta h + x_2^2} + x_2.$$

Порівнюємо результати, якщо  $l$  і  $l'$  не відрізняються більше, ніж 3...5 %, то розрахунок триває:

$$P = p_{cp} l b.$$

Якщо не збігаються, розрахунок повторюють знову з п. 6, задавши іншою величиною проекції дуги захоплення  $l$ .

### 14.5 Напрямок рівнодійних сил при прокатці

Розглянемо випадок прокатки, коли на смугу не діють будь-які сили, окрім сил, прикладених від валків, рух смуги при вході в валки і виході з них рівномірний, обидва валка приводні і одного діаметра, мають однакові окружні швидкості, а метал за механічними властивостями однорідний. Цей випадок називають простим процесом прокатки. Елементарні сили, прикладені до смуги від валка можна представити у вигляді 3-х рівнодійних (рис. 14.6).



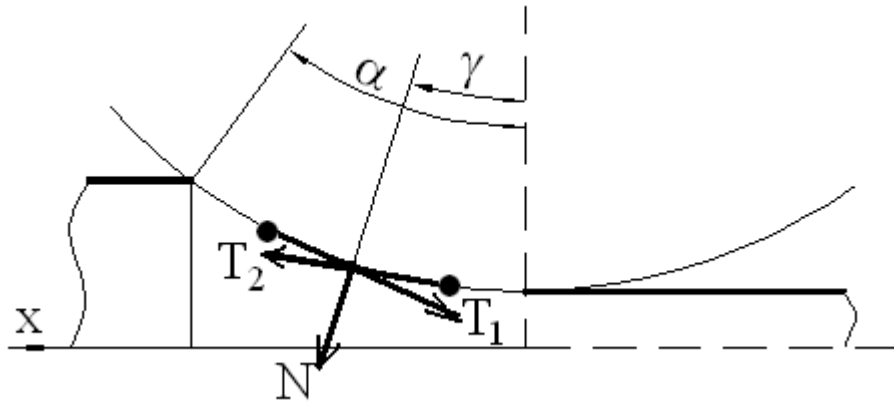


Рисунок 14.6 – Схема сил, прикладених до смуги з боку валка в разі простого процесу прокатки

Якщо знехтувати силами інерції, то очевидно, що 6 сил, діючих на метал, який прокатується, від верхнього і нижнього валків повинні врівноважуватися, тобто їх геометрична сума повинна дорівнювати «0». Це можливо, коли  $P_1 = P_2$  і спрямовані назустріч один одному. При цьому  $AC = BD$  (рис. 14.7).

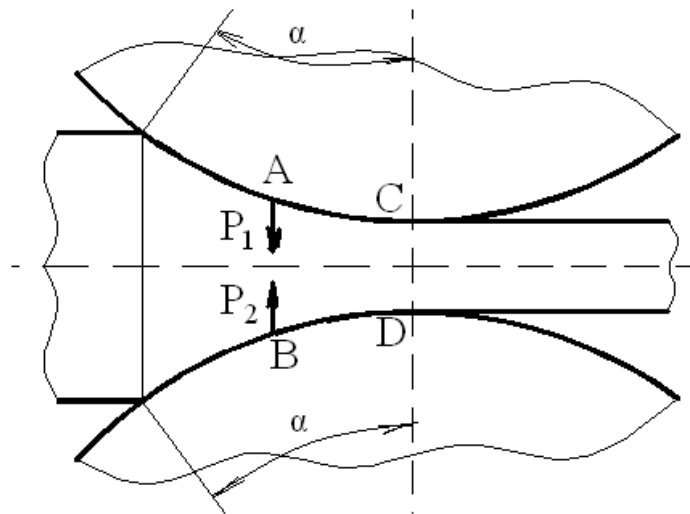


Рисунок 14.7 – Напрямок рівнодійних сил при простій прокатці

Звідси можна зробити висновок, що рівнодіюча тиску валка на метал, включаючи сили тертя, повинна бути спрямована паралельно лінії, що з'єднує центри валків, тобто вертикально.

На практиці, однак, не завжди дотримується комплекс умов, які відповідають нагоди простого процесу прокатки. Можливі наступні варіанти:

1. На метал, який прокатується, крім сил, прикладених від валків, діють ще інші поздовжні сили (переднє і заднє натягування, сили інерції). Тут можливі три випадки:

$$T_0 > T_1; T_0 < T_1; T_0 = T_1.$$

При  $T_0 > T_1$ , рівнодіюча  $P$  відхиляється в сторону виходу з осередку деформації (рис. 14.8).

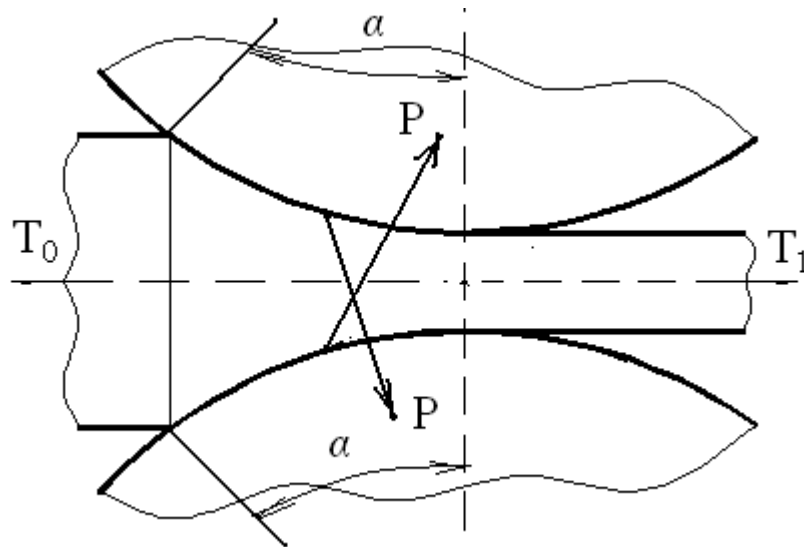


Рисунок 14.8 – Напрямок рівнодійних сил при  $T_0 > T_1$

При  $T_0 < T_1$  рівнодіюча  $P$  відхиляється в бік входу в осередок деформації, а при  $T_0 = T_1$  сила  $P$  залишається вертикальною.

2. Прокатка з одним приводним валком (тонколистові стани дуо)

Якщо знехтувати силами тертя в підшипниках холостого валка, то рівнодіюча сила на цьому валку повинна проходити через його вісь (рис. 14.9).

Оскільки дія дорівнює протидії, то сила на нижньому валку дорівнює силі на верхньому, лежить на одній прямій з останньою, але спрямована в протилежний бік.

3. Валки обертаються з різними окружними швидкостями (верхній і нижній тиск).

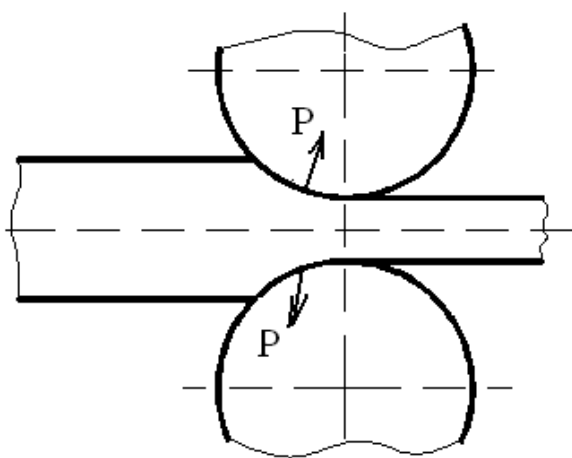


Рисунок 14.9 – Напрямок рівнодійних сил при прокатці з одним холостим валком

4. Різні діаметри валків.
  5. Метал, що прокатується, за механічними властивостями неоднорідний (прокатка біметалу, нерівномірно нагрітого металу).
  6. Різні коефіцієнти тертя на контактних поверхнях валків.
  7. Різні ширини верхньої і нижньої частин смуги, що прокатується.
- У всіх перерахованих і подібних випадках рівнодіюча тиску металу на валки спрямована не вертикально, крім того у випадках 2...7 з'являється нерівність моментів, необхідних для обертання кожного валка.

#### 14.6 Момент при прокатці на гладкій бочці

Момент  $M_{дв}$  на валу двигуна прокатного стану можна представити у вигляді суми чотирьох складових:

$$M_{дв} = M_{пр} + M_{тр} + M_{хх} + M_{дин}. \quad (14.7)$$

$M_{тр}$  не включає в себе момент  $M_{хх}$ , тому, що в процесі розрахунку зручніше ці складові обчислювати окремо.

Для простого випадку прокатки (рис. 14.10)

$$M_{пр} = 2Pa = 2P\psi l, \quad (14.8)$$

де  $\psi = a/l$  – коефіцієнт положення рівнодіючої тиску металу на валки ( $l = \sqrt{R\Delta h}$ ).

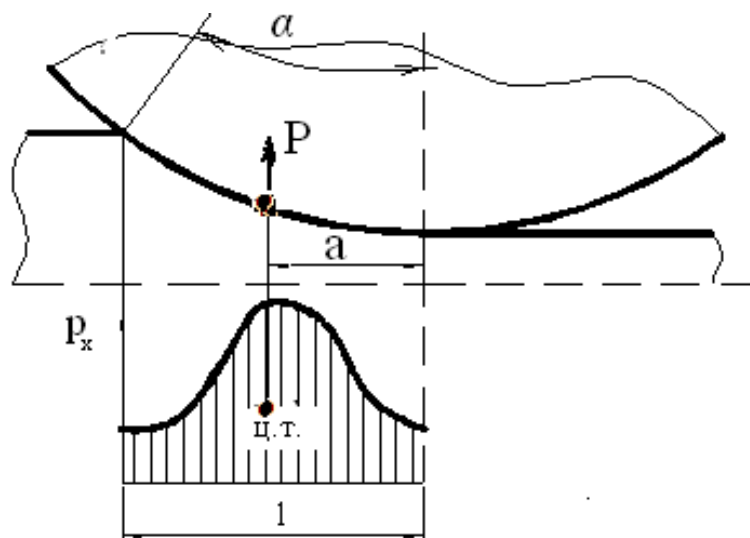


Рисунок 14.10 – Схема до визначення моменту прокатки

Точка прикладання рівнодіючої буде перебувати на вертикалі, що проходить через центр ваги епюри нормальних контактних напружень. Для визначення коефіцієнта плеча необхідно знати положення ц.т. питомих тисків на контактній поверхні.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що:

$$\psi = 0,2 \dots 0,7.$$

При гарячій прокатці смуг, коли  $l/h_{cp} < 1$  (рис. 14.11):

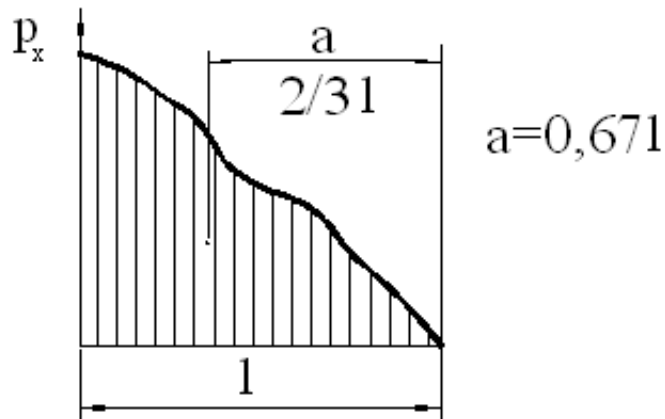


Рисунок 14.11 – Епюра нормальних напружень при прокатці з відношенням  $l/h_{cp} < 1$

При гарячій прокатці товстих смуг, коли  $l/h_{cp} < 2 \dots 2,5$ ;  $\psi = 0,5 \dots 0,7$ .

У разі холодної прокатки з мастилом  $\psi = 0,2 \dots 0,5$ .

При  $l/h_{cp} < 1$   $\psi$  не залежить від умов тертя на контакті і кута захоплення. При  $l/h_{cp} > 1$   $\psi$  зменшується з ростом кута захоплення і збільшується з ростом коефіцієнта тертя.

Коефіцієнт положення рівнодійної можна визначити як експериментально, так і теоретично, використовуючи отримані залежності для визначення контактних напружень в осередку деформації.  $M_{тр}$  є сумою моменту, необхідного для подолання сил тертя в підшипниках валків прокатного стану і моменту, необхідного для подолання сил тертя в передавальних механізмах стану

$$M_{тр} = q r \frac{\alpha}{2} f,$$

де  $q$  – число валків.

Момент сил тертя в передавальному механізмі, наведених до валу двигуна:

$$M_{тр2} = \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{M_{пр} + M_{тр1}}{i},$$

де  $\eta$  – к.к.д. передачі від двигуна до валанням;  
 $i$  – передавальне число від двигуна до валків;  
 $M_{тр1}$  – момент сил тертя в підшипниках валків, приведені до останніх.  
 Загальний момент, що витрачається на подолання сил тертя, приведений до валу двигуна:

$$M_{тр} = \frac{M_{тр1}}{i\eta} + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M_{пр}}{i}$$

або

$$M_{тр} = \frac{M_{тр1}}{i} + M_{тр2}.$$

Сумарний момент холостого ходу, приведений до валу двигуна, що потребується для обертання  $n$  деталей:

$$M_{х.х} = \sum_1^n \frac{G_n f_n dn}{2i_n}.$$

Динамічний момент  $M_{дин}$  виникає при нерівномірному обертанні валків. Тому динамічний момент враховують при розрахунку реверсивних станів з часто повторюваним режимом розгону і гальмування валків:

$$M_{дин} = I \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega = \frac{\pi n}{30};$$

$$M_{дин} = I \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt}; \quad \frac{dn}{dt} = 80 \dots 120 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}};$$

$$I = \frac{GD_{пр}^2}{4q};$$

$$M_{дин} = \frac{GD_{пр}^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

де  $D_{пр}$  – приведений діаметр інерції частин, що обертаються.

У разі прискорення  $M_{дин} > 0$ , а в разі гальмування  $M_{дин} < 0$ .

При обчислюванні потужності приводу стану доводиться враховувати здатність двигуна до перевантаження, перевіряти його на нагрів.

У разі прокатки складних профілів великі труднощі виникають, як при визначенні контактної поверхні і повного тиску металу на валки, так і при визначенні моменту прокатки. У цьому випадку більш надійні результати отримують при підрахунку моменту за експериментальними даними про витрату енергії при прокатці.

## 15 ЛЕКЦІЯ 15 ВИПЕРЕДЖЕННЯ І УШИРЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ І ФАКТОРИ, ЩО ЇХ ВИЗНАЧАЮТЬ

### 15.1 Випередження при прокатці

Швидкість поступального руху кінця смуги, що виходить з валків більше, ніж окружна швидкість валків. Це явище отримало назву випередження. Швидкість заднього кінця смуги, менше горизонтальної складової окружної швидкості валків. Це явище отримало назву відставання.

Випередження і відставання є результатами осаджування смуги по висоті в процесі прокатки (рис. 15.1).

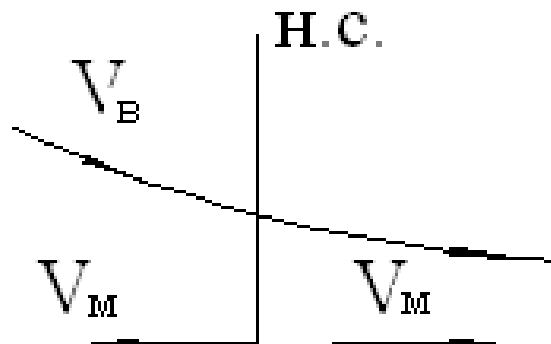


Рисунок 15.1 – Схема відносного ковзання металу на контактні з валками

Випередження і відставання при прокатці в значній мірі визначають характер розподілу і величину контактних напружень, а також величину розширення при прокатці. Величину випередження необхідно визначати для настройки безперервного стану, щоб уникнути надмірного натягу і утворення петель між клітьми стану.

Випередження визначають за формулою:

$$S = \frac{V_1 - V_B}{V_B} = \frac{V_1}{V_B} - 1. \quad (15.1)$$

Випередження буває від 2 до 15 %.

На практиці випередження визначають методам кернів (рис. 15.2).

$$S = \frac{l_1 - l_B}{l_B},$$

Так як за час  $t$

$$l_B = V_B t; V_B = \frac{l_B}{t};$$

$$l_1 = V_1 t; V_1 = \frac{l_1}{t}.$$

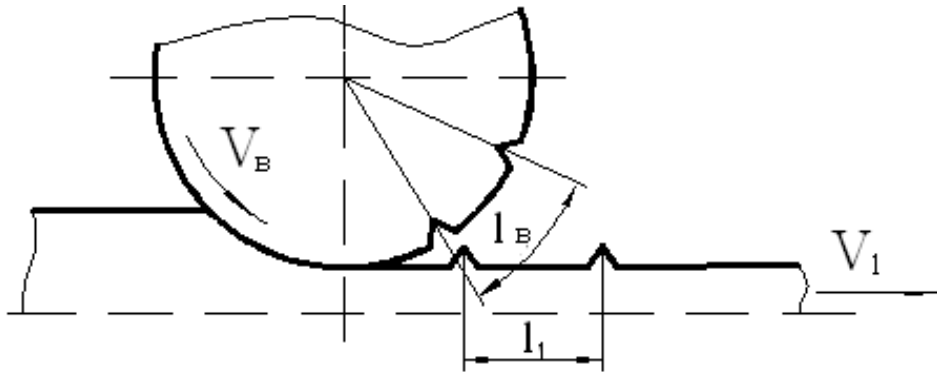


Рисунок 15.2 – Схема визначення випередження методом кернів

При гарячій прокатці, коли відстань  $l_1$  вимірюють після охолодження металу, необхідно враховувати температурну усадку металу

$$l_1 = l_0 [1 + \alpha(t_1^0 - t_0^0)].$$

Теоретично випередження можна визначити в залежності від положення нейтрального перетину (рис. 15.3).

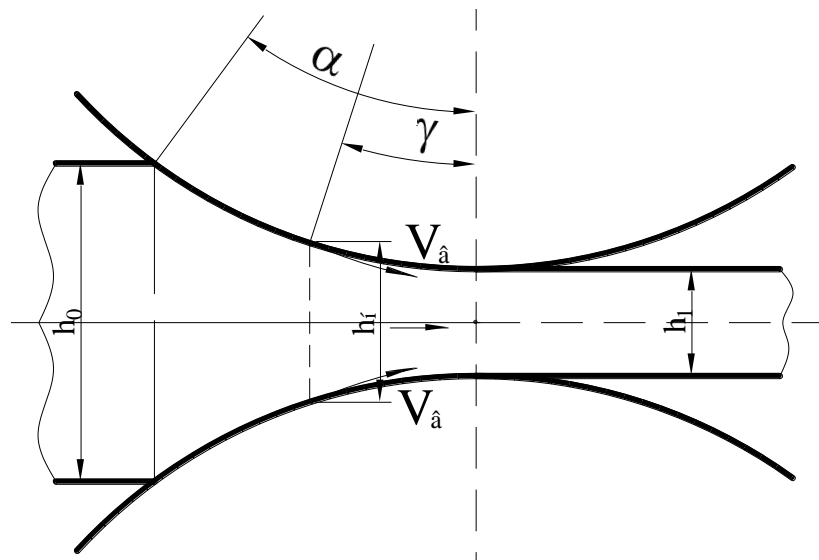


Рисунок 15.3 – Схема до визначення випередження

При двовірній деформації з умови сталості секундного обсягу слідує:

$$h_n V_B \cos \gamma = h_1 V_1$$

або

$$\frac{V_1}{V_B} = \frac{h_H \cos \gamma}{h_1};$$
$$S = \frac{h_H \cos \gamma}{h_1} - 1,$$

Так як

$$h_H = h_1 + 2R(1 - \cos \gamma),$$

то

$$S = \frac{h_1 + 2R(1 - \cos \gamma)}{h_1} \cos \gamma - 1;$$
$$1 - \cos \gamma = 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2};$$
$$S = \frac{h_1 + 2R \cdot 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}}{h_1} \cos \gamma - 1 = \cos \gamma - 1 + \frac{2R \cdot 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}}{h_1} \cos \gamma =$$
$$= -(1 - \cos \gamma) + \frac{2R \cdot 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}}{h_1} \cos \gamma =$$
$$= 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \left( \frac{2R}{h_1} \cos \gamma - 1 \right) = 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \left( \frac{2R}{h_1} \cos \gamma - 1 \right).$$
$$\cos \gamma \approx 1; \sin^2 \frac{\gamma}{2} \approx \frac{\gamma^2}{4}.$$

Отримуємо формулу Екелунда

$$S = 2 \frac{\gamma^2}{4} \left( \frac{2R}{h_1} - 1 \right);$$
$$S = \gamma^2 \left( \frac{R}{h_1} - 0,5 \right). \quad (15.2)$$

При прокатці тонких смуг  $R \gg h_1$ , тому величиною 0,5 можна знехтувати. Отримаємо:

$$S = \frac{R}{h_1} \gamma^2. \quad (15.3)$$

Це рівняння відоме як формула Дрездена.



Питання визначення випередження пов'язане з визначенням нейтрального кута.

1. Спосіб А. І. Целікова.

У нейтральному перетині нормальні контактні напруги в зоні випередження і відставання рівні між собою (рис. 15.4).

$$P_{x_{3.оп}} = P_{x_{3.от}};$$

$$\sin \gamma = \frac{h_1}{\sqrt{R\Delta h}} \left( \frac{h_n}{h_1} - 1 \right) \approx \gamma;$$

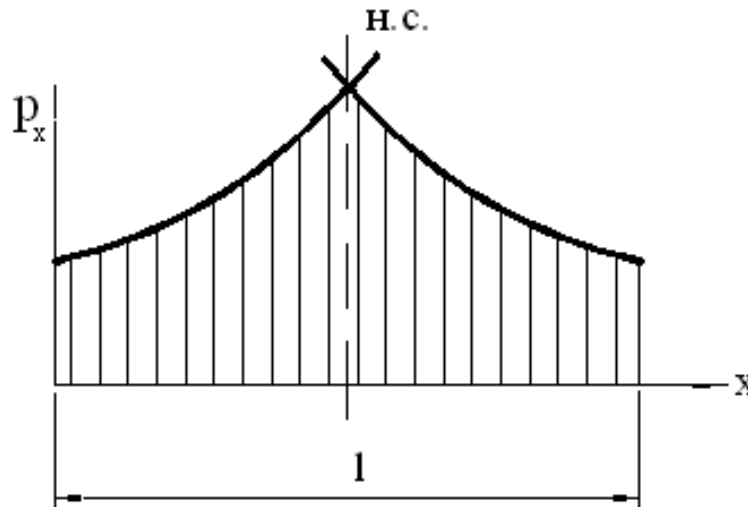


Рисунок 15.4 – Схема до визначення значення  $\gamma$  способом А. І. Целікова

$$\frac{h_n}{h_1} = \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0 \delta - 1)(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^\delta}}{\xi_1 \delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}.$$

## 2. Метод Фінка-Павлова

Діючі на контактній поверхні сили повинні забезпечити умову рівноваги смуги, що деформується (рис. 15.5):

$$\int_0^\alpha P_x R d\varphi \sin \varphi + \int_0^\gamma \tau R d\varphi \cos \varphi - \int_0^\alpha \tau R d\varphi \cos \varphi = 0,$$

де  $dS = R d\varphi$ .

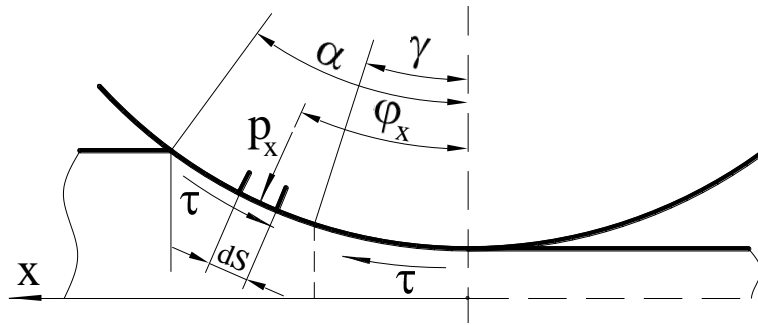


Рисунок 15.5 – Схема до визначення значення  $\gamma$  за методом Фінка-Павлова

При вирішенні цього рівняння припускають, що нормальні контактні напруги по довжині дуги захоплення розподіляються рівномірно (рис. 15.6).

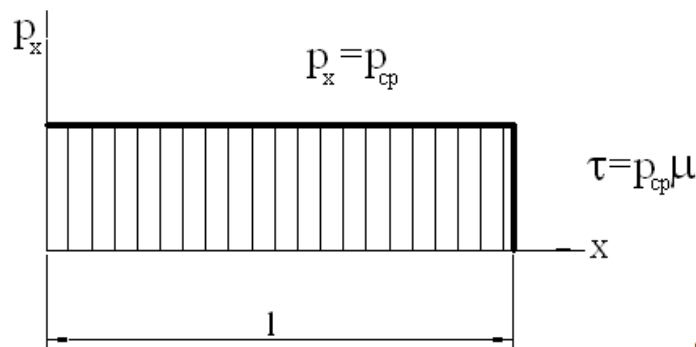


Рисунок 15.6 – Допущення про рівномірність  $p_x$

$$\tau = p_{cp}\mu;$$

$$- p_{cp}R \cos \varphi \Big|_0^\alpha + p_{cp}\mu R \sin \varphi \Big|_0^\gamma - p_{cp}\mu R \sin \varphi \Big|_\gamma^\alpha = 0;$$

$$- \cos \alpha + 1 + \mu \sin \gamma - \mu \sin \alpha + \mu \sin \gamma = 0;$$

$$2\mu \sin \gamma = \mu \sin \alpha + \cos \alpha - 1;$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} + \frac{\cos \alpha - 1}{2\mu}$$

або

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}. \quad (15.4)$$

Для прокатки при малих значеннях коефіцієнта тертя  $\mu = 0,15 \dots 0,2$ . Ця формула дає хороші результати, а для прокатки товстих смуг, коли  $1/h_{cp} < 2$  ця формула дає великі похибки.

З ростом кута захоплення і  $1/h$  випередження зростає. Переднє натягнення збільшує, а заднє зменшує випередження.

## 15.2 Налаштування швидкостей при безперервній прокатці

При безперервній прокатці (рис. 15.7) повинна виконуватися умова сталості секундних обсягів:

$$C = V_0 F_0 = V_1 F_1 = V_2 F_2 = \dots = V_n F_n.$$

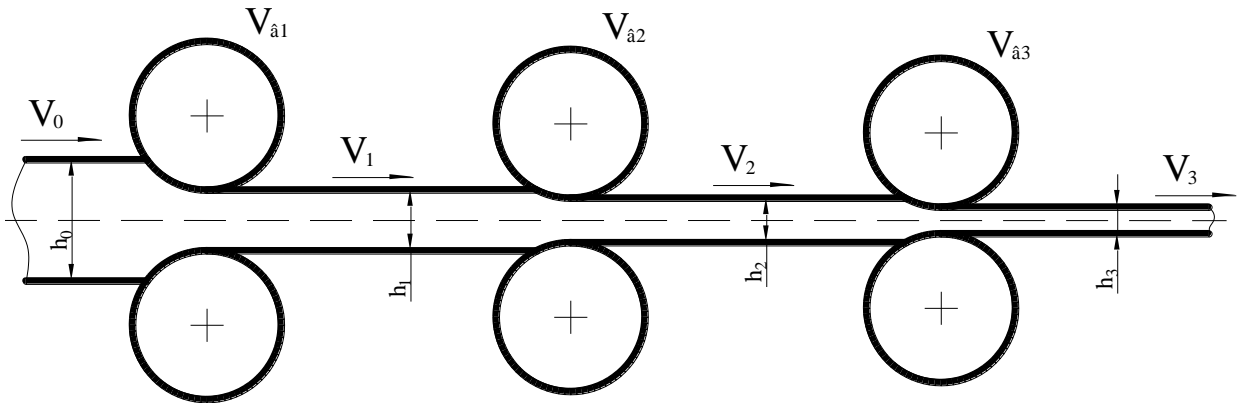


Рисунок 15.7 – Схема безперервної прокатки

Беручи до уваги вираз (15.1), маємо:

$$C = V_1 F_1 = V_{B1} F_1 (1 + S_1) = V_{B1} (1 + S_1) h_1 v_1.$$

Тоді:

$$V_{B1} = \frac{C}{h_1 v_1 (1 + S_1)}; V_{B2} = \frac{C}{h_2 v_2 (1 + S_2)},$$

де  $C$  – постійна секундних обсягів для цього параметра.

## 15.3 Розширення при прокатці і фактори, що його визначають

Процес прокатки в загальному випадку є об'ємною деформацією (метал тече в трьох напрямках). Ширина смуги при виході з валків  $v_1$  зазвичай завжди трохи більше початкової ширини  $v_0$ , різниця їх дорівнює величині розширення

$$\Delta v = v_1 - v_0.$$

Розширення в загальному випадку являє собою негативне явище (знижує загальну витяжку, на крайках смуги виникають напруги розтягнення). У той же час розширення використовують як засіб кращого заповнення калібрів при прокатці фасонних профілів.

Беручи до уваги закон найменшого опору можна сказати, що в напрямку ширини деформується не весь обсяг металу в осередку деформації, а тільки його частина, що лежить у бічних крайках смуги (рис. 15.8).

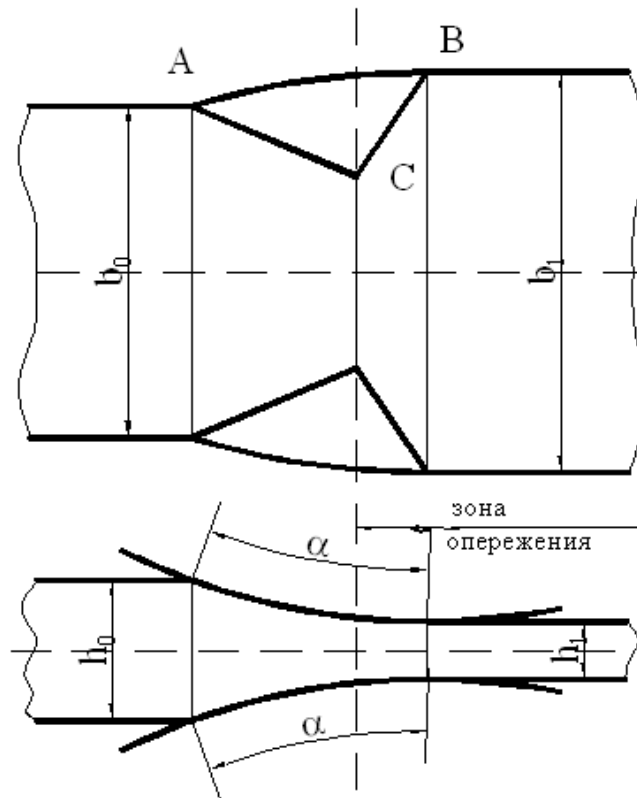


Рисунок 15.8 – Схема зон прагнення до розширення

Зона, в якій метал деформується в трьох напрямках (ABC), називається зоною прагнення до розширення.

Залежно від обсягу цієї зони знаходиться і величина розширення. Протяжність цієї зони, її межі визначаються умовами прокатки, до яких слід віднести, в першу чергу, ширину смуги, обтиснення, умову тертя, відносини  $l/h_{cp}$ ,  $v_0/l$ , діаметр валків.

Теоретично питання визначення розширення найбільш повно був вивчений А. І. Целіковим. Розглядаючи умову рівноваги елементарних обсягів в зоні прагнення до розширення в поздовжньому і поперечному напрямку їм була отримана залежність, що дозволяє визначити розширення:

$$\Delta_{в} = 2C_b C_{\sigma} \left( \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left[ \left( \frac{h_1}{\Delta h} \right)^2 \ln \frac{h_0}{h_1} - \frac{h_1}{\Delta h} + \frac{1}{2} \right], \quad (15.5)$$

де  $C_b$  і  $C_\sigma$  – коефіцієнти, що враховують вплив ширини і натягування смуги.

$$C_\sigma \cong 1 - \frac{2\sigma_0}{\sigma_\phi},$$

де  $\sigma_0$  – напруга заднього натягу.

Залежність  $C_b$  від відносини  $b_0/l$  приведена на рис. 15.9.

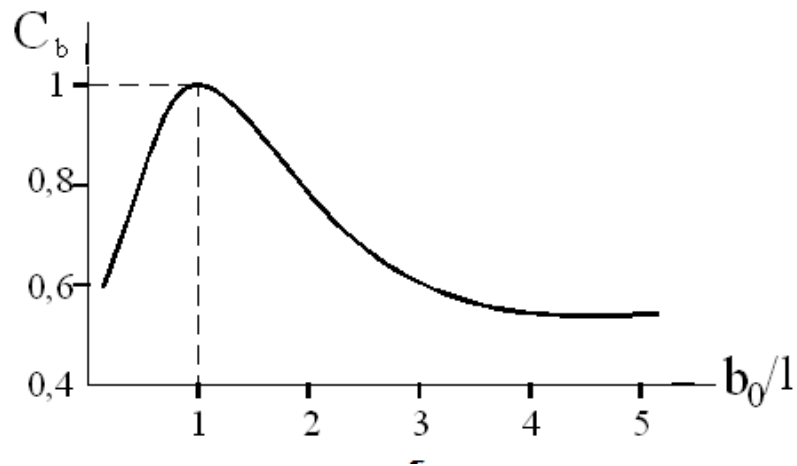


Рисунок 15.9 – Залежність  $C_b$  від  $b_0/l$

При  $b_0/l \geq 5$  ширина не робить ніякого впливу (експоненціальна крива).

Максимальне значення розширення має місце при  $b_0/l = 1$  (рис. 15.10). Це пов'язано з тим, що зона прагнення до розширення проникає на всю ширину смуги. У тому випадку, якщо ширина смуги, яка прокатується, стає більше довжини дуги захоплення, то тоді починають вступати в дію поздовжні напруження розтягування, що виникають по крайках смуги. Ці напруги знижують розширення до тих пір, поки не перестануть зростати (до  $b_0/l = 5$ ).

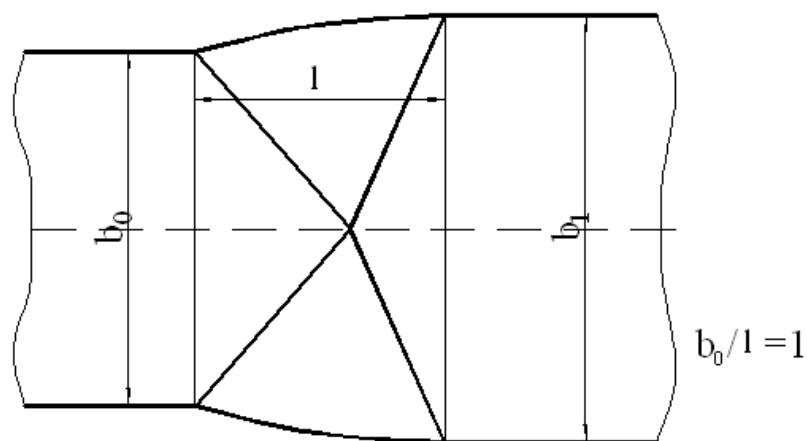


Рисунок 15.10 – Схема зон прагнення до розширення при  $b_0 = l$

Слід зазначити, що розширення, в основному, відбувається в зоні відставання, а величина його залежить від довжини зони випередження.

На величину розширення великий вплив робить заднє натягування. З ростом заднього натягування розширення зменшується. Переднє натягування надає мало впливу на розширення, оскільки розширення в основному відбувається в зоні відставання.

Прикладаючи заднє натягування, ми вирівнюємо швидкості периферійних шарів з середини (рис. 15.11).

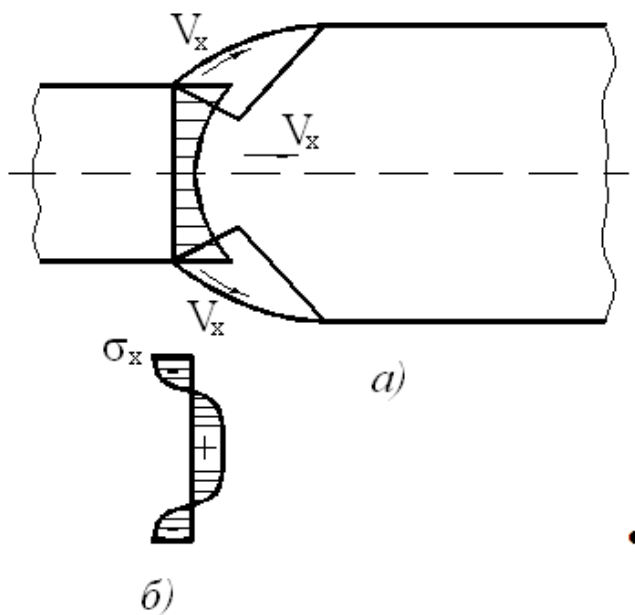


Рисунок 15.11 – Розподіл швидкостей (а) і напружень (б) по ширині смуги

На розширення дуже впливають зовнішні зони (рис. 15.12). При наявності обох зон розширення зменшується. Це пояснюється тим, що зовнішні зони вирівнюють швидкості центральних і периферійних шарів.

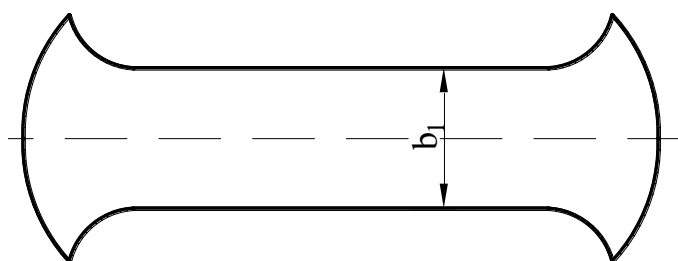


Рисунок 15.12 – Розширення на кінцях смуги

Формулу А. І. Целікова для оцінки розширення в даний час можна визнати найбільш точною і сучасною. Крім цієї формули, виведеної теоретично, існує велика кількість інших, переважно емпіричних, отриманих з грубими припущеннями.

1. Розширення пропорційно не всієї довжині дуги захоплення, а тільки зоні випередження:

$$\Delta v = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \left( \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) - \text{формула Бахтінова}$$

2. Розширення пропорційно довжині дуги захоплення і обтисненню:

$$\Delta v = C_{\Pi} \frac{\Delta h}{h_1} \sqrt{R\Delta h} - \text{формула Петрова}$$

де  $C$  – постійний коефіцієнт.