

## Лекція 1.

# МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ

### 1.1. Процеси ОМТ, як об'єкт дослідження

Обробка металів тиском (ОМТ) – багатогалузеве виробництво, яке включає крім прокатки й кування, гаряче об'ємне і холодне листове штампування та волочіння металів і сплавів. Загально – поєднуючими ознаками усіх процесів ОМТ є пластична деформація металевих тіл (заготівля) тиснучим технологічним інструментом (валками, бойками, пуансонами і стінками матриць оправок і волок). З боку технологічного інструмента до заготівлі прикладається зовнішня деформуюча сила, на протипагу якій діє, відповідно закону класичної механіки, рівна по величині і протилежно спрямована внутрішня сила опору метала деформації. В процесі деформації в зоні контакту технологічний інструмент знаходиться в пружному, а металеве деформуєме тіло в пружно-пластичному стані. Але в різних процесах ОМТ напруженість інструмента і пружно-пластичність металевого тіла суттєво відрізняються, наприклад, по причинах спричиненими формою інструмента.

За станом оброблюваних штаб (гарячі або холодні), тобто за температурними умовами процеси ОМТ поділяються на дві великі групи:

- гаряча ОМТ за температури деформує мого метала вищої від температури рекристалізації;
- холодна ОМТ за обробки при температурі навколишнього середовища (в літературі зустрічаються терміни – кімнатна температура, температура цеха).

Необхідно мати на увазі, що при обробці спеціальних сталей і сплавів із кольорових металів вирізняють теплу (напівхолодну і напівгарячу) ОМТ, яка все ж таки має досить обмежене використання тільки в окремих

специфічних випадках. Тому тепла ОМТ відноситься до спеціальних видів обробки.

Гаряча і холодна ОМТ в першу чергу відрізняються значними відмінностями витрат енергії на деформацію штаб, які для гарячої обробки значно менші, ніж для холодної. Це пояснюється тим, що гаряча деформація супроводжується зміцненням і знеміцненням металу, а холодна ОМТ – тільки зміцненням деформуємого металу, зі зниженням його пластичності при зростанні сумарної степені деформації.

Раціонально гаряча ОМТ проектується за принципом повторно-последовної черговості деформацій та пауз поміж ними. При цьому величина деформації має бути достатньою для пришвидшення рекристалізації, тобто знеміцнення металу в паузах [1], які в окремих випадках за часом не перевищують десятих долей секунди, наприклад на надшвидкісних прокатних станах і молотах. Схематично процеси утворення текстури обробки, тобто зміцнення металу, і рекристалізації, за якої відбувається знеміцнення і відновлення пластичності металу, ілюструється рис.1.1 [2].

Графік зміни опору деформації  $\sigma_\phi$  в осередку деформації і межі текучості штаби в між клітьовому проміжку [3] ілюструється на рис.1.2. Коли гаряча прокатка в листовій групі клітей сучасних БШШС ГП виконується на великих швидкостях, паузи на рекристалізацію і знеміцнення в міжклітьових проміжках складають соті долі секунди, що не дає можливості досягати повного знеміцнення металу [3,4].

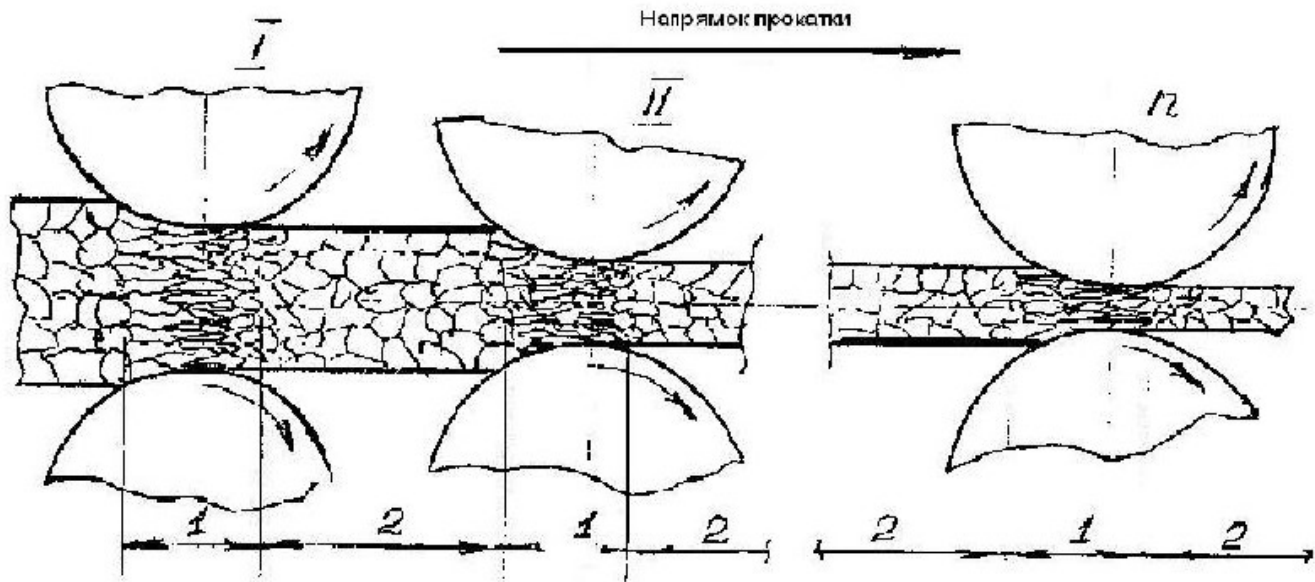


Рис. 1.1 Схема роздроблення зерен поміж валками та рекристалізації металу в паузах поміж клітями [2]: I, II, ..., n – порядковий номер кліті; 1-зони утворення текстури; 2 – зони рекристалізації

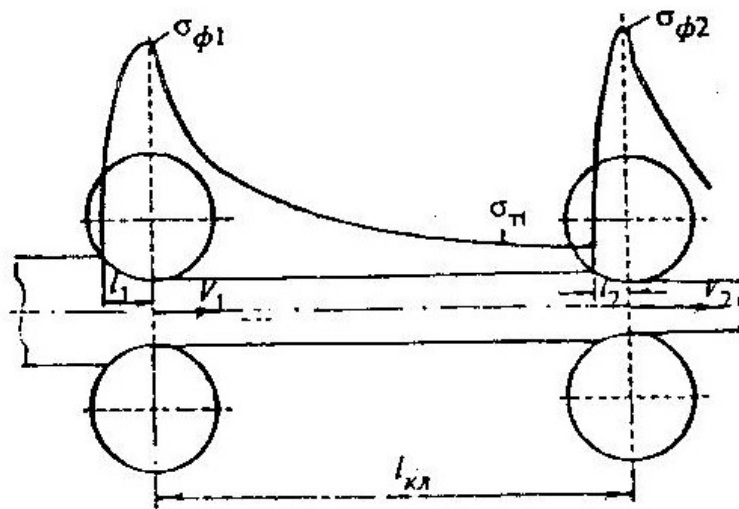


Рис. 1.2 Графік зміни опору деформації і напруження текучості матеріалу штаби при гарячій прокатці в двох суміжних клітках безперервного стану

В процесах холодної ОМТ і особливо під час холодної прокатки штаб метал знеміцнюється. Так по експериментальним даним Троценкова М.О. і Прищипа М.Г. при сумарному обтиску  $\varepsilon_z=70\%$  межа текучості  $\sigma_m$  для сталі 08кп і 1Х18Н9Т збільшується вдвічі [5]. Якісно аналогічні дані дещо пізніше

для всіх сталей і сплавів, які піддаються холодній ОМТ, були отримані А.В. Третьяковим і наведені в довіднику [6].

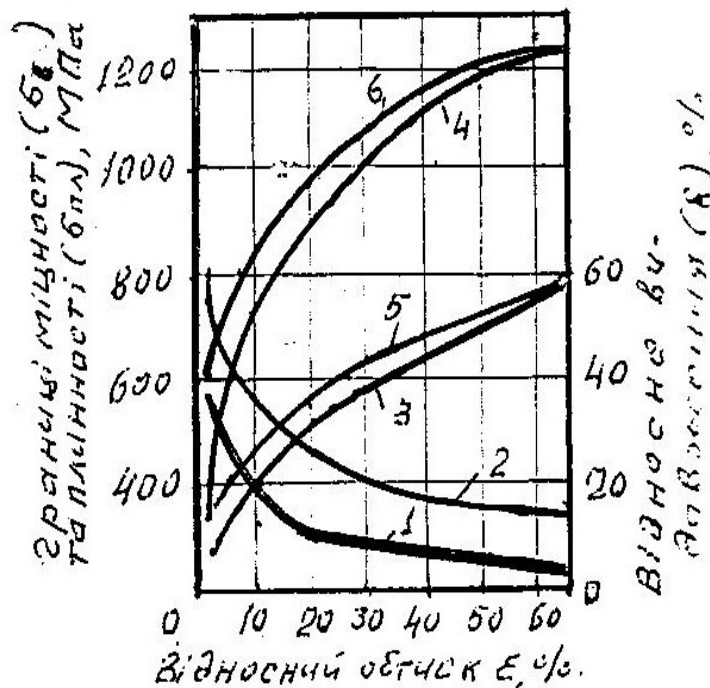


Рис. 1.3 Залежність механічних властивостей сталі 08кп (1 –  $\sigma$ ; 3 –  $\sigma_{пл}$ ; 5 –  $\sigma_v$ ) та 1X18H9Т (2 –  $\sigma$ ; 4 –  $\sigma_{пл}$ ; 6 –  $\sigma_v$ ) від відносного обтиску ( $\epsilon$ , %) при холодному прокатуванні

Найбільш поширеним способом ОМТ є прокатка, за допомогою якої близько 90% виплавляємих сталей і сплавів переробляють на металовироби. В теорії і практиці розрізняють і класифікують процеси прокатки за наступними ознаками:

- за взаємо-розташуванням осей деформуємого тіла і валків прокатки може бути поздовжньою, поперечною або поперечно-гвинтовою (косою);
- за зміною розхилу (зазору) поміж валками процес прокатки може бути стаціонарним або періодичним;
- за наявністю сил, прикладених до зовнішніх кінців штаби (поза осередком деформації) розрізняють прокатку вільну (без сил,

діючих на кінці штаби) та невільну (з натягом або підпором). Невільна прокатка по суті є безперервним процесом, за якого деформація штаби одночасно виконується в двох і більшій кількості послідовно розташованих клітей стана;

- на сам кінець за температурою деформуємого металу прокатки може бути гарячою, холодною і в окремих випадках теплою. Гаряча прокатка більш поширена і економічно вигідна для виробництва штаб і профілів з відносно великими поперечними перетинами. Тонкі штаби отримують холодною прокаткою, тонкостінні труби – холодною прокаткою і волочінням, дроти малих діаметрів – холодним волочінням.

За формою поперечних перетинів металовиробів поздовжня прокатка поділяється на листову і штабову прокатку (в валках з гладкою або близькою до циліндрів формою бочок) і сортову в каліброваних валках. Труби також прокатують в каліброваних валках. Процеси прокатки на гладкій і каліброваній бочці показані на рис. 1.4. Слід зауважити, що 100% листів, штаб та абсолютна більшість сортових профілів прокатують поздовжньою прокаткою.

Поздовжню прокатку в валках з гладкою бочкою називають «простим процесом прокатки». Ліва частина наукових і експериментальних досліджень виконується з використанням моделей простої прокатки. Наприклад, всі визначення та виведення формул в «Теорії прокатки» виконані на геометричній моделі перетину осередка деформації простого процесу прокатки.

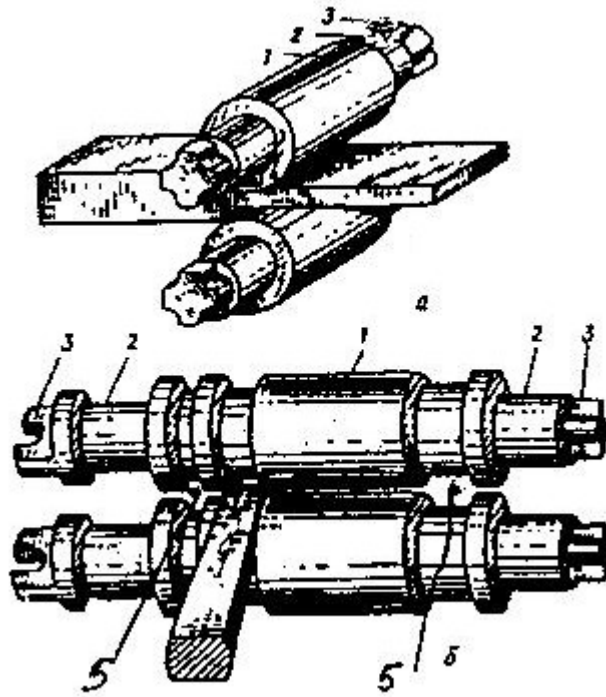


Рис. 1.4 Прокатка на гладкій (а) і каліброваній бочці (б); 1 – бочки валків; 2 – шийки валків; 3 – трефи; 4 – прокатувана штаба; 5 – калібри

## 1.2. Науково – теоретичні дослідження

Перші дослідження та розробка наукових основ процесів ОМТ були розпочаті в середині 19го століття. Таким чином, теорія процесів ОМТ відносно молода наука, яка поділяється на дві частини «Теорія процесів прокатки» та «Теорія кування, осадки, пресування і холодної штамповки». Дещо відокремлена «Теорія волочіння». Найбільш розробленого є «Теорія процесів прокатки», яка створювалася і розвивалась як наукова дисципліна паралельно з розробкою машин і технологій прокатки. Розвиток цієї науки стимулювався стрімким збільшенням попиту на прокатну продукцію та її виробництво.

Проектування нових прокатних станів вимагали знань про закономірності протікання технологічних процесів, вимагали також розробок моделей і алгоритмів по визначенню деформаційних, температурно-швидкісних та енергосилових параметрів. Ці знання в свою чергу адаптувались до конкретних умов і розрахунків і оптимізації конструктивних

параметрів прокатних станів. Теорія прокатки та інших процесів ОМТ базується на математичній теорії пружності і пластичності, механіці суцільних середовищ і фізиці металів, теоретичній механіці та теорії пластичної деформації металів.

Великий вклад в розвиток і становлення теорії ОМТ і прокатки, як науки, внесли вчені Н.С. Верещагін, А.Ф. Родзевіч-Белевич, А.П. Виноградов, С.І. Губкін, О.І. Целіков, А.П. Чекмарев, С. Фінк, К. Кодрон, В. Тафель, Е. Зібель, Т. Карман, С. Екелунд, В. Трінкс, В. Люег, А. Помп, Е. Орован, Г. Форд, Р. Сімс, М. Стоун, Ш. Гелеї та інші.

Завдяки значності і очевидним перевагам процесів поздовжньої прокатки теорія поздовжньої прокатки займає особливо цільне місце в загальній теорії процесів ОМТ і пластичної деформації і відіграє провідну роль в розвитку цих наук. Кінцевою метою задач, які вирішуються методом теорії процесів поздовжньої прокатки, є створення наукових методів і відповідаючим їм методик, алгоритмів, моделей і програм для їх реалізації. Це дає можливість виконувати з високою достовірністю і точністю прогнозування та розрахунки режимів обтисків, швидкостей, температурного поля, сил, моментів і потужності прокатки. На базі визначення цих параметрів проектуються нові прокатні стани, технологічні лінії, цехи і комплекси.

В теорії поздовжньої прокатки розроблені але продовжуються дослідження наступних питань:

- геометрія осередку деформації;
- умови контактного тертя та достовірність і характер розподілу напружень тертя на контакті метал-валки, алгоритми і моделі визначення коефіцієнтів тертя і умови захвата метала валками;
- кінематика поздовжньої течії металу;
- співвідношення поміж поздовжньою і поперечною деформаціями при заданій висотній деформації;
- визначення температурного поля прокатки в просторі і часі;

- розподіл напружень і деформацій в деформуємому об'ємі тіла;
- визначення границі текучості і опору метала деформації;
- особливості усіх вищезначених параметрів, умов і закономірностей в процесах прокатки в калібрах;
- визначення енергосилових параметрів процесу прокатки на гладкій бочці в калібрах, натягом метала та з урахуванням пружних деформацій валкового вузла та інших деталей прокатної кліти: сили прокатки, обертаючих моментів на валках, витрат роботи і потужності;
- визначення параметрів прокатки до різних умов не симетрії процесів.

Для підвищення конкурентоспроможності прокатної продукції в останні роки основними шляхами є зменшення витрат ресурсів та підвищення якості металовиробів, в тому числі точності розмірів. Виходячи з цього важливими є розробки теорії і практики процесів суміщення безперервного розливу і прокатки, прокатки різної сталі в обертаємих кристалізаторах – валках; також теорій планетарної та високоточної прокатки. Таким чином, теорія прокатки і теорія процесів ОМТ є динамічними, безупинно розвиваємими науками, які опираються на досягнення математики, фізики та інших фундаментальних наук. Доволі широке застосування в теорії ОМТ і в теорії прокатки, мають місце чисельні методи, наприклад при вирішенні задач теорії пластичності, а також методи математичного і фізичного моделювання, які стали можливими завдяки застосуванню комп'ютерів, мікропроцесорів та відповідного програмного забезпечення.

### **1.3. Роль гіпотез і припущень в теорії ОМТ**

Теорія процесів ОМТ включно з теорією поздовжньої прокатки є відносно молодою наукою. Лише за останні 100 років накопиченні знання і розроблені теоретичні моделі, що дозволяють визначити якісно вірно, а в



багатьох випадках і кількісно з достатньою точністю визначити основні параметри того чи іншого процесу. Теоретичні моделі розрахунків основних параметрів розробляють на базі гіпотез і припущень і спрощень. Для ілюстрації цього розглянемо еволюцію розвитку теорії розподілу контактних нормальних напружень по довжині осередку деформації. Ця теорія дозволяє збудувати епюру нормального напруження, геометричними методами віднайти центр вагомості і точно визначити момент, необхідний для обертання валків під час прокатки штаби.

Вперше ще в 1859 р. Грасгоф і Кодрон запропонували гіпотезу, згідно якої питомий тиск  $\rho$  має максимальну величину на початку дуги захвата та зменшується до нуля по прямій до перетину виходу металу із валків (пряма 1 на рис. 1.5.).

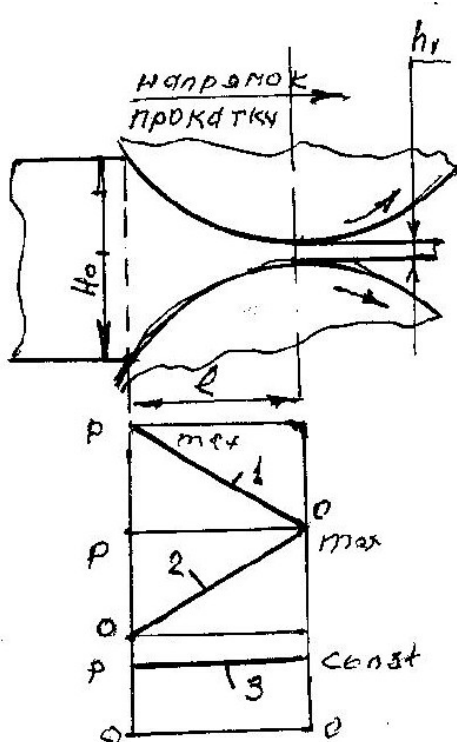


Рис. 1.5 Розподіл питомого тиску

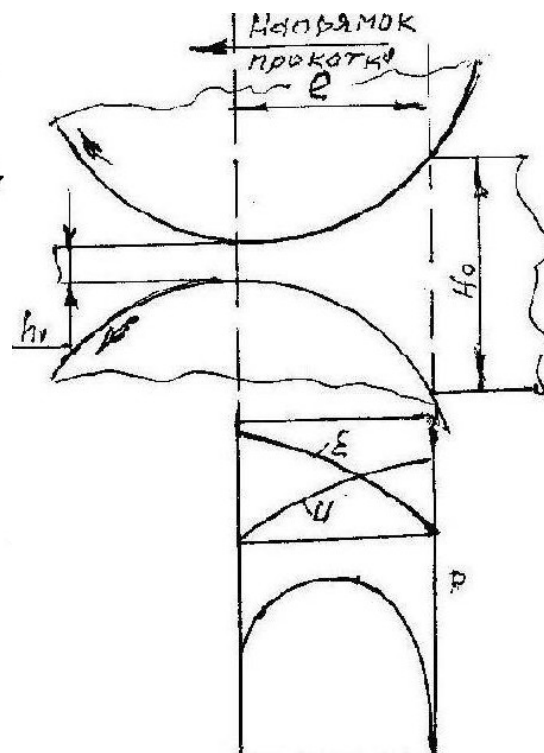


Рис. 1.6 Розподіл питомого тиску

$\rho$

$\rho$  по довжині осередка деформації  $l$

по довжині осередка деформації  $l$

за гіпотезами: 1 – Грасгофа і Кодрона;

за гіпотезою Родзевича -

Белевича.

2 – Бласса; 3 – Фінка

Дещо пізніше Бласс запропонував гіпотезу прямолінійного зростання  $\rho$  від нуля на вході метала в осередок деформації до  $\max$  – на виході із валків (рис.1.5 - пряма 2). За гіпотезою Фінка питомий тиск  $\rho$  у всіх точках дуги контакту залишається незмінним (рис. 1.5 - пряма 3). В 1913 р. Родзевич – Белевич висловив припущення, згідно якого питомий тиск вздовж осередка деформації змінюється в результаті сумісної дії двох факторів: ступінь деформації  $\varepsilon$  збільшує питомий тиск  $\rho$  до перетину виходу метала із валків, а швидкість деформації  $U$  навпаки – зменшує його (рис. 1.6). В 1925 р. Теодором фон Карманом було виведене диференціальне рівняння прокатки, в якому взаємопов'язані параметри осередку деформації, питомі сили тертя і нормального тиску та опору метала деформації. В сучасному трактуванні диференційні рівняння прокатки, осадки та інших процесів ОМТ отримують сумісним рішенням рівнянь рівноваги подовжніх сил при двомірній деформації та рівняння пластичності. При цьому приймаються деякі допущення, наприклад, для двомірної прокатки приймають допущення:

1. Напруження в будь-якому поперечному перерізі по висоті штаби розподіляється рівномірно.
2. Деформація є плоскою, тобто поперечна деформація (розширення штаби) відсутнє.
3. Напруження по ширині штаби не змінюються.

В сучасній трансформації диференціальне рівняння прокатки (рівняння рівноваги) представляють у вигляді:

$$dp = \left( \sigma_{\phi} \pm \frac{t}{tg\phi} \right) \frac{dh_x}{h_x} \quad (1.1)$$

Рівняння (1.1) справедливе за припущення, що опір деформації  $\sigma_{\phi}$  по довжині осередка деформації приймається усередненим  $\sigma_{\phi op}$  і залишається незмінним. Змінні  $\phi$  і  $h_x$ , що ілюструється рис. 1.7 по суті є координатами переміщеної точки на контактні штаби з валками. Фізична суть рівняння (1.1) полягає в тому, що диференціальне рівняння прокатки ілюструє приріст

контактного нормального напруження  $\rho$  при переміщенні точки по довжині дуги контакту.

Умовно точні вирішення рівняння (1.1), яке має два невідомих  $p$  і  $t$ , призводять до громіздких виразів, кінцеві формули є складними для практичного застосування. Тому знову для розв'язання рівняння (1.1) приймають той чи інший закон тертя та деякі спрощення.

Найбільш відомими є рішення Т. Кармана, Е. Зібеля, А. Надаї, О.І. Целікова, О.П. Чекмарьова, Бленда, Орована, Форда, Сміта та інших. Для найбільш характерних рішень білу прийнято наступні закони тертя:

- закон сухого тертя  $t = f\rho$  біло використане Карманом, незмінність сил тертя за законом пластичного тертя  $t = f_n \sigma_\phi$  – Зібелем, закон рідинного тертя –  $t = r \left( \frac{ds}{dy} \right)$  - Надії. Ці рішення виконані за припущення наявності в осередку деформації тільки з відставанням і випередженням.

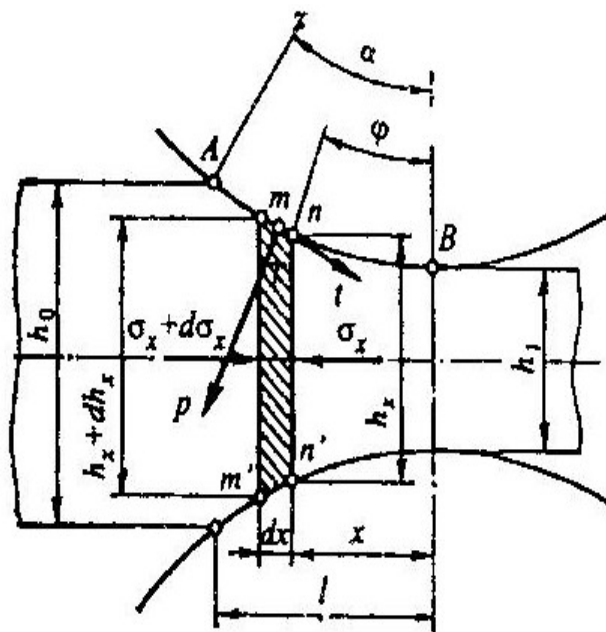


Рис. 1.7 Схема до виведення диференціального рівняння рівноваги подовжніх сил при прокатці

О.І. Целіков при розв'язанні рівняння (1.1) додатково прийняв спрощення замінивши дугу контакту штаби і валків хордою, Сміт – кривою у

вигляді параболи. Вперше рівняння (1.1) з використанням теорії Орована розв'язав Джортнер, виключивши припущення абсолютної жорсткості валків. Тобто він взяв до уваги пружну деформацію валків і штаби. Аналогічні методи використання сумісного рішення диференціальних рівнянь рівноваги сил, діючих на елементарний об'єм (пластину) і рівняння пластичності Губера – Мізеса, використовується також для теоретичного аналізу та визначення нормальних напружень при осадці (формули Зібеля, Губкіна та ін..) та в інших процесах ОМТ. Для кожного процесу апріорі приймають ті чи інші припущення та спрощення, що дозволяє отримувати прості, надійні і доволі точні моделі для розрахунку силових і енергетичних параметрів деформації металів різними способами. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням точкових месдоз дали змогу судити про адекватність рішень рівняння (1.1) різними науковцями. Як теоретичними рішеннями, так і експериментально встановлено, що розподіл нормальних напружень на контакті валків зі штабою залежить від фактора форми осередка деформації  $l/h_{cp}$ . На рис.1.8. приведені типові епюри розподілу нормальних напружень  $\rho$  по довжині осередку деформації  $l_i$  для різних процесів прокатки:

а – під час прокатки товстих штаб при малих значеннях параметра  $l/h_{cp} < 0,6 - 0,8$ ; коли максимум  $\rho$  на епюрі розташований майже на вході метала в осередок деформації;

б – для випадків прокатки за параметра  $l/h_{cp} = 0,8 - 1,5$ , тобто для процесів деформації штаб середньої товщини;

в – для прокатки тонких штаб за  $l/h_{cp} > 3 - 4$ , коли епюра має характерний пік поблизу нейтрального перерізу осередка деформації.

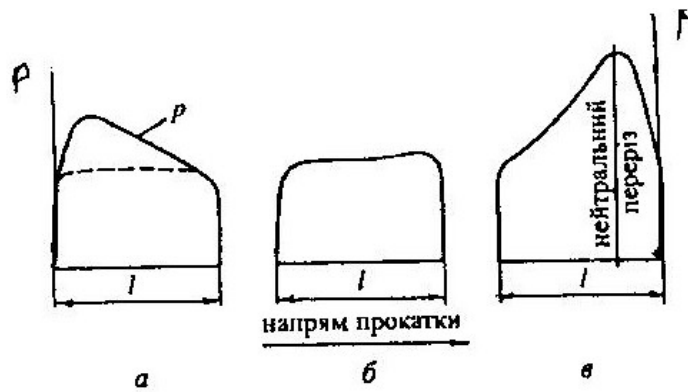


Рис. 1.8 Епюри розподілу нормальних напружень по дузі контакту метала з валками в процесах прокатки товстих(а), середніх(б) і тонких(в) штаб

В сучасній теорії поздовжньої та інших способів прокатки, осадки, пресування, волочіння та інших видів обробки металів тиском апріорі застосовують такі припущення і спрощення:

- деформація є плоскою, тобто здійснюється без поперечної деформації;
- напруження в будь-якому поперечному перерізі по висоті штаби розподіляється рівномірно;
- напруження текучості по довжині осередку деформації є величиною постійною;
- для умов гарячої ОМТ матеріал інструмента (наприклад валків) і штаби не володіє пружними властивостями;
- напруження тертя  $t$  пропорційні контактним напруженням  $\rho$  (закон Амонтона) або опору метала деформації  $\sigma_\phi$  (закон Зібеля);
- контактні нормальні напруження  $\rho$  і тертя  $t$  розподіляються по дузі (хорді, параболі, прямій лінії) контакту метала з технологічним інструментом рівномірно;
- деформація металу є рівномірною;
- вплив поза контактної деформації не враховується.

Застосовують також і інші допущення, наприклад, для процесу холодної прокатки штаб приймають додатково [7]:

- прокатуємої штаба є суцільним тілом без змінювання об'єму (без ущільнення);
- напруження текучості по довжині осередка деформації змінюються за прийнятим законом зміцнення метала;
- умови технологічного змащування такі, що коефіцієнт тертя по довжині дуги контакту лишається незмінним;
- випередженням метала в осередку деформації нехтують;
- розтягуючі напруження, діючі в штабі, зменшують напруження стискування на кінцях осередка деформації у відповідності з теорією максимального зсуву Треска;
- термічні ефекти від розігріву метала під час деформації не враховуються.

Незважаючи на те, що будь-яке спрощення і допущення призводить до зниження точності теоретичних рішень, їх, як висвітлено вище, широко застосовують в науково-теоретичних дослідженнях. Без перерахованих вище допущень теоретичні моделі виявляються надто складними, як у фізичному так і в математичному сенсі. З іншого боку, кожне допущення не повинно спотворювати фізичної суті явища або процесу.

Таким чином кожне спрощення і апріорі приймаєме допущення повинні мати наукове та фізичне обґрунтування, а похибки, що ними вносяться в кінцевий результат, повинні бути прийнятними.

#### **1.4. Аналіз інформації та постановка задачі дослідження**

Наукова інформація поширюється та викладається в монографіях, науково-технічних журналах, звітах та оглядах по науково-дослідницьким роботах, в дисертаціях та Інтернеті.

В процесі збирання та аналізу інформації досліднику важливо поглибити свої знання, тобто розширити свою поінформованість щодо тематики конкретної чисто наукової або науково-прикладної проблеми. Аналіз несистематизованою наукової інформації призводить до того, що

дослідник захлинається в потоці хаотичної та велико-об'ємної за обсягом інформації. Тобто, наукові дослідження взагалі неможливі без системного підходу до її виконання. Щоби звільнити набраний масив аналітичних даних від надлишкової і не першочергово важливої інформації спочатку її необхідно «згустити» (ущільнити). Звільнену від «шумовиння» ущільнену інформацію за попередньо обраною стратегією наукового пошуку систематизують, програмують і т.п. та представляють у вигляді аналітичного огляду, підсумкових таблиць, матриць, алгоритмів, моделей і т.п. Пояснимо вище викладене на конкретному прикладі: в процесах холодної прокатки холоднокатаних штаб на безперервних і повністю безперервних станах під час гальмувань і прискорень (ділянок штаб зі зварних швах) натяг метала поміж клітями різко змінюється таким чином, в перехідних неусталених процесах холодної безперервної прокатки з'являється ряд збурень, які дестабілізують процес. Так при зменшенні натягу метала нижче критичної межі штаба втрачає поперечну сталість, що призводить до розшматування метала і аварійних ситуацій. В більш легкому варіанті зменшення натягу призводить до збільшення товщини штаби, її хвилястості або короб частості. Збільшення натягу призводить до пориву штаби як по шву, так по цілому металу. При цьому збурення, виникаючі в одному поміжклітьовому проміжку, поширюються по всій технологічній лінії стана, завдяки закону саморегулювання неперервних станів. Очевидно, що необхідно віднайти параметри, змінюючи які, з'являється можливість швидко стабілізувати величину натягу метала та усталити процес прокатки навіть в перехідних режимах роботи. До цього всю інформацію щодо натягу метала ущільнюють, виділяють найбільш впливові щодо натягу збурення (впливи) і представляють їх у вигляді таблиці, матриці або моделі. Приклад для найпростішої технологічної лінії три клітьового безперервного стана приведено в таблиці 1.1.

В таблиці 1.1 умовні позначення:  $\Delta$  - змінювання;  $V$  - швидкість;  $h$  - товщина;  $T$  - натяг; 12 – проміжок між клітями 1,2; 23 – теж саме поміж

клітьями 2,3; 3 – після кліті 3. Ущільнена у вигляді таблиці 1.1 інформація дозволяє зробити такі висновки:

- регулювання будь-якої кліті в формі зміни розхилу поміж валками і швидкості прокатки призводить до змінювання натягу штаби в поміж клітьових проміжках безперервних станів;
- при двох випадках сумісної дії факторів  $(\Delta V/V)$  і  $(\Delta h/h)$  змінювання натягу метала  $\Delta T$  в кожному міжклітьовому проміжку в дев'ятнадцяти випадках однозначне («+» або «-») і в п'яти – невизначене («±») або двозначне;
- при цьому зміна товщини  $\Delta h$  в дев'яти варіаціях  $(\Delta V/V)$  і  $(\Delta h/h)$  однозначна («+» або «-») і в трьох випадках – двозначна («±»).

Таблиця 1.1 Якісне змінювання («+» значить збільшення; «-» значить зменшення; «±» можливість того й іншого) поміж клітьового натягу і кінцевої товщини штаби на три клітьовому безперервному стані

Кліть	Змінювання параметрів процесу	$(\Delta V/V) \gg (\Delta h/h)$			$(\Delta h/h) \gg (\Delta V/V)$		
		$\Delta T_{12}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta h_3$	$\Delta T_{12}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta h_3$
1	Швидкості	-	-	+	-	±	+
2	-II-	+	-	±	+	-	-
3	-II-	+	+	-	-	+	±
1	Розхилу поміж валками	±	+	+	±	±	+
2	-II-	+	±	+	+	+	-
3	-II-	+	+	±	-	+	+

За рахунок десинхронізації швидкість виходу метала із попередньої кліті  $V_1$  і входу в наступну кліть  $V_2$  швидкість збільшення або зменшення сили натягу штаби  $T$ , тобто швидкість змінювання натягу  $dT/dt$  поміж клітьями 1 і 2 в області пружної деформації дорівнює:

$$dT/dt = (B_1 h_1 E / L_{12})(V_2 - V_1) \quad (1.2)$$

де  $B_1$  і  $h_1$  – товщина і ширина штаби на виході із кліті 1;

$E$  – модуль пружності матеріалу штаби;



$L_{12}$  – відстань поміж площинами виходу метала із осередка деформації кліті 1 і входу – в осередок деформації кліті 2;

$V_1$  і  $V_2$  – швидкості відповідно виходу метала із валків кліті 1 та входу в валки кліті 2.

Очевидно, що збільшення  $V_1$  при  $V_2 = \text{const}$  зменшує  $T$  і навпаки. Очевидно також, що систематизована інформація дає можливість визначити задачу дослідження в конкретизованому формулюванні.

Розглянемо конкретний приклад, який базується на попередньому прикладі: із таблиці 1.1. видно, що поздовжню різнотовщинність  $\Delta h_3$  можливо однозначно зменшувати тільки збільшенням натягу штаби поміж клітями та зменшенням розхилу (зазору) поміж валками. Як видно із попереднього прикладу збільшення натягу обмежується міцністю штаби поміж клітями, тобто умовою безперервної прокатки. З іншої сторони, регулювання різнотовщинності змінюванням натягу виконується більш оперативно (майже без запізнення), порівняно з регулювання зміною розхилу поміж валками. Таким чином задача дослідження по зменшенню поздовжньої різнотовщинності зводиться до регулювання натягу штаби поміж клітями в межах: утрата поперечної сталості і форми – руйнація внаслідок пориву метала як по цілому так і по зварному шву. В цілому задачу можна сформулювати так «Дослідження та оптимізація натягу метала з метою оперативного регулювання точності прокатки» .

Умови науково-дослідницької роботи визначаються в загальному випадку по результатам аналітичного огляду. В умовах мають бути описані діюча технологія, її рівень порівняно з найсучаснішими аналогами, в тому числі і на стадіях проектування; найсуттєвіші недоліки технологій. Очевидно, що назва прикладної НДР має відображати предмет (процес, явище, технічна система, технологія, параметр, фактор і т.п.) дослідження та кінцеву мету. Це дозволяє попередньо визначити стратегію і тактику проведення НДР. Під стратегією розуміють ланцюг: проблема, внутрішні протиріччя, зовнішні збурення, розробка заходів по їх усуненню, отримання

бажаного кінцевого результату. Під тактикою ведення НДР будемо розуміти план поетапного виконання НДР.

### **1.5. Види та напрямки НДР**

За методологією та технікою виконання науково-дослідницькі роботи хоча й дещо умовно поділяються на види:

*Теоретичні дослідження, аналізи та узагальнення* виконують для вивчення, поглиблення та розширення визначаючи методами математики, принципіві можливості обраного напрямку шляхом аналізу або попередньо відомих або апріорі гіпотетично прийнятих закономірностей. В багатьох випадках аналізується експериментальні дані. На базі аналізу, системного підходу та узагальнень пропонуються гіпотези, нові теоретичні положення, формули і моделі.

Одним із яскравих прикладів вищесказаного є еволюція наукових гіпотез по розподілу контактних напружень по довжині осередку деформації (див. п.1.3). Так широко застосовуване спрощення по рівномірному розподілу контактних напружень в осередку деформації вперше спростував В. Луег, який провів заміри напружень за допомогою п'єзоелектричної мес дози, вмонтованої в валок. Результати цих досліджень були опубліковані в 1933 р. В пізніших дослідженнях розподіл напружень в осередку деформації визначали більш досконалыми способами. Так, експериментальні виміри напружень за допомогою трьох штифтових месдоз підтвердили гіпотезу про наявність в осередку деформації крім двох зон ковзання третьої - зони прилипання, яка розміщена поміж зонами відставання та випередження. Деякі основні положення теоретичних досліджень розглянуті в п.п. 1.2 і 1.3.

*Експериментальні дослідження*, які в свою чергу, поділяють на лабораторні, напівпромислові, промислові і комбіновані. Характерним прикладом оригінальних експериментальних досліджень на відносно не великих лабораторних станах був запропонований в 1937 р. Г.Т.Ван Ройеном і В.А. Бакофеном метод похилих точкових месдоз. Слід зауважити, що в 1938р. незалежно від вище названих дослідників, О.П. Чекмарьов, В.П.

Клименко і Л.Є. Каптуров в лабораторії ОМТ ДМеті запропонували конструкцію і провели прямі експериментальні виміри по розділу напружень тертя на контактній поверхні метал-валок в осередку деформації в процесі прокатки. Сутність методу пояснюється рис.1.9. Термін «точкова месдоза» відображає те, що кінчик сило вимірювального штифта, який входить в контакт з металом на поверхні валка має малий діаметр  $\approx 1.2$  мм (рис. 1.9, б). Із рис. 1.9, а видно, що в тілі валка проточують три циліндричні канали: один по нормалі, а два інші нахилом до нормалі під кутами  $\Psi_1$  і  $\Psi_2$ , причому  $\Psi_1 = \Psi_2$ . У відповідних каналах монтують мес дози  $M_3$ ,  $M_1$  і  $M_2$ .

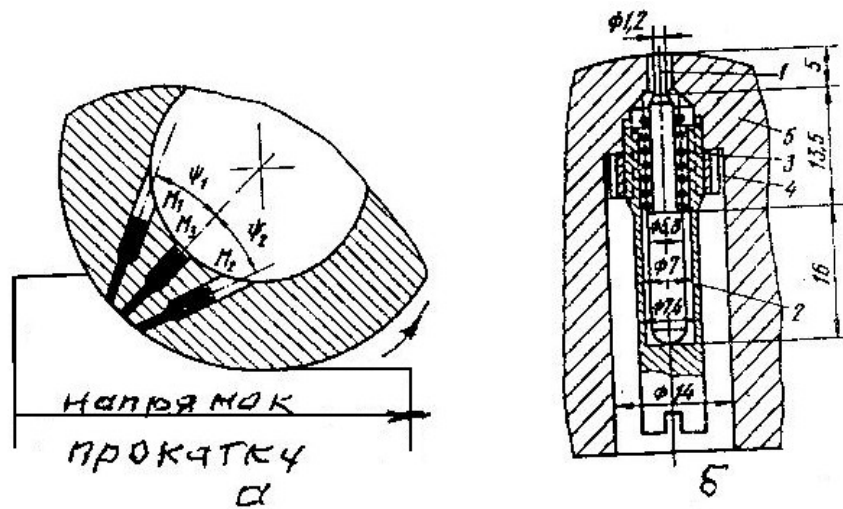


Рис. 1.9 Схема установки точкових радіальної і похилих месдоз в каналах прокатного валка (а); конструкція та монтаж штифтової месдоз (б);  
1 – штифт; 2 – стакан; 3 – пружина; 4 – контргайка; 5 – фрагмент тіла бочки валка

По записаних на осцилограмі значеннях сил  $M_1$ ,  $M_2$  і  $M_3$  у подовж осередку деформації визначають подовжню силу тертя  $T$ , а потім напруження тертя  $t$  в будь якій точці на дузі контакту метала з валком.

Для переходу від сили тертя  $T$  до напруження тертя  $t$  користуються схемою сил, що діють на штифт похилої мес дози (рис.1.10).

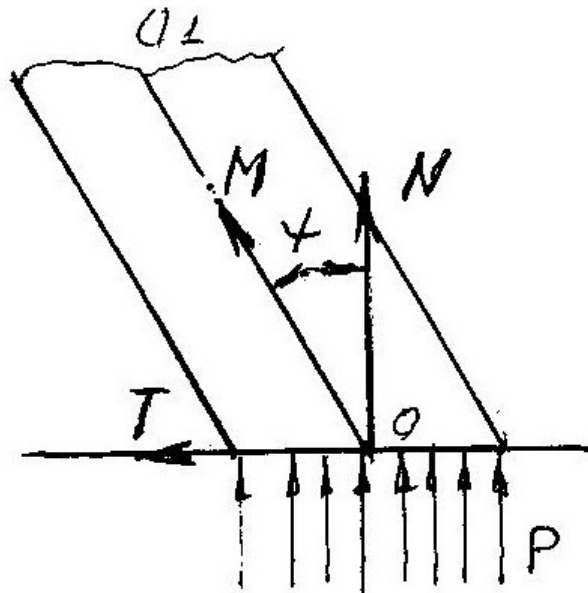


Рис.1.10 Схема сил, діючих на штифт похилої точкової мес дози

Для переходу від сил  $N$  і  $T$  до нормальних напружень  $\rho$  і напружень тертя  $t$  спроектувавши сили  $N$  і  $T$  на вісь штифта  $001$ , складають рівняння рівноваги:

$$M = N \cdot \cos \Psi + T \sin \Psi \quad (1.3)$$

Приймаючи напруження  $\rho$  і  $t$  рівними середнім питомим силам, рівняння (1.3) приймає вид:

$$q F_w = \rho \frac{F_w}{\cos \Psi} + t \frac{F_w}{\cos \Psi} \sin \Psi \quad (1.4)$$

де  $F_w$  і  $q$  - відповідно площа поперечного перерізу та поздовжнє напруження в штифті;

$\rho$  і  $t$  - відповідно напруження нормальне і тертя на площадках (в точках) контакту штифта зі штабою.

Після скорень із (1.4) отримують, що:

$$t = (q - \rho) / \tan \Psi \quad (1.5)$$

Крім подібних задач наукового характеру лабораторними дослідженнями отримують дані по макро- і мікроструктурі, властивостям (міцності та пластичності), технологічності та змінюванні якості сталей і сплавів при деформації тим чи іншим способом ОМТ. Так, приклад, випробування зразків металів і сплавів на пластометрі дозволили розробити

достовірну модель визначення опору метала деформації для гарячої ОМТ за методом базової границі текучості і термомеханічних коефіцієнтів.

За достатньої потужності лабораторних установок експериментальні дослідження спрямовані на вдосконалення окремих параметрів і навіть розробку нових технологічних процесів, технологічного інструмента і конструкцій технологічних агрегатів. За цих умов використанням поетапних методів, наприклад за схемою:

- створення математичної моделі, її апробація, уточнення та вдосконалення;
- перевірка та адаптація математичних закономірностей на напівпромисловій моделі прокатного стана, преса, волочильної установки і т.п.;
- розробка плану апробації експериментально отриманих параметричних, технологічних та інших закономірностей на діючих промислових агрегатах і технологічних лініях;
- за необхідності розробка і видача завдання на проведення проектних робіт;
- виконання проекту;
- виготовлення та монтаж обладнання;
- пусково-налагоджувальні роботи;
- введення в експлуатацію.

З використанням такої ж послідовності з корекцією виконуються і комбіновані дослідження: НДР + ДКР (науково досліджувані + дослідно-інструкторська роботи).

Промислові дослідження виконуються безпосередньо в діючих металургійних цехах ОМТ, прокатних, ковальсько-пресових і волочильних. За методологією виконання промислові дослідження поділяють на пасивні і активні. Пасивні експерименти проводяться з метою збирання даних по технологічним параметрам та якості продукції, систематизація та статистична обробка даних. Прикладом пасивного експерименту є

визначення кількості відсортування гарячих листів по дефекту «вкатана окалина» в залежності від вологості або температури атмосфери цеху.

Активний промисловий експеримент передбачає наперед заплановані змінювання технологічних параметрів. Прикладом активного експерименту є дослідження визначення кількості відсортування гарячекатаних листів по дефекту «вкатана окалина» в залежності від параметрів роботи установок гідравлічної руйнації, збивання та змиву окалини: тиску води, відстані поміж соплами і поверхнею штаби, швидкістю прокатки, температури.

Таким чином більшість експериментальних досліджень наукового спрямування виконуються в лабораторіях, а прикладного характеру – на напівпромислових і промислових агрегатах. Слід також зазначити, що деякі експериментальні дослідження можливо виконувати тільки на діючих промислових агрегатах. Наприклад, вивчення зносостійкості та закономірностей спрацювання валків, можливо достовірно дослідити тільки на конкретному прокатному стані в умовах його промислової експлуатації.

### **1.6. Основні етапи дослідження**

Якісне виконання НДР можливе за системного підходу до її планування та виконання. Технологічний процес та результати цього реалізації у вигляді металовиробів залежать від безлічі діючих на об'єкті дослідження факторів. Наприклад, якість прокатуємих профілів визначається такими основними факторами:

- якість поверхні залежить від окалино утворення, способів видалення окалини, якості поверхні заготівлі та способів видалення поверхневих дефектів, якість робочих поверхонь технологічного інструмента, наприклад, змащування бочок прокатних валків і т.д.;

- якість за вимогами по структурі, по механічних (міцність і пластичність) та технологічними властивостями (твердість, штампуємість, ударна питома робота руйнування або ударна в'язкість) залежить від хімічного складу сталі або сплаву та швидко-температурного поля

деформації, наприклад, температур початку і кінця прокатки та режиму охолодження штаб, труб і сортових профілів. Такими ж багатofакторно залежними від параметрів виробничих процесів є і інші показники якості, а також продуктивності, сталості технології, економічності, безшкідливості. Недостатня кількість факторів впливу, обраних для дослідження, може призводити до неадекватних, тобто помилкових результатів. З іншого боку, безліч факторів впливу та кількості спостережень і вимірів навіть з використанням мікропроцесорів, комп'ютерів і ЕОМ не дають змоги систематизувати безодню інформації. Очевидно, що етап інформаційного забезпечення дослідження складається із таких стадій:

- вибір і формулювання теми науково-дослідної роботи(НДР);
- попереднє ухвалення конкретної мети НДР;
- вивчення стану питань;
- теоретичні дослідження.

Вибір та формулювання теми повинні відображати актуальність, новизну, характер та сутність НДР. Цінність дослідження полягає не в широті та неосяжності вирішуваних задач і питань, а в акуратності, сталості, достовірності та точності розв'язку поставленого кола проблем. Вірне кваліфіковане та конкретизоване ухвалення та прийняття цільової задачі (мети) НДР значною мірою визначає успішний розв'язок поставлених задач.

Розв'язок задачі розпочинається з вивчення стану досліджуваної проблеми. Для цього проводиться збір та аналіз інформації, які розглянуть в п.1.4.

На слідуєчому етапі проводять теоретичні дослідження, які виконуються або паралельно або опісля аналізу наукової інформації. Якщо задача НДР є піонерською, а науково-технічна інформація або обмежена або відсутня, то необхідно вивчити методи розв'язання таких задач. На думку авторів в першу чергу необхідно відпрацювати кінцеву робочу гіпотезу, тобто форму сконцентрованого обміркування та виділення матеріалів, що підлягають перевірці експериментом. Якщо задача НДР є ординарною, тобто

несуть суть прикладний характер, а кількість інформації майже необмежена, необхідно в першу чергу розподілити виділені фактори і параметри по впливам. Розглянемо по конкретний приклад: завдання НДР є вивчення причин поздовжньої різнотовщинності штаб на безперервному стані холодної прокатки. Аналіз науково-технічної інформації (роботи Ж. Штольц і Л. Брінкса, Г. Форда, Х. Мюллера і В. Люега) стисло викладено в роботі [6]. Ренжування факторів в цій роботі викладені таким чином:

- Причини, що призводять до коливань товщини по довжині штаби, ділять на три групи:
  - 1) коливання товщини, пов'язані безпосередню з прокаткою (швидкість, натяг і т.п.)
  - 2) коливання товщини, які викликані різнотовщинністю підкату (спадкова різнотовщинність)
  - 3) Коливання товщини, пов'язані зі станом валкового вузла і параметри осередка деформації (профіль, температура, ексцентричність, зношування, змащення і т.п.)

В подальших аналізах причин різнотовщинності, виконаних Сімсом, Місака, В. Робертсом та ін., що викладені в монографії [6], ранговий підхід до розв'язання проблем точності холодної прокатки залишався як пріоритетний. Більша того, цей підхід дав змогу розробити математичні моделі безперервних станів холодної прокатки та на їх основі програми і системи автоматичного регулювання товщини (САРТ), форми і площинності (САРПФ), натягу метала (САРН) і подачі технологічного мастила і охолоджувача валків (САПОРіМ).

Вичленимо із трьох вище вказаних груп причин так звану спадкову різнотовщинність, якщо на стані холодної прокатки штабу гарячекатаного підкату прокатувати з постійним розхилом (зазором) поміж валками, то під час проходження штаби через осередок деформації сила прокатки (тиск металу на валки) буде збільшуватися зі збільшенням товщини до  $H$ . В результаті збільшиться не тільки сила прокатки але й пружна деформація



валкового вузла і робочої кліті в цілому, тобто збільшиться розхил поміж валками і контактна поверхня метала з валками на величини АБВЕ на вході та на ДГЖЗ на виході із осередка деформації (рис.1.11). В результаті вихідна товщина холоднокатаної штаби збільшиться від  $h$  і  $h'$ . Питання експериментальних досліджень точності прокатки розглядатимуться в подальших розділах.

Етап теоретичних досліджень дає можливість з раціонально обраним математичним апаратом, визначити метод, модель та технологію виконання експериментальних досліджень.

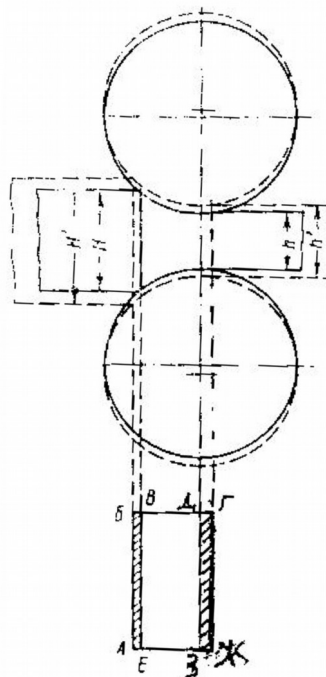


Рис. 1.10 Збільшення товщини штаби від  $h$  до  $h'$  (спадкова різнотовщинність) внаслідок збільшення товщини підкату від  $H$  до  $H'$

Передостаннім етапом НДР є експериментальні дослідження, які виконуються в лабораторіях і на діючих промислових агрегатах. В лабораторних умовах експерименти проводять з використанням математичних, фізичних і натурних моделей. Побудова адекватних аналогів об'єктів дослідження і є по суті моделюванням. Метод моделювання – це дослідження явищ, процесів і закономірностей ОМТ за допомогою моделей.

Це основний метод експериментальних досліджень процесів ОМТ. Чільне місце в наш час інформаційних технологій займає математичне моделювання з використанням ПК; мікропроцесорів, ЕОМ, і за необхідності великих керуючих машин. Математичні моделі дають можливість кількісно дослідити явище і процеси, які важко піддаються вивченню на фізичних або натурних моделях. В 1968 р. Місака опублікував результати своїх досліджень по створенню контрольних рівнянь (математичної моделі) безперервного п'ятикільтового стана холодної прокатки [10]. Тим самим принципово було показано, що навіть багатоланкові найскладніші технологічні лінії ОМТ і процеси, які в них відбуваються, можливо описати системою (системами) диференціальних рівнянь в повних або часткових похідних. Такі рівняння можливо розв'язувати або в операторній формі. Тобто числовими методами з використанням ЕОМ, ПК, МПП і за необхідності – КЕОМ (керуючих електронно-обчислювальних машин).

Фізичне моделювання базується на використанні відомих та опробованих фізичних закономірностей фізики для моделювання та дослідження процесів ОМТ. Наприклад, в теорії пластичної течії метала напружений та деформований стан досліджують з використанням фізичних констант металів і модулів пружності першого роду (модуля Юнга) і другого роду (коефіцієнт Пуассона), зв'язок поміж напругами і деформаціями встановлюється з використанням закону Гука; робота (енергія) деформації визначається на базі законів механіки про кількість руху. Основні закони теорії ОМТ (незмінюваності об'єму в процесі деформації, мінімального опору, контактного тертя поміж поверхнею штаби і технологічним інструментом і інші) також отримані проектуванням загально різних законів відповідно нестискуваності суцільного середовища, мінімального енергетичного бар'єра, законів Кулона або Амонтана на моделі процесів ОМТ.

Натурні моделі також доволі широко використовуються для вивчення та дослідження процесів ОМТ. Натурна модель – за використання

геометричної подібності натури і моделі, наприклад промислової заготівлі і лабораторного зразка. Оптимальним методом експериментальних досліджень є поєднання різних способів моделювання

Отримані експериментальні результати умовно поділяється на первинні і вторинні. Наприклад, в процесі первинної обробки складаються таблиці і будуються графіки, при вторинній проводять інтерполяцію, екстраполяцію або проводять планує мий експеримент. Методи обробки експериментальних даних будуть розглянуті окремо.

### **1.7. Технологія експерименту**

Як зазначалось в попередніх п.п., натурне моделювання є основним способом експериментальних досліджень процесів ОМТ. Коректне проведення експерименту та отримання надійних і достовірних первинних даних можливе за виконання двох основних умов:

- технологія підготовки і проведення експерименту мають бути попередньо відпрацьовані, апробовані і за необхідності скориговані;
- технічні засоби, вимірювальні та перетворюючі прилади мають відповідати вимогам стандартів, метрології, надійності і також попередньо відтарировані та випробувані на спеціальних стендах і зразках.

При натуральному моделюванні застосовується закон подібності. Умови подібності пластичної деформації дотримуються за виконання наступних вимог:

- лабораторні зразки і промислові заготівлі повинні мати однакові хімічний склад, макро- та мікроструктуру, фазовий стан і механічні та технологічні властивості;
- температура метала під час деформації також має бути однаковою;
- коефіцієнти зовнішнього тертя поміж поверхнею деформуємих зразків і штаб та поверхню технологічного інструмента на

лабораторній моделі та промислового агрегаті повинні бути однаковими.

Звичайно на лабораторній моделі важко, а в більшості випадків і неможливо відтворити всі умови, які мають місце на промисловому агрегаті ОМТ. Для таких умов в результаті лабораторних досліджень вводять поправочні коефіцієнти, які також отримують порівнянням виміряних параметрів отриманих на промисловому агрегаті та лабораторній моделі.

Із вище викладеного закон подібності у відношенні до процесів ОМТ можливо сформулювати наступним чином: в випадках подібних умов під час пластичної деформації двох геометрично подібних тіл різних розмірів, що отримують однакову величину відносною основної деформації, відносні тиски рівні поміж собою. При цьому відношення деформуючих сил  $Q$  дорівнює квадрату, а відношення робіт  $A$ , витрачаємих на формо змінювання, дорівнює кубу відношення лінійних розмірів.

Геометрично подібними тілами називають такі, у яких відношення площ поперечних перерізів  $F$  дорівнює квадрату, а об'ємів  $V$  дорівнює кубу співвідношення лінійних розмірів, тобто:

$$F_{зг}/F_{зр}=a^2 \quad (1.6)$$

$$V_{зг}/V_{зр}=a^3 \quad (1.7)$$

де

$$a = \frac{L_{зг}}{L_{зр}} = \frac{H_{зг}}{H_{зр}} = \frac{B_{зг}}{B_{зр}} \quad (1.8)$$

де індекси з<sub>г</sub> і з<sub>р</sub> відносяться відповідно для заготовлі та зразка;

$L$ ,  $B$ ,  $H$  – відповідні лінійні розмірна, довжина, ширина, товщина.

Виходячи із формулювання закону:

$$Q_{зг}/Q_{зр}=a^2 \quad (1.9)$$

$$A_{зг}/A_{зр}=a^3 \quad (1.10)$$

За відомих розмірів  $L$ ,  $B$ ,  $H$  та виміряної на моделі сили деформації  $Q_{зр}$  визначають силу  $Q_{зг}$  та роботу формозміни заготовлі на промисловому агрегаті відповідно по (1.9) і (1.10).

Дослідження процесів гарячої ОМТ за звичай проводять на зразках – моделях виготовлених із свинцю або його сплавів. Це обумовлено як властивостями свинцю так і можливістю здешевлення та спрощення експерименту тому, що метал немає потреби нагрівати. Крім того, використані зразки як правило, переплавляють і відливають у металеві роз’ємні виливниці. Чистий свинець і в деякій мірі його сплави схильні до росту зерна навіть при кімнатній температурі, що вимагає попереднього деформування відлитих зразків. Тим самим досягається ущільнення відливок та вирівнювання по їх об’єму мікроструктури і механічних властивостей.

Процеси холодної прокатки досліджують з використанням зразків із мало вуглецевих сталей або алюмінію. Для покращення пластичності зразки до деформації піддають рекристалізаційному відпалу. Архітектура (структурна схема) вимірювання параметрів процесу деформації на моделі М ілюструється рис.1.11. Носіями інформації в вимірювальних схемах є сигнали. Сигнали про вимірювані (досліджуванні) параметри утворюються в датчиках Д. Як правило, в процесі деформації вимірювання проводять комплексно. Наприклад на моделі прокатного стана вимірюють силу прокатки, крутячий момент, швидкість штаби або валків та інші параметри, для чого установлюють декілька датчиків. Для отримання сигналу достатньої потужності один і той же параметр може вимірюватись декількома датчиками. Виміри від датчиків Д передаються в перетворювачі ПТ, де первинні дані перетворюються в сигнали, які зручні для підсилення в підсилювачі (підсилювальній станції) ПС і дистанційної передачі. Після підсилення інформація піддається первинній обробці мікропроцесором МПЦ і видається на регістратор результатів вимірювання РД.

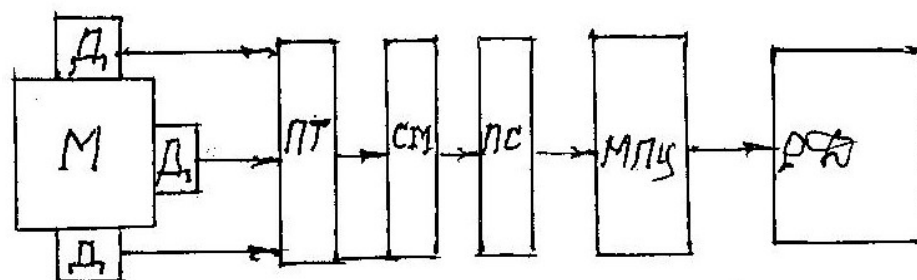


Рис.1.11 Архітектура вимірювання параметрів процесу ОМТ на лабораторній моделі М: Д – датчик; ПТ – перетворювач; СМ – суматор; ПС – підсилювач; МПЦ – мікропроцесор; РД – регістратор даних

Найбільш складними в технічному аспекті безсумнівно є експериментальні дослідження на промислових технологічних агрегатах. На рис. 1.12 наведена схема монтажу вимірювальної апаратури на прокатній кліті промислового стана для дослідження сили прокатки та крутячого моменту. Сила прокатки вимірюється датчиками 2 і 5, в якості яких найчастіше використовують магнітопружні, магнітоанізотропні та тензорезисторні месдозы. Месдоза безпосередньо сприймає на свій пружний елемент зусилля прокатки. Деформація пружного елемента призводить до змінювання магнітних характеристик, які безпосередньо в месдозі перетворюється в електричний сигнал. Тензорезисторні датчики для вимірювання сили прокатки можуть бути з дротовими або фольговими тензорезисторами, які монтується на внутрішній поверхні циліндричного стакану месдозы.

Вибір місця установки месдозы не є однозначним і визначається сукупністю вимог щодо точності, надійності та зручності експлуатації та обслуговування.

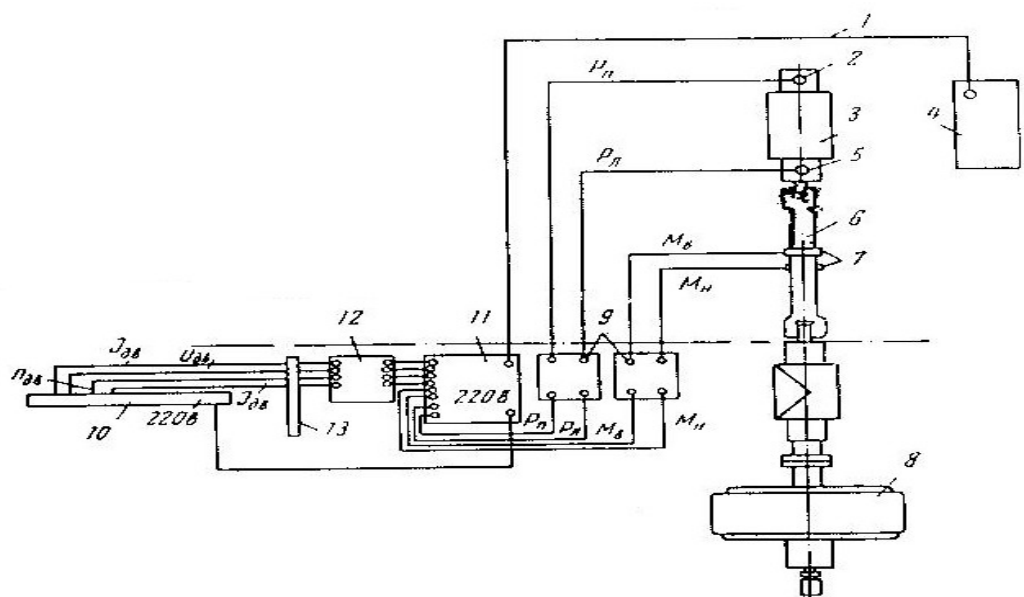


Рис.1.12 Схема установки вимірювальної апаратури на робочій кліті та на її головної лінії: 1 – сигналізація; 2 – месдоза під правим натискним гвинтом; 3 – валки; 4 – пульт керування; 5 – месдоза ліва; 6 – шпindel; 7 – магнітопружний датчик крутячого моменту; 8 – двигун приводу валків; 9 – підсилювач; 10 – панель керування; 11,12,13 – МПЦ і РД

Можливі місця установки месдоз в прокатній кліті показані на рис. 1.13.

Методичною похибкою вимірювання сили прокатки  $P$  прямим методом є шунтування навантаження на месдозу. Із рис.1.13 видно, що тільки частина сили  $P$  передається на месдозу, яка сприймає зусилля  $F$ . Шунтуюча частина навантаження, хоча і незначна, визначається силами тертя подушок об станину  $N_n = 0.01P$ , гайки об станину  $N_r$ , і шліцьового з'єднання натискного звинта з колесом останньої ступені редуктора натискного устрою  $N_{ш}$ .

Для клітей кварто приймають:

$$N_r = 0,03P \quad (1.11)$$

$$N_{ш} = 0,04P \quad (1.12)$$

$$F = P \pm N_n \pm N_r \pm N_{ш} \quad (1.13)$$

$$F = P \pm 0,08P \quad (1.14)$$

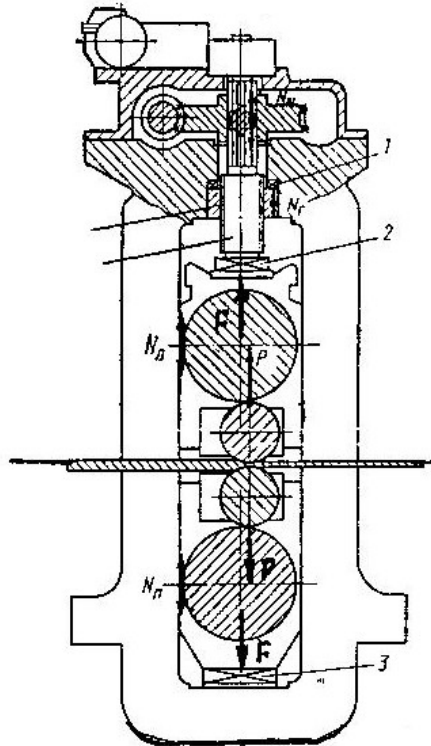


Рис.1.13 Можливі місця установки месдоз на прокатній кліті для прямого вимірювання сили прокатки: 1- над гайкою натискного устрою; 2 – поміж натискним гвинтом і подушкою верхнього валка; 3 – під подушкою нижнього валка; 4 – гайка; 5 – гвинт натискного устрою; 6 і 7 – подушки відповідно верхня та нижня

Знак («+» або «-») в формулах (1.11) - (1.14) залежить від напрямку руху подушки (вверх або вниз) безпосередньо перед та під час вимірювання. Крутячі моменти на шпинделях головної лінії кліті визначають або за допомогою тензорезисторних датчиків (на лабораторних станах) або магнітопружними вимірювачами, принцип роботи яких базується на явищі анізотропії магнітної проникності від дії вимірюваного моменту.