

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до лабораторних робіт з дисципліни  
«Теорія обробки металів тиском»

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

Краматорськ 2019

УДК 621.771

Теорія обробки металів тиском: методичні вказівки до лабораторних робіт для магістрів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів» / уклад. : В. А. Федорінов, М. В. Федорінов. - Краматорськ: ДДМА, 2019. - 44 с.

Викладено короткі теоретичні відомості та порядок проведення лабораторно робіт 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.

М. В. Федорінов, доц.

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

## ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

В ході виконання лабораторних робіт студенти самостійно аналізують отримані результати, встановлюють кількісні та якісні взаємозв'язки окремих явищ, які супроводжують процес прокатки. Всі роботи носять дослідницький характер.

### Правила виконання лабораторних робіт

1. Лабораторні роботи виконуються за затвердженим кафедрою графіком, який вивіщується в лабораторії на дошці оголошень кафедри.
2. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які ознайомилися завчасно з її змістом і методикою виконання, які вивчили відповідні розділи теоретичного курсу.
3. Перед початком лабораторних робіт розподіляються обов'язки між членами бригади (академічна група розбивається на 4 ... 5 бригад). Лабораторні роботи в групі можуть також проводитися по декількох дисциплінах спеціальності одночасно.
4. Роботи виконуються в послідовності, наведеній в методичних вказівках. Заключним етапом кожної роботи є обробка і аналіз експериментальних даних, порівняння їх з теоретичними, аналіз причин розбіжності цих даних, висновки за результатами роботи.
5. Після закінчення роботи до закінчення занять студенти приступають до складання звіту.
6. Звіт про виконану лабораторній роботі пред'являється викладачеві в кінці заняття або перед початком чергового заняття. В іншому випадку студент до подальших занять не допускається. При наявності правильно оформленого звіту дозволяється захист лабораторної роботи.
7. При захисті лабораторної роботи студент зобов'язаний знати основні теоретичні положення по даній роботі, методику тих чи інших вимірів, вміти пояснити значення отриманих залежностей і їх характер. До роботи в лабораторії допускаються особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки.

### Правила по техніці безпеки при виконанні лабораторних робіт

1. Забороняється включати лабораторні установки без дозволу керівника заняття.
2. При роботі лабораторного стану дозволяється перебувати тільки з боку обслуговування.
3. Завдання зразків в робочі валки стану робити тільки за допомогою спеціального дерев'яного штовхача.
4. Забороняється включати нажимной механізм в період обертання валків прокатного стану.

5. На що працюють установки не можна спиратися і без потреби тро-гати їх руками.
6. Забороняється йти зі свого робочого місця і переходити на інше без дозволу викладача.
7. Робоче місце необхідно утримувати в чистоті і порядку.
8. Після проведення роботи необхідно відключати електрообладнання від джерел живлення.

#### Загальні вказівки по оформленню звітів

1. Звіти про лабораторних роботах оформляються в спеціальному зошиті (журналі) в порядку черговості виконання робіт.
2. Схеми і графіки виконуються олівцем, обов'язково із застосуванням креслярського приладдя.
3. Елементи схем повинні бути виконані відповідно до вимог ЕСКД.
4. На графіках значення аргументів слід відкладати по горизонтальній осі, а значення функції - по вертикальній. Уздовж осей слід наносити масштабні шкали, поділу яких повинні бути рівномірними.
5. Звіт повинен містити мету роботи, короткий опис основних теоретичних положень, опис лабораторної установки і порядок проведення експерименту, обговорення результатів експерименту і висновки.

#### 1 Лабораторна робота № 1

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАСТИЛ ПРИ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТЦІ

Мета роботи - вивчення впливу технологічних мастил, застосовані при холодної прокатки смуг, на витяжку металу, оцінка ефективності дії різних мастил, раціональний вибір мастил.

#### Загальні відомості

Умови тертя на контактній поверхні металу і інструменту дуже впливають на енергосилові параметри процесів обробки металів тиском і, зокрема, процесу прокатки. Крім того, тертя визначає якість поверхні оброблюваного металу і є основною причиною зносу робочої поверхні інструменту.

З ростом коефіцієнта тертя  $i$ , як наслідок, нормальних контактних напружень, знижується можливість отримання точного прокату і прокатки тонких смуг внаслідок значного пружного сплющивання валків. Тертя має вирішальний вплив на результат прокатки, коли відношення довжини дуги контакту  $l$  до середньої товщині смуги  $h_{cp}$  в осередку деформації більше одиниці ( $l / h_{cp} > 1$ ) [4, 5].

Основним видом контактної тертя між металом і інструментом є тертя ковзання. Воно характеризується двома головними ознаками: наявністю сил тиску, що притискають інструмент і метал один до одного і нерівністю швидкостей інструменту і металу на поверхнях контакту.

Значення дотичних напружень  $\tau$  в теорії ОМД найчастіше визначають за допомогою відомого з фізики закону Амонтона:

$$\tau = \mu \times p, \quad (1.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя ковзання (безрозмірна величина);

$p$  - нормальне контактне напруження, Па.

Значення  $\mu$  різне в різних точках контакту, але частіше його приймають усередненим - постійним для всієї контактної поверхні.

У числі основних чинників, що впливають на значення  $\mu$ , знаходяться: па-параметра шорсткості інструменту і металу перед прокаткою, що деформується матеріал, тиск між інструментом і металом, швидкість деформування (прокатки), температура металу. Особливий вплив на значення коефіцієнта тертя  $\mu$  надають змащувальні властивості технологічних рідин, що використовуються як мастил.

Питання раціонального вибору мастил і способів їх нанесення розглянуті в багатьох роботах [2; 3-6] та інших. Однак зростання вимог до техніко-економічними показниками виробництва холоднокатаної листової сталі викликає необхідність пошуку нових технічних рішень для кожного конкретного випадку.

Отже, мастило має найважливіше значення при холодній прокатки металу. Вона впливає на продуктивність стану, стійкість валків, витрата електроенергії, рівномірність товщини стрічки і листа і стан їх поверхні. Частина мастила, яку забирає прокочується стрічка, захищає метал від корозії до наступної операції і при зберіганні на складі. При подальших операціях мастило повинна легко віддалятися з поверхні металу.

Застосування ефективної мастила дозволяє значно знизити тиск металу на валки, зменшити пружні деформації валків і деталей стану і, таким чином, створити умови для інтенсивної деформації металу.

На сучасних станах холодної прокатки в якості технологічних мастил застосовують мінеральні та рослинні олії, тваринні жири, синтетичні мастила на основі природних і синтетичних жирних кислот.

Технологічні мастила наносять на поверхню прокочується смуги або в чистому вигляді, або у вигляді водних емульсій. Ефективність мастила визначається наявністю в ній поверхнево-активних речовин, здатних адсорбуватися на поверхні з утворенням міцних мастильних плівок. Тому часто в цілях підвищення мастильної здатності мінеральних емульсій в останні додають активні масла в чистому вигляді.

При виборі мастила для холодної прокатки жерсті застосовують мастила, які не розкладаються в осередку деформації і не утворюють сажистий наліт. Широке застосування на сучасних станах холодної прокатки знаходить

пальмова олія, у якого хороша змазує здатність обумовлюється присутністю 7-17% жирних кислот. При 250-290°C пальмова олія зберігає високі властивості, що особливо важливо для інтенсивних режимів прокатки, при яких в осередку деформації утворюється висока температура. Недоліком пальмового масла є його дорожнеча.

На температуру масла в процесі прокатки впливає ряд факторів, в першу чергу швидкість прокатки, величина обтиснень, число пропусків, час холостого ходу між пропусками, спосіб охолодження мастила та її подачі.

При підвищенні швидкості холодної прокатки, що спостерігається на сучасних прокатних станах, кількість енергії, що перетворюється в тепло, збільшується. Частина тепла, що утворюється в процесі прокатки, сприймається валками. Збільшення діаметра валків в результаті їх розігріву призводить до зміни товщини смуги. Крім того, розігрів валків вище допустимої норми може призвести до поломки валків. Для забезпечення стабільних умов прокатки необхідно зберігати сталість температури бочки валка.

Як відомо, валки для станів холодної прокатки піддають термічній обробці - гартуванню та відпуску. Відведення утворюється в зоні деформації тепла необхідний для того, щоб в процесі прокатки валків забезпечити температуру, нижче температури відпустки валків. Крім того, нерівномірність, що змінюється температура поверхні валків викликає поява в них внутрішніх напружень, які можуть привести до утворення тріщин або сколювання валків, а також до коробоватості і хвилястості готового прокату.

Всі зростаючі вимоги до якості поверхні холоднокатаного листового прокату пов'язані з необхідністю застосування більш ефективних технологічних мастил, які забезпечували б не тільки зменшення тертя, але і поліпшення якості поверхні прокату.

Все в більшій мірі застосовують комплексні системи змащення смуги - попереднє промаслювання підкату в лініях безперервного травлення і подальше використання мастильно-охолоджуючих емульсій. Це дозволяє в ряді випадків відмовитися від використання під час прокатки листового прокату товщиною не менше 0,4 мм технологічних мастил, в тому числі дефіцитного касторової олії.

Ефективність застосування мастил при холодної прокатки залежить не тільки від правильного їх складу, але і від способу подачі на метал і валки. Спосіб подачі мастила повинен забезпечувати її рівномірний розподіл і економію її витрачання. Результатом нерівномірного розподілу мастила може бути нерівномірність витяжка і коробоватість листів.

Технологічні мастила і мастильні рідини можуть подаватися нанесенням мастила або на смугу після травлення, або безперервно на валки і поверхню прокочується смуги в процесі прокатки.

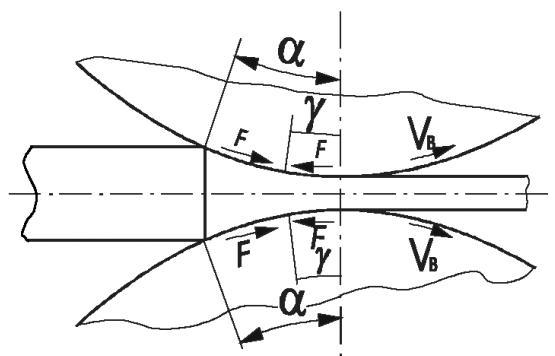
Для змащення в процесі холодної прокатки стали застосовують емульсії, механічні дисперсії активних масел у воді (в залежності від умов і швидкості прокатки концентрація масла знаходиться в межах 5-30%, дисперсія з більшою концентрацією масла застосовується при прокатці металу на

п'ятиклетьових станах). На ряді станів подача масла і води здійснюється незалежно.

Необхідно подавати мастило або охолоджуючу рідину до місця зіткнення металу з валками.

Мастило повинна забезпечувати отримання досить міцної плівки, а охолоджуюча рідина - мати максимальну здатність поглинати тепло. Подача великої кількості охолоджувальної рідини на валки швидкісних станів холодної прокатки дозволяє підтримувати температуру валків в заданих межах. На більшості станів їх температура не перевищує  $70^{\circ}\text{C}$ . Таке поєднання властивості досягається застосуванням водних емульсій відповідних масел. При використанні емульсії застосовують високопродуктивні установки, продуктивність яких встановлюють в залежності від умов роботи стану і сортаменту прокату. Місткість резервуару для емульсії в 15-25 разів перевищує її хвилинний витрата.

При здійсненні традиційної прокатки робочі валки, що виконують роль деформуючого інструменту, мають рівні діаметри і обертаються з однаковими кутовими швидкостями. При цьому реалізується процес, який називають симетричною прокаткою. Він характеризується наявністю підпирає дії контактних сил тертя на деформується обсяг металу (рис. 1), що призводить до збільшення як сили деформації, так і інтенсивності її зміни в залежності від варіацій вихідних параметрів процесу, що визначають напружено-деформований стан металу в осередку деформації. Це знижує технологічні можливості процесу симетричною (традиційної) прокатки, зокрема, погіршує точність прокатки. У зв'язку з цим роль технологічного мастила, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя в осередку деформації, вельми висока.



Малюнок 1.1 - Схеми осередку деформації при симетричній прокатці

Очевидно, що для традиційних процесів холодної тонколистової прокатки найбільш ефективними технологічними мастилами слід вважати такі, які мають досить широким комплексом корисних властивостей і забезпечують умови реалізації процесу холодної прокатки при максимально можливій витяжці з мінімальними енергосилових параметрів.

У цій лабораторній роботі ми не ставимо перед собою завдання визначення точних значень коефіцієнтів тертя для випробовуваних мастил. Це є предметом окремих досліджень. Однак ефективність застосування цих мас-

тил легко встановити, здійснюючи прокатку однакових зразків з різними мастилами та без змащення (в сухих валках) при постійному зазорі валків  $S_0$ . Очевидно, що чим ефективніше мастило, тобто, чим менший коефіцієнт тертя  $\mu$ , тим менше контактні напруги  $\tau$  та  $p$  і сила прокатки, а отже, менше пружна деформація елементів кліті («віддача валків») і тонше смуга на виході з валків. При цьому використовують вираз залежності товщини смуги  $h_1$  на виході з валків від сили прокатки [7], яка, за інших рівних умов, визначається і ефективністю мастила:

$$h_1 = S_0 + P/G_{\text{кл}}, \quad (1.2)$$

де  $h_1$  - кінцева товщина смуги;

$S_0$  - зазор між валками;

$P$  - сила прокатки;

$G_{\text{кл}}$  - модуль жорсткості кліті (пружна характеристика кліті).

Чим ефективніша мастило, тим менше сила прокатки  $P$ , а отже, і кінцева товщина смуги  $h_1$ . Таким чином, при постійних значеннях  $S_0$  і  $G_{\text{кл}}$ , а також вихідних значень товщини  $h_0$  і ширини  $b_0$  смуги, кінцеві значення товщини смуги  $h_1$  дозволяють судити про ефективність мастила.

#### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторні стани дуо-100, дуо-160, дуо-200 і кварто 55/250 × 200.
2. Мікрометр, штангенциркуль.
3. Зразки довжиною 150 ... 300 мм зі сталі, міді, алюмінію або їх сплавів, вирізані з однієї смуги товщиною 0,3 ... 2,0 мм, шириною 20 ... 80 мм з мінімальною кількістю 12 шт. (Число зразків вибирається кратно чотирьом з урахуванням переліку мастил).
4. Мастило двох і більше типів, ацетон технічний або неетильований бензин.

#### Порядок проведення експерименту

До початку прокатки на зразки, поблизу їх кінців, нанести дві поперічкові ризики, відстань між якими прийняти за вихідну довжину зразка  $L_0$ . Мікрометром визначити вихідну товщину смуги  $h_0$ .

Всі зразки прокатати з незмінним зазором між валками в двох рівнях обтиснень для кожної мастила. На першому рівні відносне обтиснення  $\varepsilon$  вибрати рівним 15 ... 20%, а на другому рівні - 45 ... 50%. Перед прокаткою кожного чергового зразка валки ретельно очистити від попередньої мастила.

Перший зразок на кожному рівні обтиску прокатати в сухих валах, без змащення, наступні - із застосуванням випробуваних мастил, які слід наносити безпосередньо перед прокаткою рівномірним шаром на поверхню зразків.



При прокатці використовувати жири, рослинні, синтетичні і мінеральні мастила.

Після прокатки зробити виміри товщини зразків і відстані  $L_1$  між ризиками.

Досвідчені дані занести в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Результати холодної прокатки із застосуванням різних мастил

Вид мастила	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$L_1$ , мм	$\varepsilon$ , %	$\lambda$
Первый рівень обтиснення ( $\varepsilon_{cp} = \%$ )					
1. Без мастила					
2.					
3.					
Другий рівень обтиснення ( $\varepsilon_{cp} = \%$ )					
1. Без смазки					
2.					
3.					

### Обробка результатів експерименту

За отриманими дослідними даними підрахувати для кожного випадку прокатки абсолютне  $\Delta h$  і відносне  $\varepsilon$  обтиснення і коефіцієнт витяжки  $\lambda = L_1/L_0$ . Це дозволяє підвищити точність оцінки рівня обтиску, оскільки при прокатці тонких плоских зразків, коли розширення практично відсутня (воно нижче 1%), співвідношення товщини  $h_0$  і  $h_1$  теж визначає коефіцієнт витяжки  $\lambda$  смуги в проході, тобто  $h_0 / h_1 = L_1 / L_0 = \lambda$ .

Результати розрахунків занести в таблицю 1.1. Зробити аналіз дослідних даних, відзначити вплив мастила на геометричні параметри прокатки, порівняти дію різних мастил при різних обтиснутими.

### Контрольні питання

- 1 Яка роль технологічного мастила при холодної прокатки?
- 2 Чому застосування технологічних мастил забезпечує можливість прокатки більш тонких смуг?
- 3 Чому нерівномірний нанесення мастила по ширині смуги призводить до її викривлення, утворення хвилястості?
- 4 Чому застосування мастила при прокатці призводить до зниження нормальних контактних напружень?
- 5 Вкажіть механізм дії мастила, ніж визначається ефективність мастила.
- 6 Назвіть види мастила і вимоги, що пред'являються до них.
- 7 Які фактори визначають температуру мастила в процесі прокатки?
- 8 З яких міркувань визначають витрата технологічної мастила?
- 9 Вкажіть способи подачі технологічного мастила.

10 На чому заснований підхід в оцінці ефективності мастил, застосований в даній лабораторній роботі?

11 Чому з ростом коефіцієнта тертя знижується можливість отримання точного прокату.

12 Вкажіть фактори, що визначають значення коефіцієнта тертя при прокатці.

13 Вкажіть ознаки, що визначають ефективність мастила.

14 Вкажіть вплив тертя на результат прокатки залежно від ставлення  $l / h_{\text{сер}}$ .

## 2 Лабораторна робота № 2

### ВПЛИВ УМОВ ТЕРТЯ НА ВИПЕРЕДЖЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ В ГЛАДКИХ ВАЛКАХ

Мета роботи - практичне вивчення явища випередження при прокатці, вивчення впливу коефіцієнта тертя на величину випередження, визначення коефіцієнта тертя випередження.

#### Загальні вказівки

Швидкість поступального руху кінця смуги, що виходить з валків, більше, ніж окружна швидкість валків. Це явище називають випередженням. Швидкість заднього кінця смуги менше горизонтальної складової швидкості валків. Це явище отримало назву відставання [1].

Випередження і відставання є результатом опади смуги по висоті в процесі прокатки, і їх поява є наслідком дії закону найменшого опору.

Випередження і відставання при прокатці в значній мірі визначають характер розподілу і величину контактних напружень, а також значення розширення при прокатці. Величину випередження необхідно визначати для настройки безперервного стану, щоб уникнути надмірного натягу і освіти петель між клітями стану.

Випередження визначають за формулою:

$$S = (V_1 - V_B) / V_B = V_1 / V_B - 1, \quad (2.1)$$

де  $V_1$  і  $V_B$  - відповідно швидкість переднього кінця смуги і окружна швидкість валків.

Випередження знаходиться в межах від 2 до 15%.

На практиці випередження визначають методом кернів

$$S = (l_1 - l_B) / l_B = l_1 / l_B - 1, \quad (2.2)$$

де  $l_1$  і  $l_B$  - відстані відповідно між відбитками на смузі і кернами (по дузі) на валку.

Дійсно, за час  $t$   $l_B = V_B t$ , а  $l_1 = V_1 t$ , тоді  $V_B = l_B / t$ , а  $V_1 = l_1 / t$ .

Теоретично для симетричної прокатки випередження можна визначити, беручи до уваги положення нейтрального перетину. При прокатці тонких смуг, коли радіус валків  $R$  набагато більше товщини смуги  $h_1$  на виході з осередку деформації випередження може бути підраховано за формулою Дрездена

$$S = \frac{R}{h_1} \gamma^2, \quad (2.3)$$

де  $\gamma$  - нейтральний кут.

Очевидно, що питання визначення випередження пов'язаний з визначенням нейтрального кута.

Величина випередження залежить від геометричних розмірів вогнища деформації, умов тертя на контактній поверхні і натягіння (підпорів):

$$S = f(l/h_{cp}; \alpha; b_0/l; \sigma_0; \sigma_1; \mu),$$

де  $\alpha$  - кут контакту;

$\sigma_0, \sigma_1$  - напруги переднього і заднього натягіння;

$\mu$  - коефіцієнт тертя.

Чим більше  $l/h_{cp}; \alpha; b_0/l; \sigma_1$  и  $\mu$ , тим більше випередження.

Заднє натяг зменшує випередження.

Знаючи величину випередження можна наближено визначити середнє значення коефіцієнта тертя, використовуючи для цього так званий метод випередження [2].

Його суть полягає в тому, що при сталому процесі прокатки експериментально визначають величину випередження  $S$ , як показника відносного ковзання металу по поверхні валків на виході з осередку деформації. Потім за допомогою формули Фінка знаходять величину нейтрального кута  $\gamma$ :

$$\cos \gamma = \frac{D + h_1}{2D} + \sqrt{\left(\frac{D + h_1}{2D}\right)^2 - \frac{h_1}{D}(1 + S)}, \quad (2.4)$$

де  $D$  - діаметр валків.

З цією ж метою може бути використана спрощена формула Дрездена (2.3) у вигляді:

$$\gamma = \sqrt{\frac{Sh_1}{R}}. \quad (2.5)$$

Знайдене в такий спосіб значення кута  $\gamma$  підставляють в відому формулу Екелунда-Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right), \quad (2.6)$$

вирішену щодо кута тертя  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\alpha^2}{2(\alpha - 2\gamma)}. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт тертя визначають по залежності (2.7) з урахуванням того, що

$$\mu = \tan\beta. \quad (2.8)$$

Слід мати на увазі, що формули (2.4-2.6) отримані в припущенні рівномірного розподілу швидкостей по висоті перетинів осередку деформації, тобто при їх виведенні була прийнята гіпотеза «плоских перетинів». В даний час встановлено, що поздовжні швидкості частинок металу розподіляються по висоті смуги в осередку деформації нерівномірно. Повний вирівнювання швидкостей відбувається вже після виходу металу із зони зіткнення з валками. У зв'язку з цим нейтральне перетин в загальному випадку має криволінійну форму [8]. Це важлива обставина не знаходить відображення в формулах (2.4-2.6). Тому їх застосування дає задовільні результати при прокатці відносно тонких смуг, коли  $l/h_{cp} > 3..4$ , в умовах плоскої деформації, тобто при  $b_0/l > 5$  (тут:  $l$  - горизонтальна проекція довжини дуги контакту металу з валками  $h_{cp}$  - середня висота смуги в осередку деформації;  $b_0$  - вихідна ширина смуги).

#### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторні стани дуо-100, дуо-160, кварто 55/250 × 200.
2. Мікрометр, штангенциркуль.
3. Зразки довжиною 150 ... 300 мм, товщиною 0,8 ... 2,0 мм, шириною 20 ... 60 мм із сталі, міді, алюмінію або їх сплавів в кількості 6 штук.
4. Мاستило двох типів, ацетон технічний або неетилований бензин.

#### Порядок проведення експериментів

На поверхню одного з валків наносять керни вимірюють відстань  $l_v$  по дузі між ними. Визначають діаметри валків. Встановлюють відносно обтис-

нення  $\epsilon$  близько 15 ... 30% і не змінюючи розчин валків здійснюють прокатку зразків в сухих валках без змащення і з мастилами, очищаючи валки після кожного проходу зі змазкою. Потім експеримент повторюють, встановивши обтиснення  $\epsilon = 45 \dots 50\%$ .

### Обробка результатів експериментів

Вихідні та кінцеві розміри зразків і відстані  $l_1$  між відбитками на смузі в дослідах після кожного пропуску занести в таблицю 2.1.

Використовуючи формулу (2.2), визначити дослідне значення випередження  $S$  і на його основі за формулами (2.5), (2.7) і (2.8) визначити значення коефіцієнта тертя  $\mu$ .

За отриманими даними побудувати графічні залежності  $S = f(\mu)$  для різних обтиснень.

Таблиця 2.1 - Досвідчені значення випередження при прокатці

Вид ма-стила	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\epsilon$ , %	$\alpha$ , рад	$l_1$ , мм	$S$ , %	$\gamma$ , рад	$\mu$
Перший рівень обтиснення ( $\epsilon_{\text{ср}} = \%$ )									
1. Без мастила									
2.									
3.									
Другий рівень обтиснення ( $\epsilon_{\text{ср}} = \%$ )									
1. Без смазки									
2.									
3.									

Проаналізувати вплив коефіцієнта зовнішнього тертя  $\mu$  на величину випередження, а також вплив обтиску на значення  $\mu$ .

### Контрольні питання

1. Яке явище називають випередженням?
2. Назвіть експериментальні методи визначення випередження. У чому їх суть?
3. Перелічіть фактори, що впливають на величину випередження. Виділіть групу факторів, які сприяють зменшенню випередження.
4. Як впливають на випередження передне і задне натягу?
5. Як впливає на випередження ширина смуги? Поясніть.
6. Як впливає на величину випередження ступінь деформації металу?
7. Який вплив на випередження надає кут контакту?
8. Який вплив на випередження надає зростання діаметра валків при інших рівних умовах?
9. Який вплив на випередження надає зміна ставлення  $l / h_{\text{ср}}$ ?
10. Як підпори впливають на величину випередження?

11. Який вплив на випередження надає зовнішнє тертя?
12. На яких станах необхідно точно враховувати випередження? Чому?
13. З яких міркувань вибирають кутові швидкості валків безперервних станів?
14. Які Ви знаєте методи визначення коефіцієнта тертя при прокатці?
15. У чому полягає метод визначення коефіцієнта тертя випередження. Які межі його застосування?

### 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СТРІЧОК ШЛЯХОМ ПЛЮЩЕННЯ КРУГЛОЇ ЗАГОТОВКИ

Мета роботи - вивчення впливу режиму обтиснень на розширення і витягування металу при плющенні круглої заготовки; визначення умов, що дозволяють мінімізувати зсув металу у подовжньому напрямку і тим самим збільшити його розширення.

#### Загальні вказівки

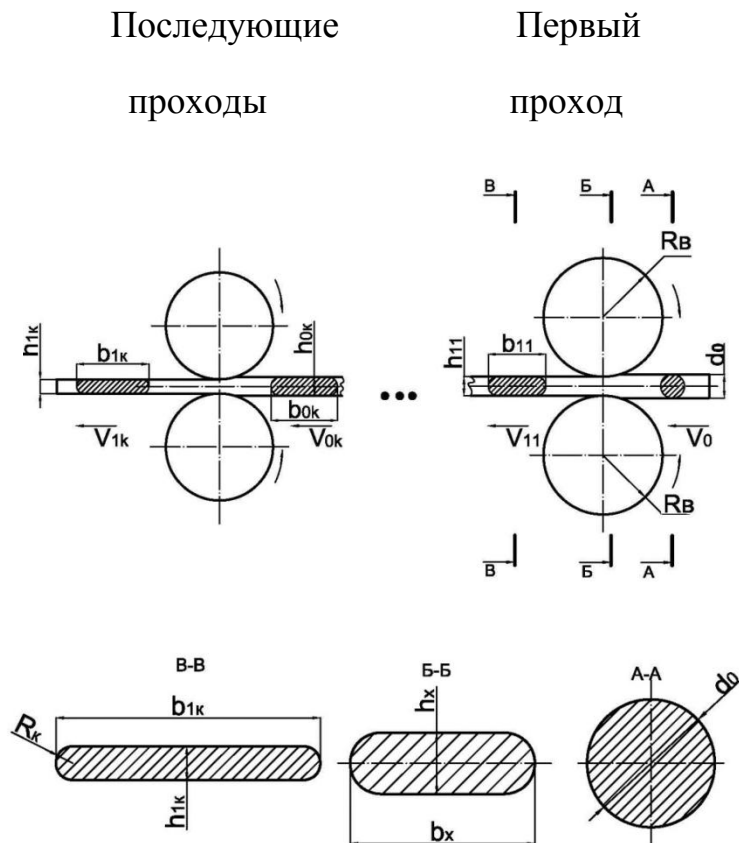
Машинобудівна і приладобудівна галузі є основними споживачами прецизійних профілів високої точності і чистоти поверхні. Такі профілі після прокатки ріжуть на задані довжини і виготовляють із них готові деталі, що не вимагають механічного оброблення зовсім або у яких обробляють тільки окремих елементи. До такого виду продукції відноситься плющення стрічка, у якій форма бічних крайок виходить закругленою в результаті природного розширення, що в ряді випадків є одним з переваг даного профілю. З плющеної стрічки виготовляють пружини для автотракторної та авіаційної промисловості, приладобудування, сільськогосподарського машинобудування та багато іншого.

Плющеною стрічкою називають вузьку металеву смугу з ставленням ширини  $b$  до товщини  $h$  1,3 ... 20 (а іноді і більше), отриману з круглої дроту шляхом зміни її поперечного перерізу від круглого до прямокутного обтисненням перпендикулярно до подовжньої осі [9] найчастіше прокаткою. Відповідно і сам процес такої прокатки називають плющенням, хоча ця операція має місце тільки в першому проході, так як в наступних проходах (рис. 3.1) прокатці піддається вже стрічка. Отже, плющення по суті являє собою окремий випадок прокатки вузької смуги з розширенням.

В результаті обтиску кромки стрічки стають закругленими. При необхідності їх виправляють або змінюють до інших форм бічним обтисненням або механічною обробкою. Поперечним перерізом плоскою плющеної стрічки може бути надано також фасонне обрис. Таку стрічку називають фасонної.

Плющенням можна отримувати сталеву стрічку практично будь-якої товщини в межах від 0,01 мм до 10 мм (а зазвичай холодної прокаткою на сучасних смугових станах - товщиною не більше 8 мм) і як завгодно малої ширини (максимальна ширина її в даний час не перевищує 30 мм).

Включення в лінію плющильного стану еджерних клітей (Еджер) з вертикальними валками, що служать для обтиску профілю з боків, неприводних або приводних багатовалкових калібрів дозволяє отримувати стрічку з крайками будь-якої бажаної форми або з фасонним поперечним перерізом (тобто фасонну плющення стрічку).



Малюнок 3.1 - Технологічна схема процесу плющення

Процес плющення в результаті зміни форми і розмірів круглої заготовки супроводжується значним розширенням. Залежно від геометричних розмірів готової продукції (плющеної стрічки) і складу технологічного обладнання розробляють технологічний процес плющення стрічки (визначають кратність деформації по висоті). Відомо, що при прокатці заготовки з однаковою кінцевою товщиною і сумарним обтисненням, а плющення є окремий випадок поздовжньої прокатки, розширення буде тим менше, ніж за більше число проходів заготовку деформують. Зазначений ефект можна пояснити дією закону найменшого опору. При збільшенні числа проходів зменшується одиничне обтиснення, що припадає на кожен прохід. При цьому зменшуються довжина дуги контакту, сили тертя і величина опору подовжньому течію

металу. При майже незмінному поперечному напрузі, забезпечується збільшення витяжки та зменшення розширення.

Отже, для розробки раціональної технології плющення стрічок необхідно правильно визначити розміри вихідної заготовки. Від її розмірів залежить весь комплекс технологічних операцій отримання плющеної стрічки. Головним завданням для розробки режимів обтиснень при плющенні є визначення форми і розмірів осередку деформації з метою створення таких умов, при яких забезпечується можливість управління процесом пластичної деформації, тобто отримання необхідної форми і розмірів готової продукції.

Виробництво стрічки шляхом плющення заготовок круглого поперечного перерізу в валках з циліндричної робочою поверхнею не дозволяє мінімізувати діаметр заготовки і число проходів, так як в процесі деформації велика частина металу зміщується в поздовжньому напрямку і залежить від величини зміщеного об'єму металу в вертикальному напрямку, при цьому на розширення йде незначний зміщений обсяг. Крім того, слід мати на увазі, що застосування валків з гладкою робочою поверхнею призводить до неконтрольованого (вільному) уширення гуркоти, яке залежить від багатьох чинників (діаметра заготовки, діаметра і стану робочої поверхні валків, наявності технологічного мастила, пластичності і хімічного складу металу і пр.). Відомо також, що під час гарячої прокатки-плющенні створюються такі умови пластичної деформації, при яких розширення досягає великих значень, ніж при холодній деформації.

З метою збільшення ширини, коли вільного розширення при рівномірній деформації металу по ширині в валках з гладкою бочкою недостатньо, застосовують вимушене розширення, яке є наслідком нерівномірного деформації металу по ширині. Для цього використовують так звані розгінні калібри [10].

На розширення при нерівномірному деформації в значній мірі впливає форма калібрів. При цьому використовують плоскі і опуклі стінки струмка, що здійснюють «розгін» металу в ширину.

Практика показує, що в окремих випадках застосування розгінних калібрів з опуклими похилими гранями забезпечує більш високе значення розширення [10; 11].

Застосування високих обтиснень і розгінних калібрів дозволяє зменшити значення витяжки та веде до зростання розширення, а, як наслідок, зниження числа проходів.

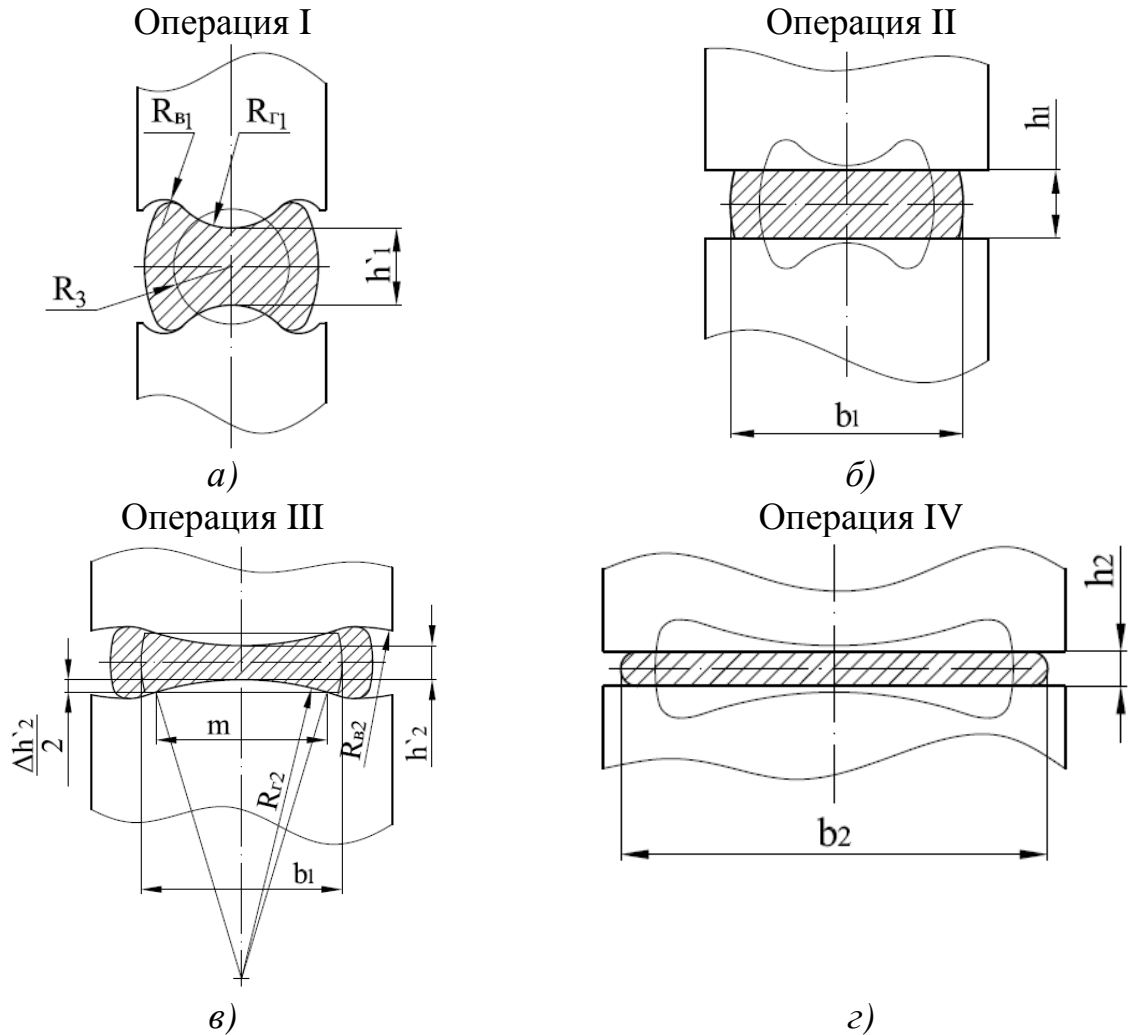
На кафедрі «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» ДДМА розроблені способи виготовлення стрічок плющенням, які включають поетапну деформацію заготовки круглого перетину за допомогою розгінних калібрів, що мають дугоподібну опуклу форму [12-14].

У першому випадку [12] заготовку по черзі деформують в розгінних калібрах і циліндричних валках. При цьому, в першому проході деформацію заготовки ведуть до товщини



$$h'_1 = (0,95...1,2)R_3 \quad (3.1)$$

в середині перерізу за допомогою розгінних калібрів (рис. 3.2, а), що мають спеціальний опукло-увігнутий профіль (тут  $R_3$  - радіус заготовки, мм).



а, в - деформація в розгінних калібрах;  
 б, г - деформація в циліндричних валках (на гладкій бочці)  
 Малюнок 3.2 - Спосіб виготовлення стрічок плющенням

Другий прохід (див. рис. 3.2, б) здійснюють в циліндричних валках до отримання стрічки товщиною  $h_1$  і шириною  $b_1$ , при цьому  $h_1$  знаходять за виразом:

$$h_1 = (0,95...1,0)h'_1 \quad (3.2)$$

Ця умова використовується, якщо за цим слід третій прохід в розгонних калібрах, якщо немає, то  $h_1 < 0,95h'_1$ .

Третій прохід (див. рис. 3.2, в) здійснюють в розгінних калібрах, що мають свій спеціальний опукло-увігнутий профіль, до товщини  $h_2'$  в середині перетину.

Наступні проходи ведуть в циліндричних валках (див. рис. 3.2, г) до отримання стрічки товщиною  $h_2$  і шириною  $b_2$ , при цьому  $h_2$  знаходять за виразом  $h_2 = (0,95 \dots 1,0)h_2'$ , якщо передбачається кілька проходів, якщо немає - то частіше  $h_2 < 0,95h_2'$ .

Поетапна деформація заготовки круглого перетину шляхом чергування прокатки в розгінних калібрах, що мають опукло-увігнутий профіль і в калібрах циліндричної форми забезпечує утворення недеформованих або мало деформуються зон металу в центральній частині стрічки в парних проходах і по її краях - в непарних проходах, що у всіх цих випадках призводить до появи поздовжніх стискаючих напружень в зонах розвинутою пластичної деформації металу і сприяє зменшенню витяжки, а, як наслідок, збільшення розширення. Цей ефект і забезпечує максимальне розширення заготовки і отримання стрічки різної ширини із заданою товщиною за мінімальну кількість проходів.

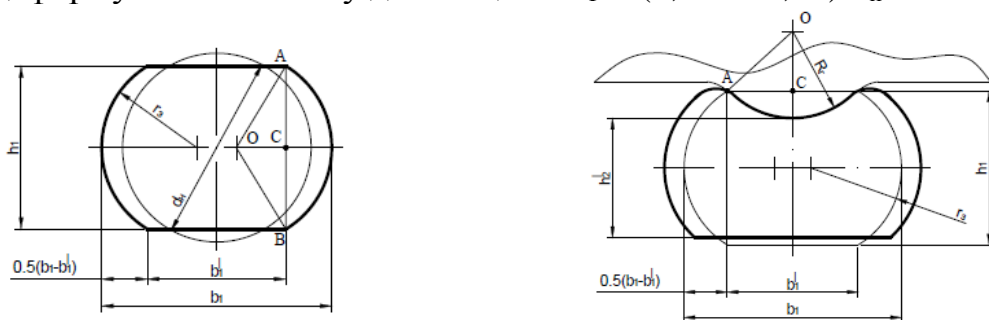
Розроблена схема прокатки і калібрування дозволяє отримувати широкий сортамент прокатних виробів з круглої заготовки. При цьому можуть бути реалізовані різні поєднання операцій (див. рис. 3.2):

I-II; I-II-II; III-III-IV; III-III-IV-IV та ін.

В результаті проведених досліджень встановили, що для виготовлення стрічок з поперечним розміром  $h_k \times b_k$  з дроту-заготовки діаметром  $d_H$  прокаткою, яка полягає в поетапному деформації металу в розгінному калібрі і циліндричних валках, початковий діаметр заготовки (дроту) може бути обраний в межах  $d_H = (4,4 \dots 4,7) b_k / h_k$ .

На основі аналізу напружено-деформованого стану металу на початковому етапі деформування вибрали іншу схему прокатки [13], яка є сприятливою за умовою більш інтенсивного розширення металу в перших трьох проходах при використанні розгінних калібрів лише в одному проході. Це спрощує роботу на стані і полегшує калібрування валків в порівнянні зі способом, наведеному на рис. 3.2.

У цьому випадку (рис. 3.3) перший прохід здійснюють в циліндричних валках, деформуючи заготовку до товщини  $h_1 = (0,63 \dots 0,65) d_H$ .



Малюнок 3.3 - Спосіб виготовлення стрічок плющенням

У другому проході здійснюють прокатку до товщини  $h_2 = (0,45 \dots 0,49)d_n$  в валках, один з яких має опуклий профіль з радіусом гребеня  $R_r = (0,61 \dots 0,66)d_n$ .

Третій прохід здійснюють в циліндричних валках до товщини не більше ніж  $h_3 = (0,41 \dots 0,45)d_n$ , якщо для досягнення кінцевої товщини  $h_k$  потрібен ще один прохід, або до товщини менше  $h_3 = (0,41 \dots 0,45)d_n$ , за умови, що кінцеву товщину  $h_k$  можна досягти в цьому проході.

Поетапна деформація заготовки круглого перетину шляхом чергування прокатки в циліндричних валках і розгінний калібрі, який має опуклий профіль з відповідним радіусом гребеня, забезпечує наявність в кожному з перших трьох проходів пластичних і пружно деформуються зон металу. При цьому останні надають стримуючий вплив на прагнення металу текти в довжину і забезпечують тим самим його підвищену розширення.

У першому проході, враховуючи конфігурацію заготовки (дроту), такими зонами є бічні частини металу, що знаходяться за межами прямого контакту металу з валками. Ці зони створюють стискають напруги в центральній частині металу (в зоні пластичної деформації) змушуючи метал текти в напрямку ширини.

У другому проході, коли один з валків має опуклий профіль картина напруженого стану, що має місце в першому проході повторюється, але в ще більшому ступені через штучне збільшення обтиску в центральній частині металу, викликаючи інтенсивне протягом металу в напрямку ширини. При цьому наявність плоскої поверхні з боку циліндричного валка полегшує осьову стабілізацію металу по відношенню до осі симетрії опуклою частини (гребеня) другого валка.

У третьому проході, з огляду на профіль металу після другого проходу, зони інтенсивної пластичної деформації мають місце на бічних ділянках заготовки. Тепер центральна частина металу, що піддається деформації в меншій мірі перешкоджає подовжньому течію бічних зон, створюючи в них стискають напруги.

### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторний прокатний стан кварто 55 / 250x200.
2. Микрометр, штангенциркуль, масштабна лінійка.
3. Зразки зі сталі (2 шт) і свинцю (1 шт) довжиною 150 ... 300 мм діаметром 12 ... 18 мм. Діаметри сталевих і свинцевого зразків повинні бути рівні.
4. Ножівка по металу.

### Порядок проведення експерименту

До початку прокатки на зразки поблизу їхніх кінців, ножівкою нанести дві поперечні ризики, відстань між якими прийняти за вихідну довжину  $L_0$

зразка. Стежити, щоб під час прокатки ризики перебували збоку (не в контакті з валками). Штангель визначити вихідний діаметр  $d_n$  заготовки.

Перший сталевий зразок прокатати до товщини  $h_k \approx (0,3 \dots 0,35) d_n$  за 4 ... 5 проходів з приблизно рівними значеннями абсолютних обтиснень  $\Delta h_i$  по проходах.

Другий сталевий зразок в першому проході прокатати з максимальним абсолютним обтисненням (з урахуванням обмежень по потужності приводу і можливої пробуксовки металу в валках), а потім з мінімальним числом наступних проходів довести кінцеву товщину цього зразка до отриманого значення  $h_k$  для першого зразка.

Свинцевий зразок прокатати з таким же режимом обтиснень, як і другий сталевий зразок.

Після кожного проходу при прокатці всіх зразків проводити виміри товщини  $h_i$ , ширини  $b_i$  і відстані  $L_i$  між ризиками.

Досвідчені значення занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати плющення круглої заготовки

Матеріал образца, проходи	$d_n$ , мм	$h_i(h_k)$ , мм	$\Delta h_i$ мм	$\Delta h_{i\Sigma}$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{i\Sigma}$ , %	$b_i$ , мм	$b_i/d_n$	$L_i$ , мм	$\lambda_i$	$\lambda_{i\Sigma}$
Образец із сталі № 1 1 2 3 4 5											
Образец із сталі № 2 1 2 3 4											
Образец із свинця 1 2 3 4											

#### Обробка результатів експериментів

За отриманими дослідними даними підраховати для кожного випадку прокатки абсолютне  $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$ , відносне  $\varepsilon_i = \Delta h_i / h_{i-1}$  обтиску і коефіцієнти витяжки  $\lambda_i = L_i / L_{i-1}$  в проході, а також сумарні їх значення

$\Delta h_{i\Sigma} = d_n - h_i$ ,  $\varepsilon_{i\Sigma} = \Delta h_{i\Sigma} / d_n$  і  $\lambda_{i\Sigma} = L_i / L_0$  з урахуванням попередніх проходів. У першому проході абсолютне обтиснення  $\Delta h_1 = d_n - h_1$ .

За отриманими даними для кожного випадку побудувати графічні залежності  $b_i / d_n = f(\varepsilon_{i\Sigma})$  і  $\lambda_{i\Sigma} = f(\varepsilon_{i\Sigma})$ .

Дати аналіз впливу режиму обтиснень і стану металу (а свинцю-вий зразок імітує гарячу прокатку) на розширення і витяжку металу при плющенні. Запропонувати рішення, спрямовані на збільшення розширення при виробництві стрічок шляхом плющення круглої заготовки.

### Контрольні питання

1. Який процес називають плющенням? Його особливості.
2. Які фактори впливають на величину розширення металу при плющенні?
3. Які особливості напруженого стану металу при плющі-ванні круглої заготовки в першому проході?
4. Що називають зонами прагнення до розширення?
5. Який закон пластичної деформації визначає обсяг зон прагнення до розширення?
6. Чи впливає і як обсяг зон прагнення до розширення на величину розширення?
7. Чи залежить розширення від обтиску і діаметра валків? Як?
8. Чи впливає і як дробність деформації на величину розширення?
9. З якою метою і як досягається вимушене розширення?
10. Який механізм досягнення більшого розширення при чергуванні прокатки в розгінних калібрах і валках з гладкою бочкою?

## 4 Лабораторна робота 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛЮЩЕННЯ КРУГЛОЇ ЗАГОТОВКИ, ПОЄДНАНИЙ З ПРОЦЕСОМ ВОЛОЧІННЯ ШЛЯХОМ ПРОШТОВХУВАННЯ

Мета роботи - вивчення процесу калібрування бічних крайок плющеної стрічки шляхом волочіння проштовхуванням, поєднаного з процесом прокатки, і впливу осьової сили в межочаговом проміжку (підпору) на величину розширення при плющенні.

### Загальні вказівки

В даний час актуальною для металургійних виробництв є завдання створення модульних технологій виробництва довгомірної продукції у вигляді смуг, стрічок, дроту та профілів з металів і сплавів. Це передбачає об'єднання декількох різних процесів деформації в один процес, тобто спільну

реалізацію процесів деформації. До їх числа можна віднести процеси прокатки-волочіння [15], прокатки-пресування і їх варіацій [16; 17].

Технічний результат такого об'єднання, в першу чергу, полягає в підвищенні ступеня безперервності і технологічності процесу прокатки і процесу деформації (волочіння, пресування) з яким її об'єднують.

Однак, кожен із зазначених процесів пластичної деформації металів має свої особливості. Поєднання процесів, як правило, здійснюють таким чином, щоб ці особливості, взаємно накладаючись один на одного, доповнювали один одного, приводячи до нової якості (зниження енерговитрат, підвищення точності прокатки, розширенню сортаменту і ін.).

Процес прокатки здійснюється завдяки наявності сил тертя на контакті металу з обертовими валками. Згідно класичним представленим теорії прокатки на сталій процес прокатки в осередку деформації (див. рис. 1.1) присутні зона відставання, де сили тертя з боку валків спрямовані по ходу прокатки, будучи активними силами, і зона випередження, в якій сили тертя спрямовані в протилежну сторону руху металу, створюючи реактивну дію і знижуючи ефективність процесу прокатки.

Отже, момент прокатки складається з моменту активних сил тертя ( $M_{\text{акт}}$ ) і моменту реактивних сил тертя ( $M_{\text{реак}}$ ):

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{акт}} - M_{\text{реак}} \quad (4.1)$$

При постійних ширині, радіусі валків, опорі деформації, коефіцієнті тертя, обтисненні (або вугіллі захоплення) момент прокатки буде постійним і змінити його, при інших рівних, умовах можливо тільки при спільній реалізації прокатки з одним з методів ОМД, стимулюючи таким чином, зростання протяжності зони відставання, коли реактивні сили тертя зони випередження переходять в активні і момент прокатки збільшується, досягаючи свого максимального значення, коли нейтральний кут  $\gamma$  (див. рис. 1.1) стане рівним нулю, тобто коли на весь вогнище деформації поширюється зона відставання.

Отже, поєднання передбачає більш повне використання сил тертя в осередку деформації прокатної кліті за рахунок виконання додаткових операцій, таких як деформування в неприводній кліті, деформування через матрицю під час волочіння або пресування.

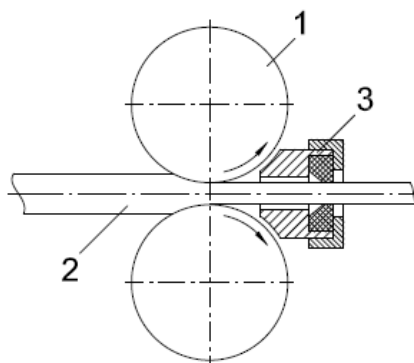
Спільна реалізація процесів прокатки і волочіння або пресування передбачає здійснення безперервного процесу пластичної деформації металу, по крайній мере, в двох осередках деформації, які мають у своєму розпорядженні по ходу руху металу так, щоб вогнище прокатки був джерелом енергії у вигляді осьової сили, достатньої для здійснення деформації металу в вогнищі волочіння або пресування.

Як приклад розглянемо безперервний процес <sup>1</sup> виготовлення стрічки плющеної, що передбачає здійснення в останній кліті плющильного стану

---

<sup>1</sup> На спосіб подана заявка на патент України (заявник - ДДМА, каф. АММ)

або в останньому проході комбінацію процесів прокатки і волочіння шляхом проштовхування металу через фільтру (рис. 4.1)



1 - валки плющильного табору, а ввесь 2 - заготовка; 3 - фільтру

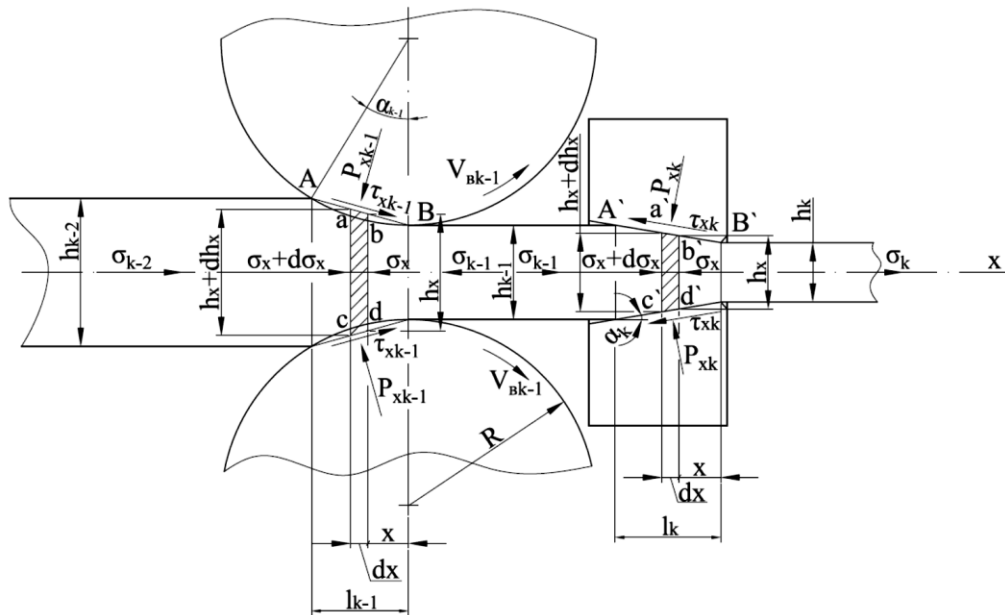
Малюнок 4.1 - Схема суміщеного процесу прокатки-волочіння проштовхуванням

Такий прийом, використовуючи енергію валків, дозволяє поєднати на виході з прокатної кліти процесу прокатки і волочіння і тим самим скоротити технологічний цикл, виключивши окрему операцію з калібрування стрічки. При цьому необхідна сила проштовхування металу в осередок волочіння, яка створюється валками, призводить до утворення підпору металу на виході з вогнища прокатки, що забезпечує додаткові стискають напруження в металі, а, отже, і умови для більш розвинутої пластичної течії металу в напрямку ширини, а також дозволяє підвищити якість плющення стрічок за рахунок зниження ймовірності появи тріщин і створення умов для освіти дрібнозернистої структури металу через сприятливу схему всебічного стиснення в осередках деформації при прокатці і волочіння проштовхуванням, а, отже, збільшити вихід придатної плющеної стрічки, а в сукупності підвищити продуктивність, в тому числі і за рахунок скорочення попередніх проходів при прокатці, підвищити якість поверхні металу, точність його геометричних розмірів і розширити сортамент по геометричних параметрах готової стрічки при використанні заготовки одного розміру.

Максимальне значення сили, необхідної для здійснення про-процесу волочіння шляхом проштовхування має місце, коли в осередку деформації при прокатці дотичні напруження по всій його довжині спрямовані в бік течії металу, тобто в цьому вогнищі деформації утворюється тільки зона відставання металу (рис. 4.2). Таким чином, реалізується граничний випадок прокатки з максимальною енергією валків.

Осьове напруження в металі в проміжку між осередками прокатки і волочіння  $\sigma_{k-1}$  (див. рис. 4.2) є, з одного боку, напругою підпору для вогнища прокатки, а, з іншого боку, - робочою напругою, необхідним для здійснення процесу волочіння проштовхуванням і ця умова існує при дотриманні певних співвідношень між витяжками металу в цих осередках деформації, а також значеннями опору металу деформації, геометричними параметрами вогнищ

деформації, умовами тертя на контактних поверхнях валків і фільери (волокни) і напруженнями натяжінь кінців стрічки на виході з вогнища волочіння і на вході в осередок прокатки.



Малюнок 4.2 - Схема напруг при реалізації суміщеного процесу прокатки-волочіння проштовхуванням при Однозонна ковзанні металу в валках

Ці співвідношення можна знайти, розглянувши умови рівноваги елементарних обсягів металу в осередках деформації при прокатці і волочіння і вирішивши їх спільно з умовами пластичності металу.

Після інтегрування і перетворень можемо записати, що:

значення необхідного осьового напруги для здійснення про-процесу волочіння шляхом проштовхування рівняється

$$\sigma_{k-1} = 2K_k \frac{1+a_k}{a_k} \left[ \left( \frac{h_{k-1}}{h_k} \right)^{a_k} - 1 \right] + \sigma_k \left( \frac{h_{k-1}}{h_k} \right)^{a_k}, \quad (4.2)$$

а при заданому стисненні, для забезпечення схеми прокатки з однозонним ковзанням металу в осередку деформації, коли на валках мають місце тільки зони відставання металу, необхідне значення напруги підпору металу на виході з валків при прокатці, так само:

$$\sigma_{k-1} = 2K_{k-1} \frac{1-a_{k-1}}{a_{k-1}} \left[ 1 - \left( \frac{h_{k-1}}{h_{k-2}} \right)^{a_{k-1}} \right] + \sigma_{k-2} \left( \frac{h_{k-1}}{h_{k-2}} \right)^{a_{k-1}}, \quad (4.3)$$



де  $2K_k, 2K_{k-1}$  - значення опору металу деформації відповідно в осередках волочіння і прокатки в останній кліті (або проході);

$a_k$  і  $a_{k-1}$  - коефіцієнти, що характеризують геометричні параметри і умови тертя відповідно в осередках волочіння і прокатки в останній кліті (або проході);

$\sigma_k$  і  $\sigma_{k-2}$  - значення напруг натяжений кінців стрічки відповідно на виході з вогнища волочіння і на вході в осередок прокатки в останній кліті (або проході);

$h_k, h_{k-1}$  і  $h_{k-2}$  - значення відповідно кінцевої, проміжної і вихідної товщини металу.

При відсутності осьових сил на кінцях стрічки, коли  $\sigma_k = 0$  і  $\sigma_{k-2} = 0$  з виразів (4.2) і (4.3) випливає, що

$$\sigma_{k-1} = 2K_k \frac{1+a_k}{a_k} \left[ \left( \frac{h_{k-1}}{h_k} \right)^{a_k} - 1 \right], \quad (4.4)$$

а

$$\sigma_{k-1} = 2K_{k-1} \frac{1-a_{k-1}}{a_{k-1}} \left[ 1 - \left( \frac{h_{k-1}}{h_{k-2}} \right)^{a_{k-1}} \right]. \quad (4.5)$$

При спільній реалізації процесів волочіння металу шляхом прошовування і прокатки з Однозонна ковзанням металу в осередку деформації, необхідні значення осьових напружень для здійснення процесу волочіння і процесу прокатки при відсутності натягу на кінцях стрічки визначаються виразами (4.4) і (4.5) та є рівними між собою.

Таким чином, беручи до уваги рівняння (4.4) і (4.5), маємо

$$2K_k \frac{1+a_k}{a_k} \left[ \left( \frac{h_{k-1}}{h_k} \right)^{a_k} - 1 \right] = 2K_{k-1} \frac{1-a_{k-1}}{a_{k-1}} \left[ 1 - \left( \frac{h_{k-1}}{h_{k-2}} \right)^{a_{k-1}} \right]. \quad (4.6)$$

Підставивши у вираз (4.6) значення коефіцієнтів витяжок металу в осередках деформації при прокатці і волочіння  $\lambda_k = h_{k-1}/h_k$  і  $\lambda_{k-1} = h_{k-2}/h_{k-1}$ , після перетворень отримаємо:

$$\frac{2K_k(1+a_k)a_{k-1}}{2K_{k-1}(1-a_{k-1})a_k} = \frac{\lambda_{k-1}^{a_{k-1}} - 1}{\lambda_{k-1}^{a_{k-1}}(\lambda_k^{a_k} - 1)}. \quad (4.7)$$

При наявності натяжінь  $\sigma_{k-2}$  і  $\sigma_k$  кінців стрічки, співвідношення їх напруг і з урахуванням виразів (4.2) і (4.3) має задовольняти умові:

$$\frac{\sigma_{k-2}}{\sigma_k} = \lambda_k^{a_k} \lambda_{k-1}^{a_{k-1}}. \quad (4.8)$$

Виконання умов (4.7) і (4.8) забезпечує можливість комбінації процесів прокатки в валках з циліндричною поверхнею з Однозонна ковзанням металу в осередку деформації і волочіння шляхом прошовування через фільтру, при цьому в осередку деформації при прокатці створюють силу, необхідну для прошовування металу.

#### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторний прокатний стан кварто 55 / 250x200.
2. Неприводна вертикальна кліть (роликовий волока).
3. Мікрометр, штангенциркуль.
4. Зразок зі сталі (1 шт) діаметром 12 ... 18 мм, довжиною 1500 мм.

#### Порядок проведення експерименту

До початку прокатки встановити на проводковий стіл прокатного стану з боку виходу металу з валків неприводну вертикальну кліть, яку використовувати в якості роликового волоки для поєднання процесу калібрування бічних крайок плющеної стрічки з процесом прокатки.

Виміряти вихідний діаметр зразка і здійснити прокатку (плющення) зразка з максимальним обтисненням в 1 прохід. Виміряти товщину  $h_1$  і ширину зразка по бочці  $b_1$ . Заескізувати в масштабі 2: 1 профіль поперечного перерізу зразка.

У другому проході з абсолютним обтисненням  $\Delta h = 1,5 \dots 2,5$  мм при незмінному зазорі між валками здійснити три досвіду:

в першому випадку - прокатати кінець зразка (близько 20% його початкової довжини) без обтиску бічних крайок в роликового волоку;

у другому випадку - продовжити прокатку частини зразка (близько 50% його початкової довжини) з деяким обтисненням кромки в роликового волоку;

в третьому випадку - завершити прокатку зразка (з недокатів в 10 ... 15% від його початкової довжини), обжавши кромки в роликового волоку до повного усунення бачкообразності крайок (наближаючись до стану пробуксовки металу в валках прокатного стану, коли резерв сил тертя в валках повністю вичерпаний).

У всіх випадках в процесі прокатки фіксувати струм двигуна кліти (по приладу на пульті управління), а після прокатки товщину і ширину металу в міжклітьових проміжку, а в другому і третьому випадках - і після калібрування. Заескізувати в масштабі 2: 1 профілі поперечних перерізів зразка в міжклітьових проміжку і після калібрування в роликового волоку.

Досвідчені дані занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати прокатки (плющення) і волочіння проштовхуванням (калібрування) круглої заготовки \*

Прохід	$h_i(h_k)$ , мм	$\Delta h_i$ мм	$\Delta h_{i\Sigma}$ мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{i\Sigma}$ , %	$V_i$ , мм	$V_i/d_n$	$V_{i\text{калибр}}$	Ток, А
1 прохід (предварительний)								*	*
2 проход: Опыт 1 Опыт 2 Опыт 3								*	

\* Вихідний діаметр заготовки  $d_n =$  мм. Марка стали - сталь .....

### Обробка результатів експериментів

За отриманими дослідними даними підрахувати для кожного випадку прокатки абсолютне  $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$  і відносне  $\varepsilon_i = \Delta h_i / h_{i-1}$ , обтиску в проході, а також сумарні їх значення  $\Delta h_{i\Sigma} = d_n - h_i$  і  $\varepsilon_{i\Sigma} = \Delta h_{i\Sigma} / d_n$  з урахуванням 1-го (попереднього) проходу.

Дати аналіз впливу рівня осьової сили в межочаговом проміжку (підпору) на величину розширення при плющенні, орієнтуючись за значеннями струму двигуна прокатної кліти.

### Контрольні питання

1. Які сили в осередку деформації визначають значення моменту прокатки?
2. Яким чином можна ініціювати зростання моменту прокатки або забезпечити більш повне використання резерву сил тертя в осередку деформації?
3. Яким чином слід розташовувати вогнища деформації суміщаються процесів ОМД?

4. Дайте визначення процесу волочіння, вкажіть його різновиди.
5. Як впливають на розширення переднє і заднє натягу? Підпори? Поясніть механізм зміни ширини металу в цих випадках?
6. Які переваги поєднання процесів плющення і калібрування стрічки на виході з валків?
7. В якому випадку досягається максимальне використання енергії валків прокатного стану?
8. Який принцип створення умов для одночасного здійснення двох комбінованих процесів ОМТ?

## 5 Лабораторна робота 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДНПВ БЕЗ НАТЯГНЕННЯ. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ ПРИ ПРОКАТЦІ І ВОЛОЧІННЯ І ФАКТИЧНОЇ ЗНАЧЕННЯ ОПОРУ МЕТАЛУ ДЕФОРМАЦІЇ

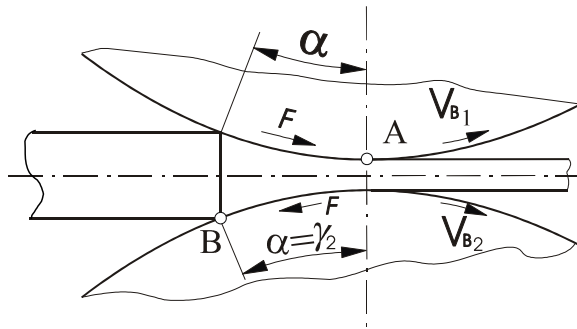
Мета роботи - визначення умов реалізації процесу деформації металу між нерухомим і приводним валками (ДНПВ), практичне визначення коефіцієнтів тертя при прокатці і волочіння, а також фактичного значення опору металу деформації на основі нового способу шляхом реалізації процесу ДНПВ без натягу.

#### Загальні вказівки

Як відомо, процес симетричною прокатки характеризується наявністю підпирає дії контактних сил тертя на деформується обсяг металу (див. лаб. роб. № 1, рис. 1.1), що істотно знижує ефективність процесу.

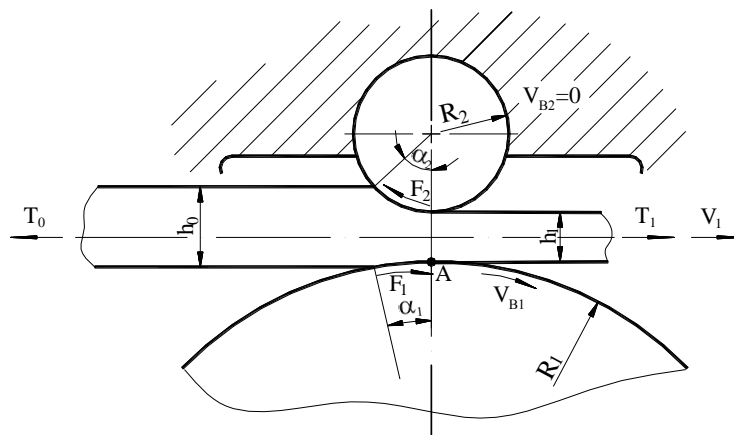
Поряд з традиційною (симетричною) прокаткою останнім часом застосовують нові вельми ефективні способи деформації тонких смуг, серед яких особливе місце займають методи, засновані на зміні схеми напруженого стану металу шляхом створення примусової кінематичної асиметрії осередку деформації.

Наприклад, реалізація процесу асиметричної прокатки в валках, що обертаються з різними окружними швидкостями (рис. 5.1), коли співвідношення швидкостей валків дорівнює коефіцієнту витяжки смуги  $\lambda$  дозволяє повністю виключити підпирають дію контактних сил тертя в осередку деформації [15].



Малюнок 5.1 - Схема осередку деформації при симетричній прокатці з співвідношенням швидкостей робочих валків

У ряді випадків досить ефективно застосуванням нового технологічного процесу деформації тонких смуг між нерухомим і приводним валками (рис. 5.2), що отримав назву процесу ДНПВ [15].



Малюнок 5.2 - Схема реалізації процесу ДНПВ

Процес ДНПВ полягає в пластичній деформації смуги між нерухомим і приводним валками, при цьому в загальному випадку переміщення металу в осередку деформації забезпечується за рахунок позитивної різниці переднього  $T_1$  і заднього  $T_2$  натяжінь, прикладених до кінців смуги, і активних сил тертя на контакті з приводним валком, швидкість якого  $V_{B1}$  дорівнює швидкості переднього  $V_1$  кінця смуги. Остання умова забезпечує утворення активних сил тертя (див. рис. 5.2), спрямованих в бік руху смуги, при цьому на нерухомому валці ( $V_{B2} = 0$ ) сили тертя спрямовані в протилежну сторону. Таким чином по всій довжині осередку деформації при ДНПВ підпирають дію сил зовнішнього тертя в осередку деформації виключається, оскільки сили тертя на протилежних контактних поверхнях спрямовані в різні боки і створюють додатково напруги зсуву, що робить істотний вплив на зниження нормальних контактних напружень і полегшує можливість отримання якісного прокату.

Величина напруги переднього натягу, необхідного і достатнього для існування процесу ДНПВ [15]:

$$\sigma_1 = 2K(a + 1)[1 - (1 - \varepsilon)^a] / a; \quad (5.1)$$

$$a = (\mu_2 - \mu_1) / [\operatorname{tg}(\alpha_1 / 2) + \operatorname{tg}(\alpha_2 / 2)], \quad (5.2)$$

де  $2K$  - середньоінтегральне значення опору металу деформації;  
 $\varepsilon$  - ступінь відносної деформації;

$\mu_1, \mu_2$  - коефіцієнти тертя на контактних поверхнях приводного і нерухомого валків;

$\alpha_1, \alpha_2$  - кути контакту металу на приводному і нерухомому валках.

При наявності заднього натягу

$$\sigma_1 = 2K(a + 1)[1 - (1 - \varepsilon)^a] / a + \sigma_0(1 + \varepsilon)^a, \quad (5.3)$$

де  $\sigma_0$  - напруга заднього натягу.

При реалізації процесу ДНПВ для всіх випадків  $a > -1,0$  середні значення нормальних напружень в осередку деформації менше опору металу деформації, тобто коефіцієнт напруженого стану металу в осередку деформації  $n_\sigma < 1,0$ .

При  $a = -1,0$   $n_\sigma = p_{\text{ср}} / 2K = 1$ , тобто

$$p_{\text{ср}} = 2K. \quad (5.4)$$

У цьому ж випадку, коли  $a = -1,0$ , можлива реалізація процесу ДНПВ без перегинів. При цьому, беручи до уваги вираз (5.2), має виконуватися умова [15]:

$$\mu_1 - \mu_2 \geq \operatorname{tg}(\alpha_1 / 2) + \operatorname{tg}(\alpha_2 / 2). \quad (5.5)$$

Умови (5.4) і (5.5) лягли в основу комплексного методу визначення коефіцієнтів тертя і для випадку сталого процесу прокатки ( $\mu_1$ ) і для випадку волочіння ( $\mu_2$ ), а також значення опору металу деформації ( $2K$ ).

Коефіцієнт тертя ковзання можна знайти тільки для процесів з запропонованої кінематикою, в умовах суцільного ковзання металу по всій контактній поверхні. Для процесів з непередписаною кінематикою, наприклад, для традиційного процесу прокатки можна встановити відношення повної сили тертя до нормального сили в зонах односпрямованого ковзання, наприклад, або в зоні відставання, або в зоні випередження (див. рис. 1.1). Коефіцієнт тертя ковзання для процесів з непередписаною кінематикою на контакті можна визначити, штучно створивши умова суцільного ковзання по всій контактній поверхні. Наприклад, при прокатці можна для цього загальмувати смугу в валках, послідовно збільшуючи обтиснення до початку пробуксовки або прикладаючи натяг до заднього кінця деформуваної смуги.

У всіх випадках значення коефіцієнта тертя прямо або побічно визначається тільки експериментально.

Методи визначення коефіцієнта тертя можна розділити на чотири групи [2, 18].

Перша група заснована на тому, що вимірюється параметр, теоретична формула для розрахунку якого включає коефіцієнт тертя, а значення коефіцієнта тертя визначається зворотним перерахунком.

До числа методів першої групи відноситься, наприклад, метод тиску [2], який передбачає вимірювання сили прокатки  $P_{оп}$  при сталому процесі і подальший підбір такого значення коефіцієнта тертя  $\mu$ , яке будучи підставленим в одну з теоретичних (найбільш обґрунтованих) формул для визначення цієї сили, забезпечує збіг досвідчених  $P_{оп}$  і розрахункових  $P_p$  її величин. У подібних випадках може бути використано і значення середнього нормально-го контактного напруження  $p_{сер}$ .

Друга група методів полягає в експериментальному визначенні за допомогою вимірювальних пристроїв нормального і дотичного (тангенціального) сили або їх проекцій на координатні осі з подальшим прямим розрахунком (з урахуванням геометрії зони деформації) коефіцієнта тертя. Ці методи дають найбільш близькі до реальних значення коефіцієнта тертя.

До числа методів другої групи відносяться методи, засновані, наприклад [7], на одночасному вимірі проекцій тиску і сил тертя двома месдоза, встановленими в тілі валка і нахиленими в різні боки до контактної поверхні або одночасному вимірі нормальних і дотичних контактних сил за допомогою спеціального силувимірювального валка і розрізного торсіометра. Для цих цілей застосовуються і інші спеціальні пристрої.

Третя група методів використовує кінематичні і силові особливості процесів ОМД, які дозволяють без вимірювальної апаратури визначити значення коефіцієнта тертя.

До числа методів третьої групи відносяться, наприклад, методи преділового обтиску і максимального кута захоплення [2; 19 (див. лаб. роб. № 3)], метод випередження (див. лаб. роб. № 2).

Четверта група методів використовує прямі вимірювання контактних напружень для визначення ставлення суми сил тертя до суми тисків. Ці методи дозволяють визначити значення коефіцієнта тертя  $\mu$  в різних процесах, в тому числі і з непередписаною кінематикою в реальних умовах деформації. Результати досліджень дозволяють знайти і ставлення дотичних напружень  $\tau$  до нормальними напруженням  $p$  в будь-якій точці контакту. Однак такі значення не можна вважати коефіцієнтами тертя, так як коефіцієнт тертя в класичному розумінні являє собою відношення повної сили тертя до нормального сил і не враховує через трансформаційних змін напруг по контакту.

До числа методів четвертої групи відноситься, наприклад, метод штифта (точкової месдоза) [20; 21], в якому використовують однокомпонентні і трикомпонентні (універсальні) штифти (точкові месдоза), а також похилі штифти для одночасного виміру нормальних і дотичних напружень, метод розрізного інструменту, поляризаційно-оптичний метод.

Тут доречно виділити і п'яту групу методів визначення коефіцієнта тертя, які засновані на штучному створенні умови суцільного ковзання по всій контактній поверхні для процесів з непередписаною кінематикою в поєднанні з вимірюванням сили і моменту прокатки або сили прокатки і заднього натягу з подальшим розрахунком коефіцієнта тертя. До їх числа відносяться метод Бленда-Форда (метод крутного моменту), кліщовий метод [2; 19 (лаб. роб. № 3); 21].

У методі Бленда-Форда заднім натягом  $T_0$  смуги домагаються того, щоб випередження  $S$  стало рівним нулю, тобто швидкість руху смуги  $V_1$  на виході з валків наблизилася за своїм значенням до окружної швидкості валків  $V_B$  ( $V_1 = V_B$ ). В такому випадку нейтральне перетин переміщається в положення площини виходу металу з валків (нейтральний кут  $\gamma = 0$ ) і на весь вогнище деформації поширюється зона відставання, в якій сили тертя на контактній поверхні будуть діяти тільки в одному напрямку - в сторону руху металу.

Однозначність дії сил тертя дає можливість по виміряним крутним моментом  $M$  на валку і рівнодіюча контактних сил  $P$  визначити коефіцієнт тертя  $\mu_y$  при сталому процесі прокатки:

$$\mu_y = M / PR, \quad (5.6)$$

де  $R$  - радіус валка.

Пропонований, заснований на схемі реалізації процесу ДНПВ без натягу комплексний метод дозволяє визначити коефіцієнти тертя і для випадку сталого процесу прокатки (коефіцієнт тертя  $\mu_1$ ) і для випадку волочіння (коефіцієнт тертя  $\mu_2$ ) [15].

Підібравши величину обтиску, при якому на приводному валці гарантовано відсутня зона випередження, тобто  $\gamma = 0$ , а, отже,  $S = 0$  і вимірявши значення крутного моменту  $M_1$  на приводному валки і силу деформації  $P$  при реалізації процесу ДНПВ без перегинів, використовуючи залежність ( 5.6), можна визначити коефіцієнт тертя при прокатці  $\mu_1$  за формулою:

$$\mu_1 = M_1 / PR_1, \quad (5.7)$$

де  $R_1$  - радіус приводного валка кліті ДНПВ.

У цьому випадку контроль правильності вибору обтиску можна здійснити за значенням  $S$ , використовуючи метод кернів ( $S$  має дорівнювати нулю).

Беручи до уваги умова (5.5) існування процесу ДНПВ без натягу, значення коефіцієнта тертя на контактні металу з нерухомим валком (під час волочіння) можна визначити за формулою

$$\mu_2 = \mu_1 - [\text{tg}(\alpha_1 / 2) + \text{tg}(\alpha_2 / 2)]. \quad (5.8)$$



Діаметри приводного і нерухомого валків при ДНПВ значно відрізняються і їх відношення може перебувати в інтервалі 3 ... 10. В такому діапазоні відносин діаметрів валків обтиснення смуги практично повністю здійснюється на валку меншого діаметра (нерухомому).

Введемо коефіцієнт  $k$ , що характеризує відмінність в радіусах приводного  $R_1$  і нерухомого  $R_2$  валків

$$k = R_1 / R_2. \quad (5.9)$$

Тоді відомі співвідношення [7] для визначення довжини дуги контакту  $l$  і кутів контакту на великому  $\alpha_1$  і малому  $\alpha_2$  валках для абсолютно жорстких валків можуть бути представлені у вигляді [15]

$$l = \sqrt{2kR_2\Delta h / (k + 1)}; \quad (5.10)$$

$$\alpha_1 = \arccos[1 - \Delta h / k(k + 1)R_2]; \quad (5.11)$$

$$\alpha_2 = \arccos[1 - k\Delta h / (k + 1)R_2], \quad (5.12)$$

де  $\Delta h$  - абсолютне обтиснення смуги.

Крім значень  $\mu_1$  і  $\mu_2$ , беручи до уваги умова (5.4), для випадку плоскої деформації можна визначити середньоінтегральне значення опору металу деформації:

$$2K = P_{cp} = P / b_{cp}l, \quad (5.13)$$

де  $b_{cp}$  - середня ширина смуги (

Для розрахунку довжини дуги контакту  $l$  використовуємо залежність (5.10).

З огляду на, що  $2K = 1,15\sigma_\phi$  [1; 7], для отриманої величини відносного обтиску  $\varepsilon$  знайдемо і фактичний опір металу деформації:

$$\sigma_\phi = 2K / 1,15. \quad (5.14)$$

#### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторний прокатний стан дуо 100 з валковим вузлом ДНПВ 30/100, оснащений тензометричної апаратурою для вимірювання сили і моменту прокатки на приводному валки.
2. Мікрометр, штангенциркуль.
3. Технологічна мастило для поверхні смуги з боку нерухомого валка.
4. Зразки (3 шт) з міді або латуні товщиною 0,5 ... 1,0 мм, шириною 10 ... 20 мм, довжиною 200 мм. Стан зразків - відпалені.

## Порядок проведення експерименту

На поверхню приводного валка наносять керни вимірюють відстань  $l_v$  по дузі між ними. Визначають діаметри приводного  $D_1$  і нерухомого  $D_2$  валків. Попередньо вимірявши вихідну товщину  $h_0$  і ширину зразків здійснюють їх деформацію з вимірюванням сили і моменту прокатки на приводному валки.

Месдоза і силовимірювальний шпindelь приводного валка попередньо тарують.

Перший зразок деформують в сухих (знежирених) валках з сухими поверхнями смуги. При прокатці другого і третього зразків використовують два типи мастил, які наносять на поверхню смуги з боку нерухомого валка. Друга поверхню смуги і валка - сухі.

З огляду на обмежені можливості захоплення металу при ДНПВ передній кінець смуги спочатку подають в зазор між валками, який перевищує вихідну товщину смуги  $h_0$ , а потім натискним пристроєм встановлюють необхідне обтиснення, підбираючи його так, щоб випередження  $S$  дорівнювало нулю. Після цих дій включають вимірювальну апаратуру і привід кліті. Обтиснення при прокатці в залежності від ефективності мастила з боку нерухомого валка може перебувати в межах 15 ... 50%.

## Обробка результатів експерименту

Вихідні та кінцеві розміри зразків і відстані  $l_1$  між відбитками кернів на смугі, а також експериментальні значення сили  $P$  і моменту прокатки на приводному валці  $M_1$  для кожного зразка занести в таблицю 5.1.

Використовуючи залежність (5.7), визначити значення  $\mu_1$  для сухих валків, а на їх основі, використовуючи залежності (5.8), (5.9), (5.11) і (5.12) знайти значення  $\mu_2$  для різних мастил.

За формулами (5.13) і (5.14) з урахуванням залежності (5.10) визначити значення  $\sigma_\phi$  для різних  $\epsilon$ .

За отриманими даними побудувати графічні залежності  $\mu_1 = f(\epsilon)$  і  $\sigma_\phi = f(\epsilon)$ .

Таблиця 5.1 - Досвідчені значення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  і  $\mu_2$ , а також фактичного опору металу деформації ( $R_1 = \text{мм}$ ;  $R_2 = \text{мм}$ ;  $k = R_1 / R_2 =$ ,  $B = \text{мм}$

№ образца	Вид смазки	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\epsilon$ , %	$V_0$ , мм	$V_1$ , мм	$\Delta V$ , мм	$P$ , Н	$M_1$ , Нмм	$l_1$ , мм	$S$ , %	$\alpha_1$ , рад	$\alpha_2$ , рад	$l_1$ , мм	$\mu_1$	$\mu_2$	$P_{cp}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_\phi$ , Н/мм <sup>2</sup>
1																			
2																			
3																			

Контрольні питання

1. У чому особливості процесу прокатки-волочіння (процесу ПВ)?
2. У чому полягає процес ДНПВ, його особливості?
3. Які умови реалізації процесу ДНПВ без перегинів?
4. У чому полягають труднощі визначення коефіцієнта тертя для процесів з непередписаною кінематикою?
5. Назвіть методи визначення коефіцієнта тертя. Дайте їх класифікацію.
6. Вкажіть методи, засновані на штучному створенні умови суцільного ковзання металу по всій контактній поверхні. У чому суть цих методів?
7. Опишіть метод Бленда-Форда (метод крутного моменту).
8. У чому суть нового комплексного методу, заснованого на схемі реалізації процесу ДНПВ без натягу?
9. Опишіть методику визначення коефіцієнтів тертя і опору металу деформації на основі методу ДНПВ без перегинів.
10. З яких умов вибирається обтиснення при використанні методу ДНПВ без перегинів для визначення коефіцієнтів тертя?

## 6 Лабораторна робота № 6

### ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ СИМЕТРИЧНО ПРОКАТКИ-ДНХВ

Мета роботи - вивчення комбінованого процесу симетричною прокатки- деформації металу між нерухомим і холостим валками (ДНХВ) і впливу обтиску в кліті ДНХВ на величину випередження і енергосилові параметри в кліті симетричною прокатки

#### Загальні вказівки

Як було відзначено в лабораторній роботі № 5 (див. рис. 5.2) реалізація процесу ДНПВ в необхідному кінематичному режимі обумовлена наявністю строго певній функціональній зв'язку між напруженнями переднього і заднього натяжінь смуги. Переміщення смуги в осередку деформації при ДНПВ в загальному випадку забезпечується за рахунок позитивної різниці переднього і заднього натяжнь, прикладених до кінців смуги, а також активних сил зовнішнього тертя на контактні з приводним валком [15].

Недостатній рівень активної енергії, що повідомляється смугі одним приводним робочим валком кліті ДНПВ, викликає необхідність оснащення стану моталками з підвищеним значенням натягу смуги на барабані. У цьому відношенні особливий інтерес представляє спільна реалізація процесів ДНПВ і симетричною прокатки на одному прокатному стані [15].

Спільна реалізація процесів ДНПВ і симетричною прокатки передбачає здійснення безперервного процесу пластичної деформації смуги, при наймі, в двох осередках деформації, де перший по ходу руху смуги вогнище дефор-

мації призначений для реалізації процесу ДНПВ, а другий - для реалізації процесу симетричною прокатки.

Подібний принцип суміщення двох процесів, один з яких процес симетричною прокатки, ми розглянули в лабораторній роботі № 4. При цьому слід нагадати, що спільна реалізація двох процесів можлива в результаті використання резерву активних сил тертя в осередку симетричною прокатки, в якому при суміщенні стимулюється зростання протяжності зони відставання, коли реактивні сили тертя зони випередження переходять в активні і момент прокатки збільшується.

При більшій кількості вогнищ деформації ДНПВ і симетричною прокатки останні повинні чергуватися таким чином, щоб кожен осередок симетричною прокатки був джерелом переднього натягу, достаточного для здійснення деформації смуги в осередку ДНПВ □ 15; 22□.

Значення цього міжклітьових натягу залежить від умов деформації у вогнищі ДНПВ: величини обтиску, різниці в коефіцієнтах тертя на приводному і нерухомому валках, співвідношення діаметрів цих валків. Таке поєднання процесів симетричною прокатки і ДНПВ дозволяє використовувати кліті симетричною прокатки в ролі тягнуть органів і подавати в валки цих клітей калібрований підкат, отриманий в осередку ДНПВ.

Це забезпечує умови отримання готового прокату зі зниженою різновщинністю, дає можливість інтенсифікації процесу прокатки □ 15; 23; 24□.

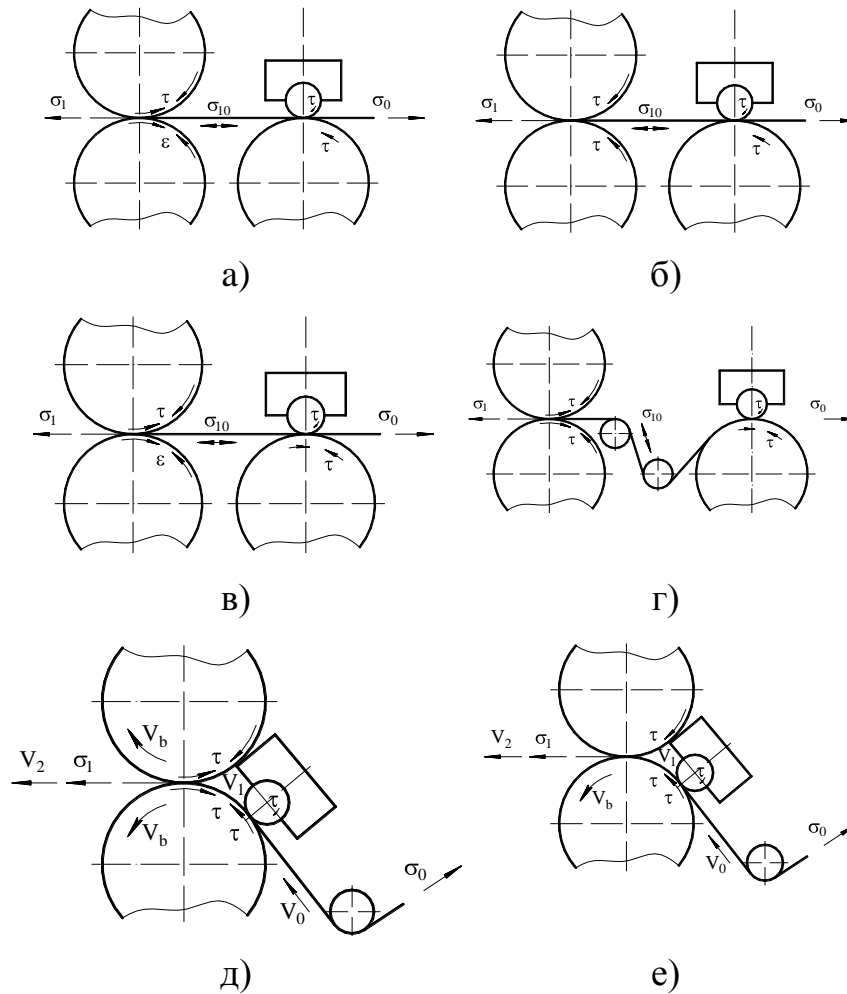
При спільній реалізації процесів симетричною прокатки і ДНПВ можна допустити трансформацію процесу симетричною прокатки в процес з Однозонна ковзанням металу в осередку деформації (процес з нульовим випередженням металу), що досягається створенням відповідного рівня заднього натягу □ 15; 25□, а процес ДНПВ трансформувати в процес деформації між нерухомим і холостим валками (ДНХВ), що перетворює кліть ДНПВ в калібрувальний блок без приводу.

Таким чином, з числа можливих варіантів спільної реалізації процесів ДНПВ (ДНХВ) і симетричною прокатки можна виділити шість основних, чотири з яких (рис. 6.1, а, б, в, г) передбачають здійснення суміщення процесів принаймні в двох клітях, а два (рис. 6.1, д, е) - в одній кліті шляхом створення двох вогнищ деформації на одному приводному валки кліті.

Схема, представлена на рис. 6.1, а, передбачає спільну реалізацію процесів ДНПВ - симетричною прокатки в звичайному їх вигляді.

Особливістю варіанта, представленого на рис. 5.1, б, є відсутність випередження металу в валках кліті симетричною прокатки, що досягається підбором відповідних рівнів заднього, в даному випадку міжклітьових натягу і обтиску металу. Таким чином, в кліті симетричною прокатки створюється вогнище деформації, в якому на контактних поверхнях валків мають місце тільки зони відставання. Це забезпечує односпрямованість активних сил зовнішнього тертя і сприяє усуненню їх впливу на деформується обсяг металу, що веде до зниження сили деформації і полегшує отримання прокату зі зниженою різновщинністю.

У варіанті, наведеному на рис. 6.1, в першому осередку деформації в загальному випадку реалізується процес ДНХВ з зонами відставання і випередження металу на контактній поверхні холостого валка. У другому осередку має місце процес симетричної прокатки з двостороннім ковзанням металу в осередку деформації при підвищеній протяжності зони відставання зважаючи явно збільшеного напруження міжклітьових натягу  $\sigma_{10}$ . Перевагою схеми є простота реалізації, так як кліть ДНХВ не має приводу, що полегшує завдання модернізації діючих станів.



а - процес ДНПВ - симетричною прокатки; б - процес ДНПВ - симетричною прокатки з нульовим випередженням; в - процес ДНХВ - симетричною прокатки; г - процес ДНПВ (ДНХВ) з охопленням приводного валка смугою - симетричною прокатки; д - процес ДНПВ - симетричною прокатки в одній кліті; е - процес ДНПВ - симетричною прокатки з нульовим випередженням в одній кліті

(ДНХВ) - симетричною прокатки

Малюнок 6.1 - Схеми спільної реалізації процесів ДНПВ

Усунути підпір сил зовнішнього тертя в осередку ДНХВ можна шляхом охоплення холостого валка смугою (див. рис. 6.1, г). При достатньому

рівні міжклітьових натягу і значенні кута охоплення холостого валка смугою його лінійна швидкість буде дорівнює швидкості смуги в межочаговом проміжку, що і дозволить забезпечити на контактній поверхні цього валка наявність лише зони відставання. У другому осередку деформації за розглянутою схемою через підвищеного рівня межочагового натягу доцільно реалізувати процес симетричною прокатки з нульовим випередженням.

Цікавим є спільна реалізація процесів ДНПВ і симетричною прокатки в одній кліті (див. рис. 6.1, д, е). При цьому мають місце два вогнища деформації на контактній поверхні одного з приводних валів і можуть бути здійснені процеси симетричною прокатки як з двозонним ковзанням металу в осередку деформації (див. рис. 6.1, д), так і з нульовим випередженням металу (див. рис. 6.1, е). Робочі приводні валки виконують функцію тягне механізму, створюючи необхідну для існування процесу ДНПВ величину переднього натягу. Наявність охоплення приводного валка смугою забезпечує зону нечутливості процесу ДНПВ до коливань натяжінь, вихідної товщини смуги і її механічних властивостей. Все це позитивно позначається на точності одержуваного прокату.

Реалізація схеми, наведеної на рис. 6.1, д, супроводжується пробуксовкою приводного валка в осередку ДНПВ і на дузі охоплення цього валка смугою.

Зі співвідношення середніх швидкостей металу в осередках симетричною прокатки ( $V_{СП}$ ) і ДНПВ ( $V_{ДНПВ}$ ) [15]

$$V_{СП} / V_{ДНПВ} = \lambda_1 \left( 1 + \lambda_2 \right) \left( 1 + \lambda_1 \right)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - відповідно коефіцієнти витяжок в осередках ДНПВ і симетричною прокатки, видно, що ступінь пробуксовки валка в осередку ДНПВ тим менше, чим менше витяжка металу в осередку симетричною прокатки. При  $\lambda_1 = \lambda_2$   $V_{СП} / V_{ДНПВ} = \lambda_1$ .

Реалізація варіанту прокатки, представленого на рис. 6.1, е, можлива при наявності значної величини напруги  $\sigma_{10}$  натягу смуги в межочаговом проміжку, що передбачає підвищену обтиснення металу в осередку ДНПВ.

### Матеріальне забезпечення

1. Лабораторний безперервний прокатних стан за схемою, наведеною на рис. 6.1, в для спільної реалізації процесів ДНХВ-симетричною прокатки (СП) з клітьями ДНХВ 30/100-симетричною прокатки дуо-100, оснащений тензOMETричною апаратурою для вимірювання сил прокатки в клітьях ДНХВ і СП і моменту прокатки в кліті СП.

2. Мікрометр, штангенциркуль.

3. Технологічна мастило для поверхні смуги з боку нерухомого валка кліті ДНХВ.



За отриманими даними побудувати такі графічні залежності:  $P_{\text{днхв}} = f(\epsilon_{\text{днхв}})$   $P_{\text{СП}} = f(\epsilon_{\text{днхв}})$  при постійному значенні загального обтиску  $\epsilon_{\text{общ}}$ , а також випередження  $S_{\text{СП}}$  як  $S_{\text{СП}} = f(\epsilon_{\text{днхв}})$  і моменту  $M_{\text{СП}} = f(\epsilon_{\text{днхв}})$ .

Проаналізувати отримані результати.

### Контрольні питання

1. Вкажіть принципи поєднання прокатки з іншими процесами ОМД.
2. Як реалізувати процес безперервної прокатки з великим числом осередків деформації ДНПВ (ДНХВ)?
3. Які переваги поєднання процесів симетричною прокатки і процесів ДНПВ (ДНХВ)?
4. Опишіть варіанти спільної реалізації процесів ДНПВ (ДНХВ).
5. У чому полягають особливості та переваги процесів ДНХВ?
6. Які фактори впливають на величину випередження при симетричній прокатці?

### Список рекомендуемой литературы

1. **Целиков, А. И.** Основы теории прокатки / А. И. Целиков. – М. : Металлургия, 1965. – 247 с.
2. **Грудев, А. П.** Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 287 с.
3. **Грудев, А. П.** Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
4. **Белосевич, В. К.** Трение, смазки и теплообмен при холодной прокатке листовой стали / В. К. Белосевич. – М. : Металлургия, 1989. – 256 с.
5. **Капланов, В. И.** Высокоскоростная холодная прокатки тонких полос / В. И. Капланов. – Киев : Вища школа, 1993. – 254 с.
6. **Ермилов, В. В.** Закономерности процессов трения в рабочих клетях станов холодной прокатки : монография / В. В. Ермилов, Э. А. Гарбер, И. В. Ягудин. – Череповец : ЧГУ, 2011. – 178 с.
7. **Целиков, А. И.** Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 318 с.
8. **Потапкин, В. Ф.** Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 315 с.
9. **Владимиров, Ю. В.** Производство плющеной стальной ленты / Ю. В. Владимиров, П. П. Нижник, Ю. А. Пуртов. – М. : Металлургия, 1985. – 119 с.
10. **Диомидов, Б. Б.** Технология прокатного производства / Б. Б. Диомидов, Н. В. Литовченко. – М. : Металлургия, 1979. – 478 с.
11. **Капланов, В. И.** Пути развития производства плющеной ленты / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(20). – С. 205–208.



12. Пат. 107692 UA, МПК В 21 В 1/00, В 21 В 9/00. Спосіб виготовлення стрічок плющенням / В. А. Федорінов, В. В. Аржавітін, М. В. Федоринов, А. М. Аксенчук ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № U201510622 ; заявл. 30.10.2015 ; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

13. Пат. 108956 UA, МПК В 21 В 9/00. Спосіб виготовлення стрічок плющенням / В. А. Федорінов, В. В. Аржавітін, М. В. Федоринов, А. М. Аксенчук ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № U201513098 ; заявл. 30.12.2015 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

14. **Федоринов, М. В.** Исследование процесса плющения круглой проволоки методами интенсивной пластической деформации / М. В. Федоринов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1(42). – С. 214–222.

15. **Федоринов, В. А.** Процесс ДНПВ: теория, технология, конструкции : монография / В. А. Федоринов. – Краматорск : ДГМА, 2003. – 316 с.

16. **Сидельников, С. Б.** Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, К. Н. Довженко, Н. Н. Загиров. – М. : МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

17. **Данченко, В. М.** Теорія процесів обробки металів тиском : підручник / В. М. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.

18. **Зильберг, Ю. В.** Теория обработки металлов давлением : монография / Ю. В. Зильберг. – Днепропетровск : Пороги, 2009. – 434 с.

19. **Федоринов, В. А.** Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Технологические линии и комплексы металлургических цехов» / В. А. Федоринов, Ю. К. Доброносков. – Краматорск : ДГМА, 2015. – 84 с.

20. **Клименко, П. Л.** Контактные напряжения при прокатке : монография / П. Л. Клименко, В. Н. Данченко. – Днепропетровск : Пороги, 2007. – 292 с.

21. **Василев, Я. Д.** Теорія поздовжньої прокатки : підручник / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

22. А. с. 1563028 СССР, МКИ В21В 13/00. Непрерывный прокатный стан / В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Ю. В. Потапкин (СССР). – № 4434307 ; заяв. 02.06.88.

23. **Федоринов, В. А.** О совместной реализации процессов ДНПВ и симметричной прокатки / В. А. Федоринов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 155–159.

24. **Потапкин, В. Ф.** Влияние параметров клетей на разнотолщинность в процессе ДНПВ-симметричной прокатки / В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, Ю. В. Потапкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 3. – С. 105–106.

25. А.с. 1534847 СССР, МКИ В 21 В 1/22. Способ непрерывной прокатки тонких полос // В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Ю. В. Потапкин (СССР). – № 4357841/31-02 ; заявл. 04.02.88.