

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ**

КУПРІКОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТКИ ШТАБ
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ
ПО ВИЗНАЧЕННЮ ВИПЕРЕДЖЕННЯ**

Спеціальність 05040104 – обробка металів тиском

Автореферат

Магістерського проекту на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня “Магістр”

Запоріжжя - 2016

Робота виконана в Запорізькій державній інженерній академії Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Науковий консультант: Доктор технічних наук, професор
НІКОЛАЄВ ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ,
Запорізька державна інженерна академія,
завідувач кафедри обробки металів тиском
факультету Металургії

Захист магістерської роботи відбувся «13» січня 2016 р. о «13⁰⁰» годині на захисті дипломних проектів в ВНЗ «Запорізька державна інженерна академія» МОН України за адресою: 69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226, ауд. л222.

В.о. вченого секретаря

Державної атестаційної комісії

Мамонтов Г.Т.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема неплоскостності штаб дуже розповджене явище, що значно погіршує якість виходу готової продукції. При сучасному виробництві значний відсоток отриманих штаб після процесу холодної прокатки має дефект неплоскостності.

Цілі і задачі роботи:

- Використовуючи новий метод дослідити розподіл параметрів прокатки по ширині прокатуваних штаб;
- Дослідити, як змінюються параметри прокатки зі збільшенням обтиску при несиметричному прокатуванні;
- Зробити аналітично-пошукову частину теоретичної інформації для більш детального огляду проблеми різнотовщинності на неплоскісності штаб;
- Провести експерименти прокатки свинцевих на алюмінієвих штаб та отримати результати;
- Проаналізувати результати експериментів, побудувати графіки та зробити відповідні висновки з даної проблеми.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що експерименти проводяться з використанням унікального методу, який дозволяє отримати більш точні результати досліджень без використання спеціальної апаратури та обладнання.

Практичне значення одержаних результатів. Використання отриманих результатів експериментів при процесі холодної прокатки штаб дозволяє значно підвищити економічну складову процесу. Тому що проблема неплоскостності штаб дуже розповджене явище, що значно погіршує якість виходу готової продукції. При сучасному виробництві значний відсоток отриманих штаб після процесу холодної прокатки має дефект неплоскостності. Використання результатів експериментальних досліджень дозволяє значно зменшити відсоток виходу штаб з таким дефектом. Це в свою чергу підвищує кількість виходу якісної готової продукції, що дозволяє зменшити енергозатрати та грошові витрати на переробку неякісної продукції.

Розробка програмного забезпечення на основі отриманих експериментальних даних та подальше впровадження його у виробництво у майбутньому дозволить значно зменшити відсоток браку та підвищити якість готової продукції. Також отримані експериментальні дані мають наукову цінність у подальшому вивченні проблеми плоскостності штаб.

Публікації. Деякі положення магістерської роботи опубліковані у співавторстві у 1 статті.

Структура і загальний обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, загальний обсяг магістерської роботи – 128 сторінок основного тексту, магістерська робота містить 14 таблиць, 24 рисунка. Список використаних джерел налічує 41 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі дипломної роботи надано характеристику стану проблеми та представлено літературний огляд. У прокатному виробництві, коли йде мова про прокатку штаб, то майже усі висновки і експериментальні досліді приводилися тільки до симетричних умов деформації по висоті штаби. Однак у практиці прокатного виробництва симетричні процеси не зустрічаються, завжди деформація верхніх і нижніх слоїв штаби якісно відрізняється, і це обумовлено: неоднаковим діаметром верхніх та нижніх робочих валків, різних умов тертя на верхньому та нижньому контактах штаби і валків, нахилом штаби до одного з валків перед входом в осередок деформації. Будь яка різниця деформацій штаби по висоті викликає несиметричний розподіл між валками обтисків штаби, випередження, крутного моменту тощо. Несиметричний процес відносять до непростих процесів прокатки.

З практичної точки зору вивчення несиметричних процесів прокатки важливо для встановлення причин появи і напрямку вигину переднього кінця штаби, різного зносу верхнього та нижнього валків, нерівномірним розподілом крутного моменту прокатки між валками, а також для встановлення причин появи неплоскостності штаб при холодному прокатуванні. Встановив причини цієї несиметрії розроблюють заходи для усунення її впливу.

Контактне тертя при прокатуванні можна визначити двома способами. Перший спосіб - дослідження за допомогою силовимірювального валка, який є різновидом валкового торсіометра. Другий спосіб - дослідження за допомогою трьох штифтів: нормального і двох похилих, розташованих під кутом 30° до нормального штифту. Це той же метод, що був використаний А. П. Чекмарьовим і П. Л. Клименко. Відмінність полягає тільки у величині кутів нахилу штифтів і в дещо іншому конструктивному оформленні валка.

В процесі прокатки на осцилограмі записували повний і питомий тиск металу на валки. Для вимірів повних тисків металу на валки застосовували месدوزи з дротяними датчиками опору. Месдоза представляє циліндричний стакан, виготовлений з легованої сталі. Месدوزи встановлювали під натискні гвинти і з'єднували паралельно, в результаті чого на осцилограмі записувався сумарний тиск металу на валок.

Аналіз умов роботи валків клітей кварто свідчить про деякий вплив характеру розподілу погонних сил в контактні штаба-валок на величину власного прогину робочих валків, а отже, на профілювання їх бочок і на формування поперечної різнотовщинності штаб.

Дослідження показують, що розподіл середніх нормальних контактних напружень p_{cp} і погонних сил p_y по ширині штаби в контактні з валком нерівномірно і обумовлено відносною шириною штаби (B/L_B), поперечними різнотовщинами вихідної та кінцевої штаб, наявністю натягу кінців штаби (B - ширина штаби, L_B - довжина бочки валка). Відомо, що характер розподілу погонних сил p_y на контактні штаби з робочими валками в кліті кварто, спільно з нерівномірністю розподілу міжвалкових сил, надає певний вплив на власний прогин робочого валка, хоча в деяких роботах за розрахунком прогинів валків це не враховується.

Для теоретичного розрахунку розподілу по ширині штаби середніх нормальних контактних напружень і погонній сили відомі різні методи. В роботі пропонується об'ємний осередок деформації розбивати на кінцеве число поздовжніх смужок з кроком Δu . Деформацію кожної окремої смужки приймають двомірною, тоді рішення об'ємного завдання зводиться до вирішення плоскої задачі.

Поперечна різнотовщинність штаби при гарячому та холодному прокатуванні, в загальному випадку, обумовлена прогином робочих і опорних валків. Величина спільного прогину валків істотно залежить, зокрема, від ширини штаби. При цьому, чим більше ширина штаби, тим менше прогин валків. Вплив ширини штаби на закономірності прогинів проявляється через нерівномірність розподілу міжвалкових погонних сил, що переконливо показано в експериментальних дослідженнях. Очевидно, що разом з цим на величину прогину робочого валка надає і певний вплив нерівномірність розподілу погонних сил в контакті штаби з робочим валком.

Для характеристики кінематичних умов прокатки, додатково до загальноприйнятим поняттям зон відставання, випередження і прилипання, ведемо поняття «зона рівних швидкостей». Під останньою мається на увазі зона, в якій горизонтальні проекції швидкостей частинок металу і поверхні валків однакові.

Розглянемо випадок прокатки з наявністю відставання, прилипання і випередження. Внаслідок сталості обсягу металу при пластичній деформації прилипання металу при прокатуванні можливо, коли його поздовжні швидкості в поперечному перетині осередку деформації нерівні або коли зменшення товщини компенсується збільшенням поперечного перерізу, або коли має місце одночасно і те й інше. Останнє за законом мінімальної роботи є найбільш імовірним, хоча зовнішні частини діють настільки вирівнююче на горизонтальні швидкості прокатки, що у відомих випадках, наприклад при прокатуванні тонких штаб, різниця у швидкостях важко замітити. Тому за зону прилипання часто приймають ділянки, де є невелике ковзання, наприклад при невеликому витягуванні, при прокатуванні вузьких штаб, з відносно великим розширенням і т. п.

Контактне напруження прокатуванні можна визначити двома способами. Перший спосіб - дослідження за допомогою силовимірювального валка, який є різновидом валкового торсіометра. Другий спосіб - дослідження за допомогою трьох штифтів: нормального і двох похилих, розташованих під кутом 30° до нормального штифту.

Слід зазначити, що при прокатуванні високих штаб середнє паралельне контактне напруження більше, ніж при прокатуванні середніх штаб і відрізняється характером розподілу по довжині осередку деформації.

При прокатуванні високих штаб епюра середнього паралельного контактного напруження має більш гострий купол, ніж при прокатуванні штаб середньої товщини.

Відомо, що зовнішні зони, впливу на осередок деформації, підвищують середнє паралельне контактне напруження біля входу і виходу штаби з валків.

Така картина розподілу середнього паралельного контактного напруження при прокатуванні високих штаб пояснюється напруженнями, що виникають в результаті нерівномірності висотної деформації (слабо обтиснуті або зовсім не обтиснуті по висоті глибинні шари металу розтягуються). Розтягування внутрішніх шарів металу разом з тим створює стиск контактних шарів металу. Цими стискаючими напруженнями і обумовлюється характер кривої середнього паралельного контактного напруження при прокатуванні високих штаб.

Мінімальне значення середнього паралельного контактного напруження отримували при відношенні $-\frac{l_d}{h_{cp}} = 0,45$. Цікаво відзначити, що максимальне значення середнього коефіцієнта тертя збігається з мінімумом питомого тиску. Ці результати підтверджують відомі досвідчені дані І. М. Павлова і Н. Н. Гета про вплив середнього паралельного контактного напруження на величину коефіцієнта тертя.

Зіставляючи криві контактних дотичних напружень, отримані за допомогою силівимірювального валка і методом похилих штифтів, можна бачити деяку розбіжність між цими кривими, особливо поблизу площини входу у осередок деформації, де є навіть якісне розходження ходу кривих.

Різниця в кривих пояснюється тим, що за допомогою силівимірювального валка вимірюється усереднена по ширині штаби контакте дотичне напруження, а за допомогою похилих штифтів – контактне дотичне напруження посередині ширини штаби. Ця особливість і призводить до різного виду кривих.

При осадженні зразків між плитами відсутності деформації контактних шарів відповідає умова прилипання; при прокатуванні ж завдяки тому, що поверхня

деформованого інструменту (валки) переміщається, може спостерігатися прослизання навіть при відсутності деформації контактних шарів металу. Гальмування деформації контактних поверхонь починається при досягненні певної величини сили контактного тертя, яка досягається при ковзанні .

Наведена узагальнена крива залежності середнього паралельного контактного напруження від відношення $\frac{l_d}{h_{cp}}$. При досягненні відношення $\frac{l_d}{h_{cp}} \approx 0,1$ середнє паралельне контактне напруження досягає якоїсь величини і далі залишається на одному рівні при зменшенні цього відношення.

Це явище можна пояснити наступним чином. При відношенні $\frac{l_d}{h_{cp}} = 0,1$ витяжки металу немає, і весь метал, який обтиснутий по висоті, зміщується в поперечному напрямку. Витягуванні металу перешкоджають пружні зони, розташовані під пластично деформованими зонами. Напружений стан металу в середній частині висоти штаби, мабуть, не робить впливу на силові умови в області контакту валка з металом, внаслідок великої відстані між контактними і середніми шарами.

Далі по мірі підвищення товщини штаби (зменшення $\frac{l_d}{h_{cp}}$) при деформації в контактних і подконтактних шарах спостерігаються незмінні силові умови (середнє паралельне контактне напруження залишається постійним). Збільшення товщини середніх верств на величину середнього паралельного контактного напруження впливу не робить.

Аналіз умов роботи валків клітей кварто свідчить про деякий вплив характеру розподілу погонних сил в контактї штаба-валок на величину власного прогину робочих валків, а отже, на профілювання їх бочок і на формування поперечної різнотовщинності штаб.

Сталь, а також і товсті листи, прокочують в основному в чотирьохвалкових клітях (клітях кварто). У процесі прокатки на робочий валок діють сили, характер розподілу яких по ширині штаби.

Розподіл середніх нормальних контактних напружень p_{cp} і погонних сил p_y по ширині штаби в контактї з валком нерівномірно і обумовлено відносною шириною

штаби (B/L_B), поперечними різнотовщиностями вихідної та кінцевої штаб, наявністю натягу кінців штаби (B - ширина штаби, L_B - довжина бочки валка). Відомо, що характер розподілу погонних сил p_y на контактні штаби з робочими валками в кліті кварто, спільно з нерівномірністю розподілу міжвалкових сил, надає певний вплив на власний прогин робочого валка, хоча в деяких роботах за розрахунком прогинів валків це не враховується.

Відповідно з експериментальними дослідженнями розподілу напружень p_{cp} і погонних сил p_{cp} в чорирьохвалкових клітях можна стверджувати, що нерівномірність розподілу p_{cp} і p_y по ширині штаби обумовлена, в загальному випадку, нерівномірністю розподілу величини відносного обтиснення ε_B . Так, за даними прокатки підкату з плюсовою поперечною різнотовщинністю (опуклий поперечний профіль штаби) обумовлює великі значення погноної сили p_y в середній частині ширини штаби (опукла епюра p_y), а прокатка штаб з мінусовою поперечною різнотовщинністю обумовлює появу увігнутою епюри p_y з максимумом на краях штаби.

Для теоретичного розрахунку розподілу по ширині штаби середніх нормальних контактних напружень і погонній сили відомі різні методи. Пропонується об'ємний осередок деформації розбивати на кінцеве число поздовжніх смужок з кроком Δy . Деформацію кожної окремої смужки приймають двомірною, тоді рішення об'ємного завдання зводиться до вирішення плоскої задачі.

Однак зміна середнього нормального контактного напруження по ширині штаби незначна. У разі прокатки штаби з $\Delta\Pi = 0,05$ мм середнє нормальне контактне напруження збільшується від кромки штаби до середини з $p_{cp,y} = 462,5$ Н/мм² до $p_{cp} \approx 467,1$ Н/мм² відповідно до збільшення відносного обтиснення. Прокатка штаб з більшою величиною обтиску ($\Delta\Pi > 0,05$ мм) по середині ширини штаби ($y/B = 0$) викликає відповідне збільшення середнього нормального напруги $p_{cp,0}$. Аналогічним чином змінюється і погонна сила. Зменшення товщини штаби обумовлює підвищення впливу на умови деформації контактних дотичних напружень (поздовжніх подпираючих напруг σ_3) і, отже, середніх нормальних напружень і

погонних сил впливу штаби на валок. При цьому, чим більше параметр ($\Delta\P$ (більша обтиснення по осі штаби), тим більше значення погонної сили по осі штаби і нерівномірність розподілу погонної сили, що необхідно враховувати при розрахунку прогину і профілюровок валків.

З вищесказаного випливає, що основним фактором, який впливає на нерівномірність розподілу зазначених параметрів, є нерівномірність обтиснення по ширині штаби, обумовлена розходженням поперечних різновтовщинностей підкату і готового профілю, при постійних по ширині температури штаби, напруженнях натягу і коефіцієнта тертя. Збільшення відносного обтиснення ε по осі штаби викликає збільшення погонної сили в цьому перерізі, а зменшення товщини підкату ($\varepsilon = \text{const}$) призводить до зменшення коефіцієнта n_1 і більшою мірою при великих значеннях $\Delta\P$.

Теоретичні результати розрахунків в достатній мірі адекватні результатам експериментальних досліджень. Очевидно, для практичних розрахунків прогинів робочих валків при прокатуванні тонких штаб представляє інтерес значення коефіцієнтів n_1 обмежених параметром $\Delta\P/H$ в межах $\Delta\P/H = 0 \dots 0,05$.

При ($\Delta\P/H = 0$ (рівномірні обтиски по ширині штаби) у всіх випадках коефіцієнт $n_1 = 1,0$. Мінімальні значення $n_1 \approx 0,5$ має місце при значній нерівномірності обтиснень по ширині, і при невеликому загальному обтисненні, коли частка впливу відмінності обтиснень в середині і на кромці найбільш помітна. При реальних в практиці значеннях $\Delta\P/H < 0,05$ коефіцієнт нерівномірності n_1 , при ($p_1 < p_0$) знаходиться в межах $n_1 = 0,83 \dots 1,0$. При прокатуванні штаб з великим обтисненням по кромці штаби ($p_1 > p_0$) коефіцієнт n_1 ($-\Delta\P/H$) виявляється більше одиниці ($n_1 > 1$), що можливо у випадку коли вихідна штаба має прямокутну або увігнуту форму поперечного перерізу, а міжвалковий зазор подальшої кліті має опуклу форму.

Поперечна різновтовщинність штаби при гарячій та холодному прокатуванні, в загальному випадку, обумовлена прогином робочих і опорних валків. Величина спільного прогину валків істотно залежить, зокрема, від ширини штаби. При цьому, чим більше ширина штаби, тим менше прогин валків. Вплив ширини штаби на закономірності прогинів проявляється через нерівномірність розподілу міжвалкових

погонних сил, що переконливо показано в експериментальних дослідженнях. Очевидно, що разом з цим на величину прогину робочого валка надає і певний вплив нерівномірність розподілу погонних сил в контакті штаби з робочим валком. Теоретично, це відображено у формулі для розрахунку власного прогину робочого валка. Ступінь нерівномірності розподілу погонних сил в контакті штаба-валок оцінюється коефіцієнтом $n_1 = p_1/p_0$ (де p_1 і p_0 , - погонні сили на крайових ділянках і в середині ширини штаби $p_1 = \Delta P_i / \Delta B_i$, де ΔP_i - частина повної сили P_i , що діє на ділянку ΔB_i ширини штаби). Нерівномірність розподілу P_i по ширині штаби обумовлена змінним по ширині обтисненням штаби ($\Delta\Pi$), власне прогином валків (W), нерівномірним розподілом по ширині штаби напруг натягу ($\Delta\sigma_H$). Всі фактори сприяють нерівномірному обтисненню по ширині штаби приводять до збільшення або зменшення нерівномірності погонних сил по ширині штаби і, відповідно з цим, зміни коефіцієнта нерівномірності n_1 . Так, встановлено що зі збільшенням параметра L_a/L (L - довжина бочки робочого валка; L_a - довжина бочки опорного валка без урахування кінцевих скосів) коефіцієнт істотно зростає від $n_1 = 0,3 \dots 0,8$ при $L_a/L = 0,4$, до $n_1 = 1,0 \dots 1,3$ при $L_a/L = 0,9$. Тобто, чим менше довжина кінцевих скосів (вріз) на бочці опорних валків, тим більше обтиснення крайових ділянок штаби і, отже, більше значення крайової погонної сили P_1 . Зменшення ширини штаби також сприяє збільшенню значень n_1 і P_1 внаслідок збільшення прогину валків.

Найбільш часто в практиці зустрічається несиметричний процес прокатки в валках різного діаметру для забезпечення вигину переднього кінця штаби при виході на валок меншого діаметру. Однак у подальших дослідженнях встановлено, що напрямок вигину штаби при різних діаметрах валків обумовлено також величиною відносного обтиснення. Дослідженнями показано, що при обтисненнях $\varepsilon < 30\%$ передній кінець штаби згинається на валок меншого діаметру, що обумовлено більшою окружною швидкістю валка з великим діаметром, а отже, більшою швидкістю прилеглих до нього шарів металу. При $\varepsilon > 30\%$ - вигин переднього кінця штаби відбувався на валок більшого діаметру, що обумовлено великими обтисненнями штаби з боку валка меншого діаметру і, отже, великим подовженням шарів штаби, що прилягають до нього. Ці пояснення правильні, але є не достатніми.

У теоретичному плані визначення співвідношення між обтисненнями з боку валків, яке отримано з умови рівності нормальних сил діючих на менший і більший валки:

$$p_r \cdot B \sqrt{r \cdot \Delta h_r} = p_R \cdot B \sqrt{R \cdot \Delta h_R} \quad (1)$$

де p_r і p_R - середні нормальні напруження відповідно на меншому і більшому валках; r і R - радіуси відповідно меншого і більшого валків; Δh_r і Δh_R - частки обтиснення відповідно зі сторони меншого і більшого валків; B - ширина штаби.

Беручи $m = p_r / p_R$ і виконуючи перетворення щодо Δh_r отримали:

$$\Delta h_r / \Delta h = 1 / (1 + m^2 r / R). \quad (2)$$

З формули випливає, що збільшення несиметрії радіусів валків (тобто зменшення параметра r/R) викликає збільшення обтиснення з боку валка меншого діаметру. Однак результуюче значення відношення $\Delta h_r / \Delta h$ буде визначатися характером зміни параметра m , збільшення якого сприяє вирівнюванню висотних деформацій на валках і зниження ступеня несиметрії прокатки, а отже, зменшення викривлення переднього кінця штаби.

Якщо прийняти $m=1$, то отримаємо формулу А. Ф. Головіна:

$$\Delta h_r / \Delta h = 1 / (1 + r / R). \quad (3)$$

Величина обтиснення на великому валку буде дорівнювати:

$$\Delta h_R = \Delta h - \Delta h_r, \quad (4)$$

де Δh - загальне обтиснення в осередку деформації.

За даними, при холодному прокатуванні штаб з маловуглецевої сталі з $n = r/R = 0,83$ середнє нормальне контактне напруження при обтиснені $\varepsilon = 0,1 \dots 0,7$ на валку меншого діаметру на 25...40% більше, ніж на валку більшого діаметру, а параметр $m = 1,25 \dots 1,4$, тобто $p_r > p_R$. Це співвідношення p_r і p_R обґрунтовується появою в осередку деформації внутрішніх поздовжніх розтягуючих напружень. Стверджується, що дія більшого валка на менший валок подібно до дії переднього

натягу, а дія меншого валка на більший валок подібно до дії заднього натягу. Відомо, що в цих умовах прокатки дію заднього напруження на зниження середнього нормального контактного напруження більш істотно, ніж переднього.

Вигин переднього кінця вгору обумовлений, крім того, його формою при входженні штаби в кліть. Так, при формі у вигляді «гусячої шийки» площина захоплення 1 - 2 нахилена до нижнього валку, що сприяє несиметричному обтисненню, а дія заднього натягу T_3 збільшує несиметрію в бік $l_H > l_B$ - у цих умовах передній кінець штаби, що виходить з валків, прагне зігнутися вгору.

Найбільш реальним регулюючим параметром для впливу на вигин штаби в промислових умовах є несиметрія окружних швидкостей або діаметрів валків при відносно постійних випадкових технологічних факторах. Питання полягає в найбільш раціональному розміщенні робочого валка з більшою швидкістю (великим діаметром) у даній кліті. Дослідження, виконані при прокатуванні свинцевих штаб з $H = 15$ мм в сухих валках однакового діаметра (99,6 мм) і різного діаметру (99,3/99,85 мм) (частота обертання валків 60 об/хв, нахил штаби до нижнього валку $\theta = 0 - 3,5^\circ$, задній натяг 220 Н) показали наступне.

При прокатуванні в валках різного діаметра різниця витяжок $\Delta\mu$ і кривизна ρ штаби спостерігаються вже при $\theta=0$, що викликано більшою окружною швидкістю нижнього валка з великим діаметром. Різниця коефіцієнтів витяжок і кривизна ρ із збільшенням кута θ збільшуються.

Позначимо коефіцієнт тертя з боку валка з більшою шорсткістю (насиченою) через f_H , а з меншою (гладким) f_T . Відношенням $\Delta h_H/\Delta h$ визначимо, використовуючи рівність сил на верхній і нижній валки. Згідно з цією умовою нерівність обтиснень при прокатуванні в валках з різношорсткими поверхнями визначається:

$$\Delta h_H = \Delta h / (1 + m^2 r / R), \quad (3)$$

де Δh_H - величина обтиснення з боку насиченого (шорсткого) валка; m - відношення середніх напруг на валках ($m = p_H/p_T$); де p_H і p_T - середні напруги відповідно на шорсткому і гладкому валках.

Якщо, $r=R$, то:

$$\Delta h_H = \Delta h / (1 + m^2) \quad (4)$$

Оскільки при прокатуванні в різношорстких валках $m > 1$, то завжди абсолютне обтиснення $\Delta h_H < \Delta h_\Gamma$ або $\Delta h_H < 0,5 \Delta h$ (де Δh_Γ - обтиснення з боку гладкого валка). При цьому, чим більше розходження шорсткості валків, тим менше відношення $\Delta h_H / \Delta h$.

Виходячи з закону найменшого опору течії металу при деформації отримано наступною формулою для розрахунку $\Delta h_H / \Delta h$:

$$\Delta h_H / \Delta h = 0,5 \sqrt{f_\Pi / f_{\Pi H}} \quad (5)$$

де f_Π і $f_{\Pi H}$ - показники тертя відповідно середній в осередку деформації і на контакті з насиченою (шорстким) валком.

При рівних показниках тертя на валках ставлення $\Delta h_H / \Delta h = 0,5$, тобто отримуємо симетричний процес прокатки.

З зменшенням відносини $f_\Pi / f_{\Pi H}$ наприклад, за рахунок збільшення $f_{\Pi H}$, обтиснення з боку шорсткого валка зменшується. Ця закономірність обумовлена підвищенням поздовжніх підпираючих напружень в шарах металу штаби, прилеглих до шорсткому валку, підвищення нормальних тисків і опору течії металу. Маючи дані по Δh_H , визначимо $\Delta h_\Gamma = \Delta h - \Delta h_H$, а потім і інші геометричні параметри з урахуванням або без урахування пружної деформації валків і штаби.

Збільшення товщини штаби до $H=1,0$ мм викликає зміну закономірностей течії металу в осередку деформації. В цих умовах при порівняно невеликих обтиснень ($\varepsilon < 25\%$) великі значення випередження виявляються на гладкому валку, а при $\varepsilon > 25\%$ - на шорсткому. При прокатуванні штаб з $H=1,3$ мм критичне обтиснення, при якому криві випереджень перетинаються, збільшується до $\varepsilon = 32\%$. При $\varepsilon < 32\%$ випередження більше на гладкому валку, а при $\varepsilon > 32\%$ - на шорсткому. Згідно з цією закономірністю зміни випередження вільно виходить кінець, спочатку згинається на шорсткий валок ($\varepsilon < 32\%$), а потім на гладкий (шліфований) ($\varepsilon > 32\%$). При прокатуванні більш товстих штаб критичне обтиснення зсувається в область великих обтиснень.

У розділі 2 “ Дослідницько-розрахункова частина” магістерської роботи надано опис експериментальної установки, приладів та методики проведення експериментів та надано обробку отриманих даних.

Проводилось багато експериментальних досліджень на теми розподілу питомих тисків в осередку деформації при прокатуванні, розподілу погонних сил в контактні штаба-валок та запропоновано багато методів для теоретичного розрахунку розподілу по ширині штаби середніх нормальних контактних напружень і погонних сил. Наприклад, об'ємний осередок деформації розбивати на кінцеве число поздовжніх смужок з кроком Δu . Деформацію кожної окремої смужки приймати двомірною, тоді рішення об'ємного завдання зводиться до вирішення плоскої задачі. Але проблема плоскості штаб не вирішена остаточно, та потребує більше не тільки теоретичних але і практичних досліджень, так як вона є дуже важливою у теорії прокатуванні.

Ціль експериментів – використовуючи абсолютно новий метод визначення коефіцієнту напруженого стану по випередженню, який не потребує спеціального обладнання, визначити, як буде розподілятися коефіцієнт тертя f , показник тертя f_{Π} та коефіцієнт напруженого стану n_{σ} по ширині штаби в залежності від обтиснень та ширини штаби. Також показати, що цим методом можна визначати, як розподіляються обтиснень з боку кожного валка при непростих процесах прокатки (прокатка штаб з різними коефіцієнтами тертя на контактах з валками). Та отримати експериментальні дані, які допоможуть вирішити проблему неплоскостності штаб при процесах прокатки.

Визначення коефіцієнту напруженого стану по випередженню, на думку багатьох дослідників, дає найбільш надійну оцінку на штабах при $l_d/h_{cp} > 3$ (l_d – довжина дуги контакту, h_{cp} – середня товщина штаби), коли висотна деформація набуває рівномірний характер. У цьому випадку кожна точка по висоті перетину штаби в осередку деформації має однакову витяжку на швидкість повздовжньої течії металу.

Усі експерименти проводили у лабораторії кафедри ОМТ Запорізької державної інженерної академії. Експеримент для визначення розподілу коефіцієнту напруженого стану проводився на трохклітвому стані дуо з діаметром валків 100 мм

та довжиною 170 мм, матеріал валків – сталь, потужність двигуна 40 кВт, число обертів валків – 32 об/хв. Для проведення експерименту використовувалась тільки

перша кліть. Попередньо перед проведенням експерименту на верхній та нижній валок наносились кернові відбитки на відстані 100 мм по всій ширині валка. Відстань між керновими відбитками по ширині валка – 5 мм. Для проведення експерименту використовували усього 6 свинцевих штаб, дві з яких були шириною – 75 мм, дві – 100 мм та дві – 130 мм. Перед прокаткою на штаби були нанесені відбитки для визначення коефіцієнту витяжки після прокатки. Прокатка проводилась на сухих валках без змазки, після кожного проходу валки протирались чистим дрантям та папером. Після кожного проходу за допомогою нажимних гвинтів встановлювали потрібний зазор між валками. Після прокатки відстань між керновими відбитками та відбитками, для визначення коефіцієнту витяжки заміряли спеціальною лінійкою. Товщину штаб заміряли за допомогою мікрометра.

Таблиця 1 – Результат експерименту прокатки свинцевої штаби шириною $B=75$ мм, $H=1,79$, $h=1,13$

	1	2	3	4	5	6	7
$n_{\sigma(B)}$	1,283	1,265	1,265	1,29	1,28	1,265	1,234
$n_{\sigma(H)}$	1,283	1,283	1,29	1,245	1,29	1,314	1,265
S_B	0,0545	0,0535	0,0535	0,056	0,055	0,0535	0,051
S_H	0,0545	0,0545	0,056	0,052	0,056	0,0575	0,0535
$f_{\Pi(B)}$	0,19	0,186	0,186	0,197	0,192	0,186	0,174
$f_{\Pi(H)}$	0,19	0,19	0,197	0,178	0,197	0,205	0,186
$f_{(B)}$	0,148	0,147	0,147	0,153	0,15	0,147	0,141
$f_{(H)}$	0,148	0,148	0,153	0,143	0,153	0,156	0,147
$n_{\sigma(C)}$	1,283	1,274	1,278	1,268	1,285	1,29	1,25
$S_{(C)}$	0,0545	0,054	0,0548	0,054	0,0555	0,0555	0,0523
$f_{(C)}$	0,19	0,188	0,192	0,188	0,195	0,196	0,18
$f_{\Pi(C)}$	0,148	0,1475	0,15	0,148	0,152	0,152	0,144

У третьому розділі “Охорона праці та техногенна безпека” дана характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів,

розроблені заходи з поліпшення умов праці, з електробезпеки, з пожежної та техногенної безпеки. Також проведено розрахунок загального освітлення робочого приміщення.

У четвертому розділі “Економічні аспекти проблеми” надані економічні аспекти проблеми. Вказується, що використання отриманих результатів експериментів при процесі холодної прокатки штаб дозволяє значно підвищити економічну складову процесу. Тому що проблема неплоскостності штаб дуже розповджене явище, що значно погіршує якість виходу готової продукції. При сучасному виробництві значний відсоток отриманих штаб після процесу холодної прокатки має дефект неплоскостності. Використання результатів експериментальних досліджень дозволяє значно зменшити відсоток виходу штаб з таким дефектом. Це в свою чергу підвищує кількість виходу якісної готової продукції, що дозволяє зменшити енергозатрати та грошові витрати на переробку неякісної продукції.

Розробка програмного забезпечення на основі отриманих експериментальних даних та подальше впровадження його у виробництво у майбутньому дозволить значно зменшити відсоток браку та підвищити якість готової продукції. Також отримані експериментальні дані мають наукову цінність у подальшому вивченні проблеми плоскостності штаб.

ВИСНОВКИ:

Було проведено низку експериментів, які показали, як впливає відносне обтиснення та ширина штаб на розподіл випередження S , витягування μ , коефіцієнту тертя f , показника тертя f_{II} та коефіцієнту напруженого стану n_{σ} по ширині штаб.

Також було проведено експеримент, який показав, як впливає змащування при несиметричному прокатуванні на енергосилові параметри прокатки алюмінієвих штаб.

Усі розрахунки проводились унікальним методом, який дозволяє розраховувати коефіцієнт напруженого стану n_{σ} та середнє нормальне контактне напруження p_{cp} без використання спеціальної апаратури.

Результати експериментальних досліджень кардинально відрізняються від отриманих раніше результатів А.П. Чекмарьова та результатів дослідів І.Г. Астахова,

тому що був використаний зовсім інший метод розрахунків, тому ці досліді потребують подальшого вивчення.

Отримані результати експериментальних досліджень можна використовувати при вирішенні проблеми неплоскості штаб. Можна стверджувати, що використання отриманих результатів експериментальних досліджень допоможе покращенню процесу холодної прокатки штаб в умовах сучасного виробництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1. Николаев В.А., Куприков В.О., Васильев А.Г. Теоретическое и экспериментальное определение силы прокатки тонких полос.// *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2015.- №2.- С. 33 – 37.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Чекмарев А.П.. Теория прокатки (материалы научно-технической конференции). – М.: *Металлургия*, 1965. – С. 31 – 33, 34 – 36, 457 – 459, 623 – 627.
2. А.П. Чекмарев, В.Л. Павлов. Глубина распространения пластической деформации. *Труды Института черной металлургии АН УССР, Прокатное производство.* – Издательство АН УССР, 1957.
3. В.М. Клименко. К вопросу об определения деформируемости металла. *Прокатное производство.* – Издательство АН УССР, 1957.
4. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян Е.С. Теория продольной прокатки. – М.: *Металлургия*, 1980. – С. 117 – 122; 623 – 627.
5. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением.– М.: *Металлургия*. 1973.– 496с.
6. И. Вахтер. Измерение деформаций на вращающихся деталях. *Машиностроение*, 1956, №12.
7. И.Г. Астахов. Распределение давления на контактной поверхности при прокатке. *СБ трудов МИС*, вып. XXX, *Металлургиздат*, 1951.
8. Николаев В.А. Теория и технология прокатки металла. Монография. – Запорожье: *Акцент Инвест-трейд*, 2013. – 232 с.
9. Николаев В.А. Теория прокатки. – Запорожье, *ЗГИА*, 2007. – 228 с.

10. Полухин П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. – М.: Metallurgy, 1974. – 200 с.
11. Чекмарев А.П. О некоторых вопросах теории прокатки. Материалы конференции. – М.: Metallurgizdat, 1962. – С. 31-56.
12. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Metallurgy, 1971. – 200 с.;
13. Николаев В.А., Жученко С.В. Неравномерность погонных сил по длине валков и ширине полосы // Metall and Casting of Ukraine. – 2011. - №. – С. 6-9; Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Metallurgy, 1971. – 200 с.
14. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. – К.: Техника, 1992. – 160 с.
15. Николаев В.А. Длина дуги контакта при прокатке с учетом упругих деформаций валков и полосы // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. - №4 – с. 57-59.
16. Боровик Л.И. Эксплуатация валков станов холодной прокатки. – М.: Metallurgy. 1968. – 233.
17. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. - М.: Metallurgy. – 512с.
18. Будакова А.А. Профилирование валков листовых станов /А. А. Будакова, Ю. В. Коновалов, К. Н. Ткалич и др. - К.: Техніка, 1986. – 190 с.
19. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. – К.: Техніка, 1992. – 160 с.
20. Николаев В.А., Жученко С.В. Неравномерность погонных сил по длине валков и полосы//Metall and Casting of Ukraine, 2011, №5.-С. 6-9.
21. Николаев В.А., Жученко С.В. Погонные силы в области контакта «полоса-валок» в клетки кварто// Metall and Casting of Ukraine, 2010, №12. – С. 9-13.
22. Николаев В.О., Мазур В. Л. Виробництво плоского прокату. – Запоріжжя, ЗДІА, 2010. – 320 с.
23. Николаев В.А., Жученко С.В. С. В. Регулирование плоскостности полос при холодной прокатке роликовыми устройствами// Metallurgical and Mining Industry 2011, №7. – С. 235-237.
24. Николаев В.А. Теория прокатки полос. – Запорожье, ЗГИА, 2014 – С. 207 – 245;

25. Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А. Теория продольной прокатки. – Харьков: ХГУ, 1965. – 206 с.
26. Николаев В.А., Скороходов В.Н., Полухин В.П. Несимметричная тонколистовая прокатка. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
27. Николаев В.А. Теория и практика процессов прокатки. – Запорожье, ЗГИА. – 2003. – 232 с.
28. Николаев В.А. Продольные и нормальные напряжения в очаге деформации при несимметричной прокатке полос // *Металл и литье Украины*, 2009, №6. – С. 37-42.
29. Зиновьев А.В., Полухин В.П. Экспериментальное определение действительной длины дуги контакта при прокатке // *Пластическая деформация металлов и сплавов*. – М.: Металлургия, 1968. – С. 113 – 116.
30. Королев А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке. – М.: Машгиз, 1953. – 257 с.
31. Николаев В.А., Полухин В.П., Авраменко И.Н., и др. Особенности прокатки полос в валках с разношероховатыми поверхностями. // *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1979, №3. – С. 58 – 61.
32. Николаев В.А., Босхамджиев Н.Ш., Полухин В.П. Параметры деформации металла в гладких валках и в простых калибрах. – К.: Освита Украины, 2010. – 235 с.
33. Николаев В.А. Длина дуги контакта при прокатке с учетом упругих деформаций валков и полосы // *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1987, №4 – С. 57-59.
34. Николаев В.А. Удельные давления при прокатке в валках неравного диаметра // *Известия вузов. Черная металлургия*, 1970, №1. – С. 87-90.
35. Николаев В.А. Углы критического сечения при несимметричной прокатке // *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техника, 1982, №78. С. 47 – 52.
36. Николаев В.А. Напряжения в очаге деформации при прокатке в валках с неодинаковыми коэффициентами трения. Сообщ 1 // *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1983. - №11. – с. 68-72.
37. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці / Жидецький В.Ц. – Львів: Афіша, 2002. – 320с.

38. Трахтенберг А.М. Гигиена труда и производственная санитария // Трахтенберг А.М., Коршун М.М., Чебанова О.В. – К.: Киев, 1997. – 462 с.
39. Геврик Є.О. Охорона праці: [навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів] / Геврик Є.О. – К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. – 280 с.
40. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках / Долин П.А. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
41. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М., 1992.