

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**

ЛОБОЙКО ДАР'Я ІГОРІВНА



УДК 621.771.23

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НЕПЕРЕРВНОГО
ПРОКАТУВАННЯ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ КРИТЕРІЮ
ПОЗДОВЖНЬОЇ СТІЙКОСТІ ШТАБИ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпровському державному технічному університеті (ДДТУ, м. Кам'янське) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Максименко Олег Павлович,
Дніпровський державний технічний університет,
завідувач кафедри «Обробка металів тиском».

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Грибков Едуард Петрович,
Донбаська державна машинобудівна академія,
завідувач кафедри «Автоматизовані металургійні машини і обладнання».

кандидат технічних наук, доцент
Коноводов Дмитро Володимирович,
Національна металургійна академія України, доцент кафедри «Обробка металів тиском».

Захист відбудеться «10» грудня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий «08» листопада 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01



Ю. К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних економічних умовах пріоритетним напрямком для розвитку металургії України є впровадження сучасних ресурсозберігаючих технологій. У зв'язку з цим пріоритетним є рішення задач спрямованих на розширення сортаменту цехів холодної прокатки і забезпечення економії енергетичних витрат на ведення процесу прокатування.

Особливо це питання є актуальним для виробництва тонкого холоднокатаного листа, який становить переважний відсоток від усього прокатного виробництва і при цьому є одним з найбільш енерговитратних і дорогих. Зниження собівартості холоднокатаної продукції можливо шляхом поглиблення знань в області теорії прокатування, яка пов'язана з поздовжньою стабільністю процесу з натяжінням штаби і розробці режимів обтиснень і натяжіннь, спрямованих на зменшення витрат електроенергії при холодній деформації.

Однак в цьому напрямку існують розбіжності між теорією і практикою, які пов'язані з неточністю визначення граничних умов прокатування, а також оцінкою захоплюючої здатності валків в сталому режимі. Існує методика оцінки граничної захоплюючої здатності валків в сталому режимі, яка в певній мірі пояснює причини цієї розбіжності. Методика розроблена на основі визначення поточної горизонтальної контактної сили і розрахунку критерію поздовжньої стійкості процесу прокатування. Однак, використання цієї сили, що накопичується, в якості критерію поздовжньої стійкості процесу при вирішенні диференціального рівняння рівноваги, не обґрунтоване. З цього випливає, що дослідження, теорії в цьому питанні, як і раніше, вимагає більш глибокого аналізу.

Проблема оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатування виникає на станах листового прокатування, де процес деформації здійснюється з натяжінням і великими витратами енергії. У зв'язку з цим з'являється необхідність розробки критерію, згідно з яким можна теоретично визначити найбільш раціональні режими деформації металу, при якому процес буде відбуватись стабільно при мінімально можливих витратах енергії і подальшим впровадженням його у виробництво.

Тому робота, що спрямована на розвиток теоретичних основ визначення граничних умов прокатування в сталому режимі і способу оцінки поздовжньої стабільності розкату в валках при прокатуванні з натяжінням, який дозволяє досить точно спрогнозувати найбільш раціональний режим деформації при освоєнні нового сортаменту листів і удосконалення на цій основі режимів натяжіння і обтиснень з метою зменшення енерговитрат, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи відповідає напрямку наукових досліджень ДДТУ. Робота виконана на кафедрі «Обробка металів тиском» (ОМТ) ДДТУ у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0114U005538, 0116U 005926). Авторка була виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення стабільності і надійності процесів прокатування листів на основі подальшого розвитку теоретичних основ та методики оцінки поздовжньої стабільності процесу тонколистового прокатування з натяжінням.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

- аналіз стану і проблеми теорії прокатування в сталому режимі з натяжінням штаби на неперервних станах листового прокатування;
- розробка методики оцінки поздовжньої стабільності розкату в осередку деформації і граничних умов прокатування на основі аналізу внутрішніх сил пластично деформованого металу;
- розробка моделі тертя в осередку деформації, що відповідає певним положенням теорії прокатування і сприяє підвищенню точності визначення результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу;
- аналіз залежності між режимом натяжіння розкату при неперервному прокатуванні та моментом прокатування і результуючої поздовжніх сил в осередку деформації, і визначення межі зміни натяжіння, що забезпечує поздовжню стабільність розкату в валках і зменшення моменту;
- визначити критерій, що дозволяє раціоналізувати режими натяжіння з точки зору побудови енергозберігаючої технології і на його основі розробити раціональні режими натяжіння для неперервних листових станів гарячого і холодного прокатування;
- розробити методику розрахунку раціональних режимів міжкільцевих натяжіннь з точки зору енерговитрат, розробити раціональні режими натяжіння для неперервних станів холодного прокатування та впровадити їх у виробництво.

Об'єкт дослідження. Процеси холодного неперервного прокатування з натяжінням тонкого плоского прокату.

Предмет дослідження. Закономірності розподілу контактних і внутрішніх поздовжніх напружень, а також поздовжніх сил в осередку деформації при прокатуванні з натяжінням.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень були покладені методи теорії пластичності, що включають варіаційні підходи в їхній чисельній інтерпретації, чисельні рекурентні рішення кінцево-різницевих форм умов статико-динамічної рівноваги виділених елементарних об'ємів осередку деформації, імітаційного математичного моделювання, інженерні підходи, а також розробка практичних рекомендацій з удосконалення режимів натяжіння та обчислення на неперервних листових станах.

Експериментальні методи містили фізичне моделювання досліджуваних технологій і обладнання в лабораторних умовах, вимір геометричних характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні положення:

1. *Вперше* в якості критерію оцінки поздовжньої стабільності розкату в осередку деформації і граничних умов прокатки запропоновано використання середньої результуючої внутрішніх поздовжніх сил пластично деформованого металу *та на його* основі встановлено закономірності впливу параметрів прокатування на поздовжню стійкість процесу, *що дозволило назначати* раціональні режими натяжіння при побудові енергозберігаючих технологій на неперервних листових станах холодної прокатки.

2. *Вперше* встановлено вплив натягіння на межу його поздовжньої стабільності в осередку деформації, а також на зміни поточних внутрішніх поздовжніх сил і на їх середнє результуюче значення і встановлено, що зі збільшенням натягіння поздовжня стабільність розкату в осередку деформації зменшується.

3. *Отримала подальший розвиток* модель плавної зміни питомих сил тертя по довжині осередку деформації, що відповідає граничним умовам процесу прокатування і яка відрізняється від існуючих тим, що враховує положення нейтрального перетину, кінематичні умови в пластичній зоні, це дозволяє при моделюванні процесу прокатування більш повно враховувати реальні контактні умови.

4. *Вперше* встановлено, що зі збільшенням натягіння штаби в міжклітьовому проміжку, особливо заднього, зменшується сумарний момент прокатування, але при цьому погіршується стійкість процесу, оскільки зменшується середня результуюча внутрішніх поздовжніх сил по абсолютній величині, *це дає можливість* визначити межі зміни натягіння і забезпечити поздовжню стабільність розкату в валках та зменшення сумарного моменту прокатування і зниження енерговитрат.

Практична цінність отриманих результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки:

- розроблено методикау призначення раціональних режимів натягіння на неперервних станах з метою зменшення аварійності на станах і витрат енергії на ведення процесу на основі оцінки поздовжньої стабільності штаби в осередку деформації з натягінням при врахуванні дії внутрішніх поздовжніх сил пластично деформованого металу;

- методика визначення максимальної величини натягіння по проходах при різних параметрах і умовах прокатування на неперервних станах;

- лабораторна установка, яка призначена для дослідження впливу величини і співвідношення заднього і переднього натягіннь на поздовжню стабільність процесу прокатки металу, яка використовується у ДДТУ в наукових цілях і навчальному процесі;

- спосіб прокатування плоских виробів в гарячому або холодному стані: листів, смуг, стрічок, фольги і може бути використаний на безперервних або реверсивних станах (патент України № 89747);

- побудовані раціональні режими натягіння на неперервних листових станах холодного прокатування, а саме: стан 1680, 1400, 1700.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики визначення поздовжньої стійкості процесу прокатування, запропонована в роботі має практичну цінність і може бути використана на ПАТ «Запоріжсталь» при удосконаленні існуючих і розробці нових режимів натягіннь і обтиснень тонких листів на безперервних станах холодного прокатування, що підтверджено актом від 06.08.18 р.

Особистий внесок здобувача. Внесок авторки полягає в обґрунтуванні та вирішенні теоретичних завдань з визначення поздовжньої стабільності процесу прокатування з натягінням штаби на неперервних станах. При проведенні досліджень авторці належить вибір і розробка методик досліджень, проведення теоретичного аналізу поздовжньої стабільності процесу прокатування на неперерв-

них станах, підготовка та проведення експериментів, обробка, аналіз і узагальнення отриманих результатів, розробка нових технологій і практичних рекомендацій. Внесок здобувачки в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК), в тому числі: XX і XXII МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, ДДМА, 2015, 2019); X МНТК «Пластична деформація металів» (Дніпропетровськ, НМетАУ, 2014); V, VII, X МНТК «Ресурсозбереження та ефективність процесів та обладнання обробки металів тиском машинобудуванні та металургії», (Харків, 2013, 2015, 2018); IV МНТК «Машини і пластична деформація металу», (Кам'янське, 2018 р.); на Придніпровському науковому семінарі «Обробка металів тиском» (Дніпро, 2018); наукових семінарах з ОМТ ДДТУ (Кам'янське, 2012-2019) і ДДМА (Краматорськ, 2019).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 17 роботах, в тому числі: 5 статей в фахових виданнях України, 1 статтю опубліковано в науковому журналі, внесеному до баз даних Scopus; 5 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій. Отримано 1 патент України на корисну модель. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 1 монографію.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 187 сторінок, в тому числі 150 сторінок основного тексту, 60 рисунків та 30 таблиць, список використаних джерел зі 145 найменувань та 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що були вирішені, дані характеристики об'єкту та предмету досліджень. Показана наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів з зазначенням особистого внеску здобувача, а також загальна структура роботи.

У першому розділі розглянуто сучасний стан розвитку науки з питання теоретичних особливостей захоплювальної здатності валків в сталому режимі прокатування. Показано, що, в залежності від умов деформації, відношення максимального кута захоплення до коефіцієнту тертя може дорівнювати, бути менше або більше двох. Проаналізовано дослідні дані настання граничного випадку прокатування, які показують, що максимальний кут захоплення при стабільному випадку пластичної деформації практично завжди є менше двох коефіцієнтів тертя. Проведено аналіз експериментів, в яких втрата рівноваги розкату в валках відбувається при наявності випередження. Результати аналізу дослідів показали, що випередження є значною величиною і є достатній запас сил тертя для подальшого збільшення кута захоплення, але при цьому розкат починає про-

буксовувати в осередку деформації. Проаналізовано експериментальні дані з натяжінням, які показали, що захоплювальна здатність валків при сталому процесі прокатування в значній мірі залежить від режиму натяжіння розкату. Особливо це необхідно враховувати в тих випадках, коли заднє питоме натяжіння істотно перевищує переднє. Це свідчить про те, що поздовжня стабільність процесу прокатування на безперервних станах може визначатися режимом міжклітьового натяжіння штаби. Показано, що при прокатуванні на неперервних станах не існує універсального показника (критерія), за допомогою якого можливо отримати раціональний режим натяжіння розкату. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі роботи.

У другому розділі звернута увага на факт, що фізична сутність прокатування ще не пізнана в тій мірі, яку вимагає практика. По ряду найважливіших питань в теорії мають місце невизначеності або навіть суперечливі судження. Так, при визначенні кута нейтрального перерізу розглядається рівновага тільки контактних сил, що діють в зонах відставання і випередження, а при аналізі нормального тиску і питомих сил тертя в рівновазі виділеного елемента металу беруть участь і поздовжні нормальні напруження. З огляду на те, що ці напруження діють в будь-якому перерізі зони пластичної деформації, за винятком граничних, а осередок деформації являє собою замкнуту механічну систему, то рівновага металу в валках має бути забезпечена з урахуванням дії поздовжніх сил.

В результаті досліджень розроблено та обґрунтовано використання методики оцінки поздовжньої стабільності простого процесу прокатування на основі визначення середньої результуючої внутрішніх поздовжніх сил пластично деформованого металу. Проведені теоретичні розрахунки з визначення середньої результуючої внутрішніх сил показали, що вона може характеризувати поздовжню стійкість розкату в валках, а рівняння рівноваги в осередку деформації може використовуватися для цієї оцінки.

В основу розробленої методики покладено схему рівноваги поточного об'єму металу в осередку деформації (рис. 1).

Умова рівності контактних і внутрішніх сил в цьому випадку має вигляд:

$$-2 \int_{\varphi}^{\alpha} p_x \sin \varphi d\varphi Rb + 2 \int_{\varphi}^{\alpha} t_x \cos \varphi d\varphi Rb = \sigma_x h_x b, \quad (1)$$

де p_x і t_x – нормальний тиск і питома сила тертя; σ_x – нормальна поздовжня напруга, викликана пластичною деформацією металу; R і b – радіус валків і ширина розкату; α і φ – кут захоплення і його поточне значення в осередку деформації; h_x – поточна товщина розкату.

Права частина виразу (1) являє собою поточну поздовжню силу в осередку деформації $Q_{xп.}$. Аналізуючи вираз (1) необхідно підкреслити, що поточна сила $Q_{xп.} = \sigma_x h_x b$ по довжині осередку деформації є змінною величиною, що впливає з виводу диференціального рівняння рівноваги і в залежності від умов прокатування по всій довжині осередку деформації може бути або стискаючої і спрямованою протилежно руху розкату (протилежно осі x), або на частині осередку деформації бути розтягувальною, направленою по осі x .

При аналізі стабільності процесу важливо знати не поточне значення сили $Q_{xп.}$, а її середнє результуюче значення $Q_{сер.п.}$, що дорівнює:

$$Q_{сер.п.} = \frac{1}{ld} \int_0^\alpha Q_{xп.} R d\varphi, \quad (2)$$

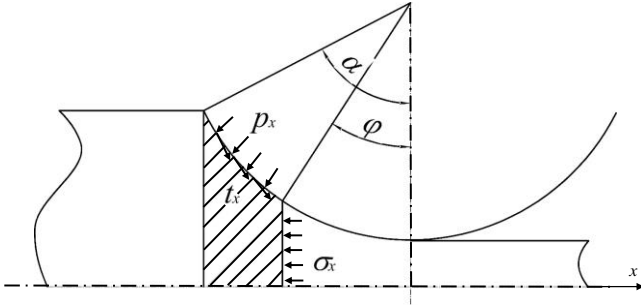


Рисунок 1 – Схема рівноваги поточного об'єму металу в осередку деформації

З огляду на те, що ця сила є реакцією на зовнішній вплив активну в осередку деформації роль вона грати не може. На цій гіпотезі і побудовано методику оцінки, запропоновану в дисертаційній роботі.

Якщо має місце пластична деформація металу вона виникає. Якщо сила $Q_{сер.п.}$ є силою опору, то руху розкату і приймає від'ємне значення. Якщо подумки уявити, що

$Q_{сер.п.}$ направлена по осі x і допомагає процесу прокатки, то відпадає потреба в приводі валків. Ця сила сама забезпечить просування металу по осередку деформації. Такий процес прокатування співзвучний з «вічним» двигуном, чого бути не може. Отже, оцінку поздовжньої стабільності штаби в валках можна отримати, аналізуючи величину і напрямок результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу. У разі, коли $Q_{сер.п.} < 0$ процес прокатування буде відбуватися стабільно без буксування. При $Q_{сер.п.} = 0$ прокатування ведеться в граничних умовах. Якщо $Q_{сер.п.} > 0$ процес прокатування неможливий. Такий підхід до аналізу поздовжньої стабільності сформульований вперше. У роботі показано, що такий підхід більш обґрунтований в порівнянні з умовою $\gamma = 0$, оскільки остання умова не завжди виконується. Літературний огляд показав, що існують дослідження, які показують, що порушення рівноваги розкату в валках з подальшою пробуксовкою можливе і при $\gamma > 0$. З іншого боку, стабільний процес прокатування можливий і при однозонному ковзанні металу в валках або навіть при «від'ємному» випередженні.

Отже, оцінка величини і напрямку сили $Q_{сер.п.}$ дозволяє визначити наскільки стабільний процес прокатування.

Аналізувати силові умови в осередку деформації зручно при безрозмірних параметрах. Представимо силу $Q_{сер.п.}$ в безрозмірній формі:

$$Q_{сер.п.}^* = Q_{сер.п.} / 2k_{сер} R b_{сер} \quad (3)$$

де $2k_{сер}$; $b_{сер}$ – середній опір деформації; середня ширина розкату.

Для того щоб отримати значення $Q_{\text{сер.п.}}^*$ продиференціювали рівняння (1). В результаті із (1) шляхом перетворень отримали відоме диференціальне рівняння рівноваги. Чисельно вирішуючи це рівняння можна знайти $Q_{\text{сер.п.}}$. Для цього необхідно отримати епюри контактних напружень, використовуючи рівняння пластичності $p_x - \sigma_x = 2k$ знайти розподіл по довжині осередку деформації поздовжніх нормальних напружень σ_x і поточної поздовжньої сили $Q_{x\text{п.}} = \sigma_x h_x b_{\text{сер.п.}}$. А далі за формулою (3) визначити $Q_{\text{сер.п.}}^*$.

Використавши умови проведення дослідів розподілу контактних напружень із літератури для трьох випадків прокатування на основі методу інтегрування Рунге-Кутта було побудовано теоретичні епюри розподілу контактних та внутрішніх напружень (рис. 2). Один розрахунок було проведено при гарячому прокатуванні сталі при $\alpha/f_{\text{сер}} = 0,624$, два інших виконувались при $\alpha/f_{\text{сер}} = 1,09; 1,63$. У першому випадку, процес представлений на рис. 2, умови були такими, що процес прокатки був стійкий, тому що значення кута α було істотно менше коефіцієнта тертя $f_{\text{сер}}$.

У другому випадку процес прокатки відбувався так само неухильно, але при меншому значенні кута нейтрального перерізу. Третій випадок, показаний на рис. 2 відрізняється тим, що прокатка здійснюється на межі буксування. Використовуючи ці експериментальні дані було перевірено вище запропоновану гіпотезу про оцінку стійкості процесу. По теоретичним епюрам розподілу контактних напружень знайдемо епюри $Q_{x\text{п.}}^*$, а також $Q_{\text{сер.п.}}^*$ для трьох випадків прокатки.

Вимірювання контактних напружень, в умовах першого експерименту показано, що в осередку деформації має місце розвинена зона випередження. Запас сил, що втягують метал в валки значний, процес прокатки відбувався стійко без найменших буксувань. На що звертає увагу автор виконаного експериментального дослідження. При теоретичному визначенні розподілу контактних і внутрішніх напружень, а також поточних поздовжніх сил (рис. 2 криві 1) поздовжні напруження σ_x по всій довжині осередку деформації є стискаючими, поточна сила $Q_{x\text{п.}}^*$ у всіх перерізах спрямована протилежно руху штаби, середня результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^* = -0,0111$, що свідчить про поздовжню стійкість металу в валках. Із зазначеного випливає, що теоретичні висновки підтверджуються практикою (виконаними дослідями). Аналогічні висновки можна зробити і щодо другого експерименту при прокатці свинцевих зразків з малоефективним технологічним мастилом. Разом з тим слід зазначити, що при прокатці в умовах другого досліді зона випередження була малою і запас втягуючих сил був значно меншим. Теоретичне рішення приведено кривими 2 на рис. 2. В цьому випадку результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^*$ також від'ємна, хоча за абсолютною величиною значно

менше, ніж в першому випадку ($Q_{\text{сер.п.}}^* = -0,0017$). Прокатка свинцевих зразків в третьому досліді проводилася з ефективним технологічним мастилом,

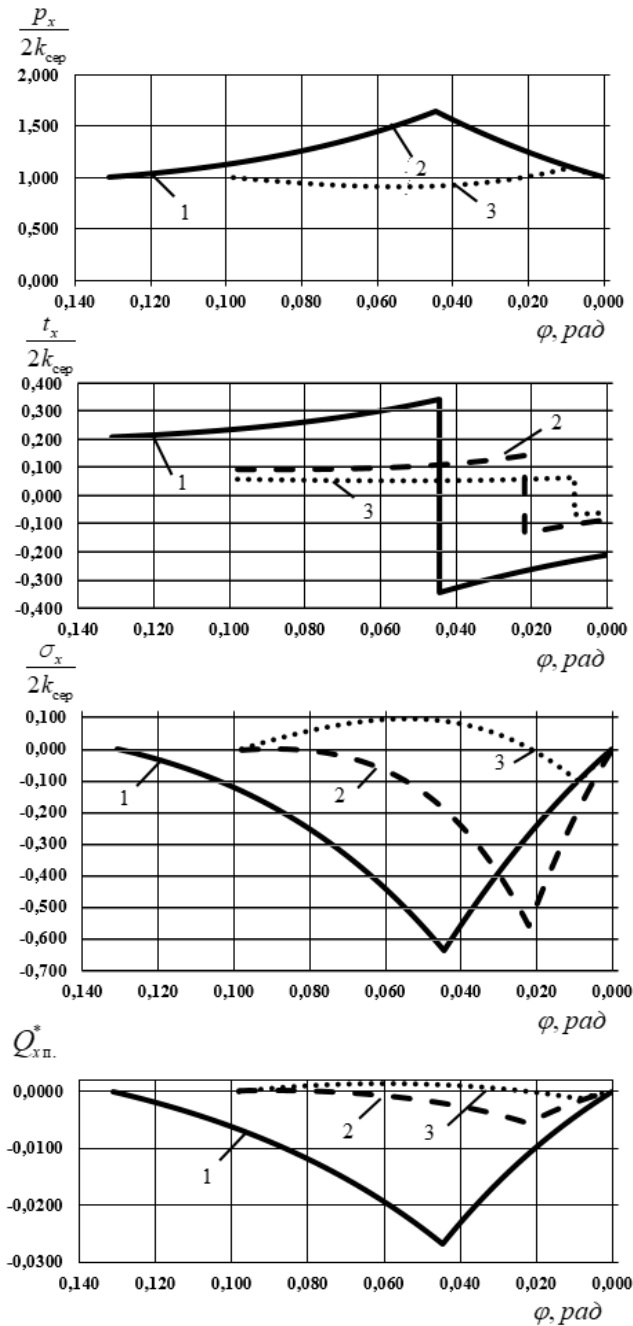


Рисунок 2 – Теоретичні епюри розподілу внутрішніх і зовнішніх поздовжніх напружень

коефіцієнт тертя дорівнював $f_{\text{сер}} = 0,06$. Процес прокатки протікав при однозонному ковзанні металу в валках. Автор зазначає, що в цьому випадку епюри контактних напружень отримані при нестійкій прокатці з пробуксовками металу. Теоретичне рішення в цьому випадку прокатки представлено на рис. 2 кривими 3. Поточна сила $Q_{\text{хп.}}^*$ на більшій частині осередку деформації є додатною, середня результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^* = 0,0006$, що свідчить про неможливість стійкого процесу прокатки. Зауважимо, що в цьому випадку кут нейтрального перерізу не дорівнює нулю.

В розділі показано, що в осередку деформації можна виділити середньоінтегральне значення результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу $Q_{\text{сер.п.}}^*$. Теоретично ця сила в залежності від умов прокатки може мати різне спрямування. З огляду на те, що $Q_{\text{сер.п.}}^*$ є силою опору, було доведено, що в тих випадках, коли вона спрямована проти ходу прокатування, процес буде проходити стабільно. Якщо ця сила дорівнює нулю – прокатування буде протікати в граничних умовах, а

якщо її вектор буде збігатися з напрямком руху штаби (сила стає активною) – стабільний процес неможливий.

На основі аналізу балансу сил в осередку деформації впливає, що з урахуванням результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу граничні умови прокатування можуть наступати при наявності зони випередження.

Показано, що рівність кута γ нулю не завжди визначає граничні умови прокатування в сталому режимі.

На основі порівняння теоретично розрахованого моменту формозміни металу з моментом, що виникає від сили $Q_{\text{сер.п.}}^*$ було показано, що середня результуюча являє собою внутрішню силу, яку необхідно подолати активним силам, щоб забезпечити формозміну металу в поздовжньому напрямку. Саме в цьому полягає фізична суть даної сили. В результаті чого було розроблено нову методику визначення моменту формозміни металу, в основу якої лягло визначення $Q_{\text{сер.п.}}^*$ в осередку деформації. Результати розрахунку моменту формозміни за запропонованою методикою дають результати на 15-30% і більше його значення, що перевищують обчислені за формулою Фінка.

Третій розділ присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням поздовжньої стабільності процесу прокатування з натягінням. З метою теоретичного визначення середньої результуючої поздовжніх сил було розроблено модель тертя, що більше відповідає певним положенням теорії прокатування. Зокрема, ті, що відповідають граничним і кінематичним умовам точно дозволяють визначити граничні умови прокатування штаби в осередку деформації.

Представимо процес прокатування як осадку в напрямку осі, що проходить під кутом $\alpha/2$ до вертикалі з подальшим транспортуванням металу з осередку деформації як пружного тіла. Виділимо елемент металу у вигляді трикутної призми (рис. 3) і розглянемо його рівновагу в умовах осадки. Припустимо, що деформація є плоскою і взаємно-перпендикулярні грані призми є головними площадками. У цьому випадку на гранях призми будуть діяти головні нормальні напруження σ_1 і σ_3 , а на контактній поверхні, що є похилою площадкою, - нормальний тиск p_x і дотичне напруження τ_{oc} .

В результаті отримаємо систему рівнянь, що характеризує рівновагу трикутної призми:

$$\begin{cases} \sigma_1 \sin \psi dl - p_x \cos \psi dl + \tau_{oc} \sin \psi dl = 0; \\ \sigma_3 \cos \psi dl - p_x \sin \psi dl - \tau_{oc} \cos \psi dl = 0. \end{cases}$$

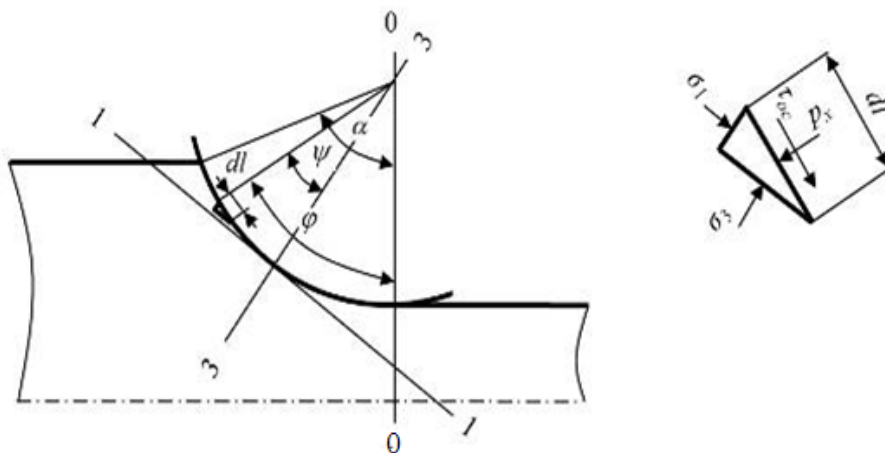


Рисунок 3 – Схема сил, що прикладені до елементарної призми

Віднімаючи другий вираз з першого, і з урахуванням рівняння пластичності, отримуємо одне рівняння, що описує зміну питомих сил тертя на контакті при осадці металу валками

$$\tau_{oc} = \frac{1}{2} \cdot 2k_{cep} \sin 2(\varphi - \alpha/2).$$

Виділимо другу складову тертя, пов'язану з транспортуванням розката через осередок деформації попередньо продеформованих елементів металу. Нехай ця складова залежить від ковзання і визначається функцією $\tau_{тр} = fp_x$.

Тоді рівняння питомої сили тертя в зоні контакту розкату з валками набуває вигляду

$$t_x = \tau_{тр} + \tau_{oc} = fp_x + \frac{1}{2} \cdot 2k_{cep} \sin 2(\varphi - \alpha/2). \quad (4)$$

Проведемо перевірку на відповідність виразу (4) граничним умовам процесу прокатування. З теорії відомо, що гранична захоплююча здатність валків в сталому режимі виникає при $\alpha = 2f$. В цьому випадку осередок деформації є тільки зоною відставання і питомі сили тертя на виході металу з валків дорівнюють нулю. У першому наближенні, приймаючи $\sin 2(\varphi - \alpha/2) \approx 2(\varphi - \alpha/2)$ і з огляду на граничні умови на виході металу з валків: $p_x = 2k_{cep}$ і $t_x = 0$, з рівняння (4) отримуємо $\alpha = 2f$. Як видно, вираз (4) відображає граничну умову прокатування в сталому режимі.

Вводячи в другу складову виразу (4) коефіцієнт $n_1 = (2f/\alpha)^2$, з нього можна отримати відому в теорії формулу для визначення кута нейтрального перерізу.

Проведений аналіз показує, що запропонована модель тертя відповідає граничним і кінематичним умовам прокатки.

Крім цього, для того, щоб добуток $n_2 f = a$ був близьким до коефіцієнта тертя ковзання в пружній зоні і початковій частині осередку деформації до другого доданку в якості множника введемо функцію $\alpha - \varphi/\alpha$.

В результаті всіх перетворень і допущень остаточно модель розподілу питомих сил тертя в осередку деформації при прокатуванні набуває вигляду:

$$\frac{t_x}{2k_{cep}} = a \frac{p_x}{2k_{cep}} + \frac{1}{2} \sin \left[2n_1 \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \frac{\alpha - \varphi}{\alpha}. \quad (5)$$

Проведений в розділі аналіз показує, що запропонована модель тертя відповідає граничним і кінематичним умовам прокатування.

Зауважимо, що f є умовним коефіцієнтом, як впливає з вищенаведеного виразу він не дорівнює середньому коефіцієнту тертя в осередку деформації, який отримано як відношення площ епюр питомих сил тертя і нормального тиску

$$f_{\text{сер}} = \int_{\gamma}^{\alpha} \frac{t_x}{2k_{\text{сер}}} d\varphi + \int_0^{\gamma} \frac{t_x}{2k_{\text{сер}}} d\varphi \bigg/ \int_0^{\alpha} \frac{p_x}{2k_{\text{сер}}} d\varphi \quad (6)$$

Дамо деякі пояснення щодо методики розрахунку питомих сил тертя згідно (5) і середнього коефіцієнту тертя в осередку деформації (6).

Зауважимо, що цей середній коефіцієнт повинен бути отриманий з рішення диференціального рівняння рівноваги в осередку деформації з урахуванням (6) і рівний його дослідному значенню для заданих умов прокатування. Тому процедура вирішення складається з декількох етапів. Попередньо слід задатися умовним коефіцієнтом f . У першому наближенні він може бути прийнятий рівним дослідному значенню коефіцієнту тертя ковзання, або розрахований по одній з відомих емпіричних формул. В результаті вирішення рівняння рівноваги елементарних об'ємів з урахуванням моделі тертя (5) отримуємо епюри розподілу контактних напружень і середній коефіцієнт тертя $f_{\text{сер}}$. Якщо цей коефіцієнт не задовольняє дослідним даними, то варіюючи величиною f , знаходимо необхідне значення $f_{\text{сер}}$. В цьому випадку розрахований середній тиск металу на валки буде відповідати дослідному значенню коефіцієнта тертя і рівновазі штаби в осередку деформації.

Для розрахунку $p_x/2k_{\text{сер}}$, $t_x/2k_{\text{сер}}$ і $f_{\text{сер}}$ із застосуванням ЕОМ була розроблена програма чисельного визначення цих величин методом інтегрування Рунге-Кутта. Цю методику розрахунку контактних напружень і середнього коефіцієнту тертя можна поширити на випадки тонколистового гарячого і холодного прокатування, а також при визначенні поздовжньої стабільності розкату в осередку деформації.

У попередньому розділі, на основі аналізу поздовжніх сил пластично деформованого металу, розроблено методику визначення поздовжньої стабільності розкату в валках при простому процесі прокатування.

Використовуючи цю ідею оцінимо поздовжню стабільність розкату при прокатуванні з натягінням. Нехай для цих умов деформації виконано чисельне рішення рівняння в осередку деформації і отримано епюру розподілу тиску по довжині осередку деформації, що має вигляд, наведений на рис. 4.

Відповідно до рівняння пластичності, епюра зміни поздовжніх напружень $\sigma_x/2k_{\text{сер}}$ будуть змінюватися по довжині осередку деформації так, як показано на рис. 5.

Маючи картину розподілу $\sigma_x/2k_{\text{сер}}$, можна розрахувати поточну поздовжню силу пластично деформованого металу в безрозмірному вигляді. Характер її зміни показаний на рис. 6.

Середньоінтегральне значення результуючої поздовжніх сил при деформації штаби з натягінням розраховується за формулою:

$$Q_{\text{сер.п.}}^* = \frac{1}{\alpha} \left[\int_{\varphi_1}^{\alpha} Q_{x\text{п.}}^* d\varphi - \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} Q_{x\text{п.}}^* d\varphi - \int_0^{\varphi_2} Q_{x\text{п.}}^* d\varphi \right]. \quad (7)$$

Геометрично вираз (7) являє собою алгебраїчну суму площ під кривою $Q_{\text{сер.п.}}^{*Н}$ на ділянках $\alpha-\varphi_1$, $\varphi_1-\varphi_2$ і φ_2-0 віднесену до кута захоплення.

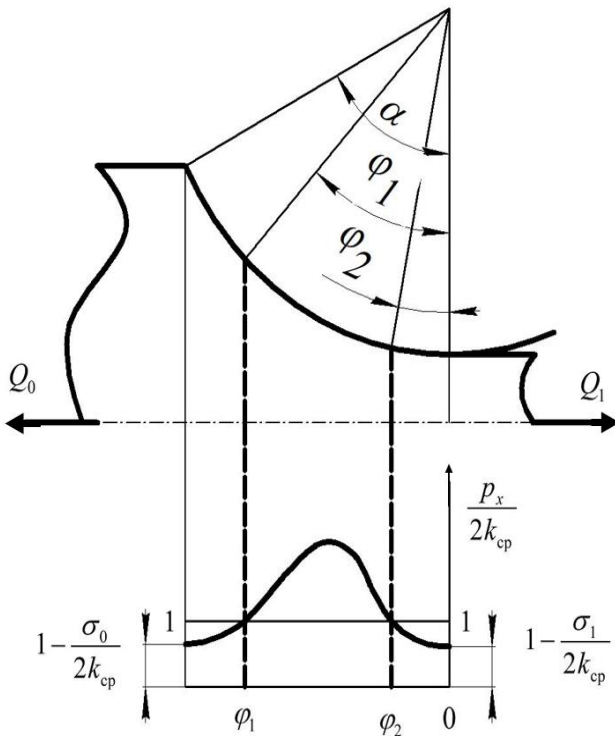


Рисунок 4 – Епюра розподілу тиску при прокатуванні з натяжінням

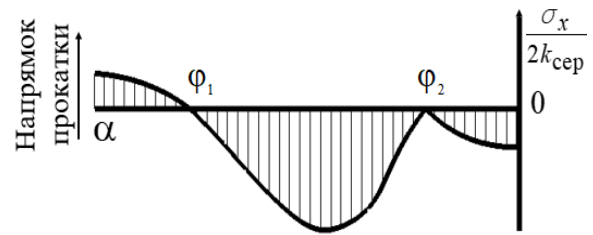


Рисунок 5 – Розподіл поздовжніх нормальних напружень в осередку деформації при прокатуванні з натяжінням

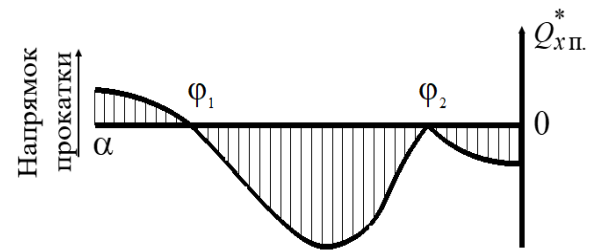


Рисунок 6 – Розподіл поточної поздовжньої сили пластично деформованого металу в безрозмірному вигляді

За величиною і напрямком дії результуючої $Q_{\text{сер.п.}}^{*Н}$ можна оцінити стабільність розкату в осередку деформації при прокатуванні з натяжінням, як і при простому процесі.

У розділі було проаналізовано стабільність процесу прокатування при деформації металу з різними режимами натяжіння і порівняно результати розрахунків з дослідними даними, наведеними в літературному огляді. Автор цієї роботи проводив дослідну прокатку на лабораторному стані дуо в сталевих гладких валках діаметром 250 мм. Устаткування стану включало 2 моталки, що дозволило прокатувати рулонну сталь (сталь 10, відпалену) поперечними розмірами $1,95 \times 30$ мм з різними натяжіннями штаби і незмінним налаштуванням валків. При цьому зміна кінцевої товщини прокату від досліду до досліду виникало через неоднакове сплющення валків при прокатці штаб з різним натяжінням. Розподіл тиску в осередку деформації вимірювався точковою месдозою, а випередження визначалося методом кернів.

При розрахунках контактних напружень скористалися рівнянням рівноваги в осередку деформації при питомих силах тертя, заданих виразом (5). У розділі визначали середній опір деформації, використовуючи експериментальну залежність напруження текучості від відносного обтиснення для сталі 10. Початкову межу плинності металу приймали рівною 260 МПа. Визначали величини сплющених кута захоплення і радіусу валків.

В роботі виконано порівняння теоретично розрахованих епюр розподілу нормального тиску з експериментально отриманими при різних передніх і задніх натяжіннях штаби (рис. 7-8 криві під номером 1), що були відомі раніше. Розраховані епюри розподілу нормального тиску при розрахунку з використанням середнього значення межі плинучості та питомих сил тертя наведені на рис. 7-8 (під номерами 3 і 4 відповідно). В роботі досліджувались зразки під №90-100, у якості прикладу загального характеру розподілу контактних напружень на рис. 7-8 наведені випадки прокатування зразків під №96 та №99..

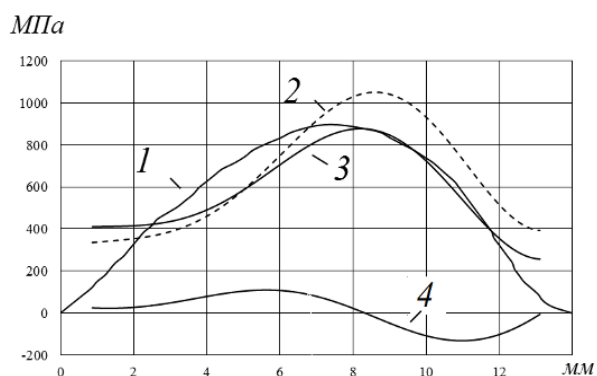


Рисунок 7 – Дослідна і розрахункові епюри контактних напружень при прокатуванні зразка №96

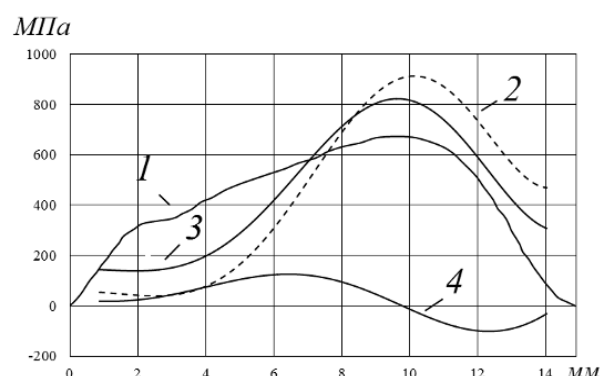


Рисунок 8 – Дослідна і розрахункові епюри контактних напружень при прокатуванні зразка №99

Порівняння характеру розподілу дослідного і розрахункового тиску при прокатуванні з натяжінням показує, що в цілому теоретичний і дослідний розподіл нормального тиску є досить близькими. Зі збільшенням натяжіння штаби, особливо заднього, ці напруги зменшуються. Якісно розрахункові епюри зміни питомих сил тертя відповідають експериментальним. Зі збільшенням заднього натяжіння штаби нейтральний переріз зміщується до виходу металу з валків.

З порівняння випливає, що дослідні і розрахункові значення середнього тиску відрізняються не більше ніж на 12%. Тому збіжність розрахункових і дослідних даних можна вважати задовільною.

На графіках (рис. 7-8) під номером 2 наведені теоретичні епюри розподілу тиску, при перемінних значеннях межі плинучості. В ході порівняльного аналізу дослідного і розрахункового тиску металу на валки показано, що різниця між дослідними і теоретичними значеннями середнього тиску при використанні змінної межі текучості (рис. 7-8, криві 2) значно більші ніж для випадків наведених на рис. 7-8, криві 1.

З урахуванням зазначеного, нижче наведені дослідження поздовжньої стабільності процесу прокатування з використанням двохзвеної моделі (5).

Теоретично проаналізуємо вплив переднього і заднього питомих натяжіннь штаби на результуючу поздовжніх сил пластично деформованого металу. Для цього було побудовано епюри контактних напружень $p_x/2k_{\text{сер}}$ і $t_x/2k_{\text{сер}}$, а також поточних поздовжніх сил $Q_{x\Pi}^*$ для випадків, відповідних прокатуванню

зразків №90, 91, 92, 99 і 100 (номери зразків, що прокатувались лише з заднім натягінням).

Розрахунок сили $Q_{\text{сер.п.}}^{*H}$ показали, що вона у всіх випадках від'ємна, спрямована проти ходу прокатування, отже, процес деформації має відбуватися без пробуксовок, хоча і з різним ступенем поздовжньої стабільності розкату у валках.

Узагальнимо результати теоретичного дослідження поздовжньої стабільності штаби в валках при прокатуванні з натягінням і порівняємо їх з дослідними даними. Для цього проаналізуємо залежність дослідного випередження S і середнього тиску $p_{\text{сер}}/2k_{\text{сер}}$, а також результуючої $Q_{\text{сер.п.}}^{*H}$ від натягіння штаби зразків з дослідів які прокатували без переднього натягіння. Залежність зазначених параметрів від питомого заднього натягіння штаби показано на рис. 9.

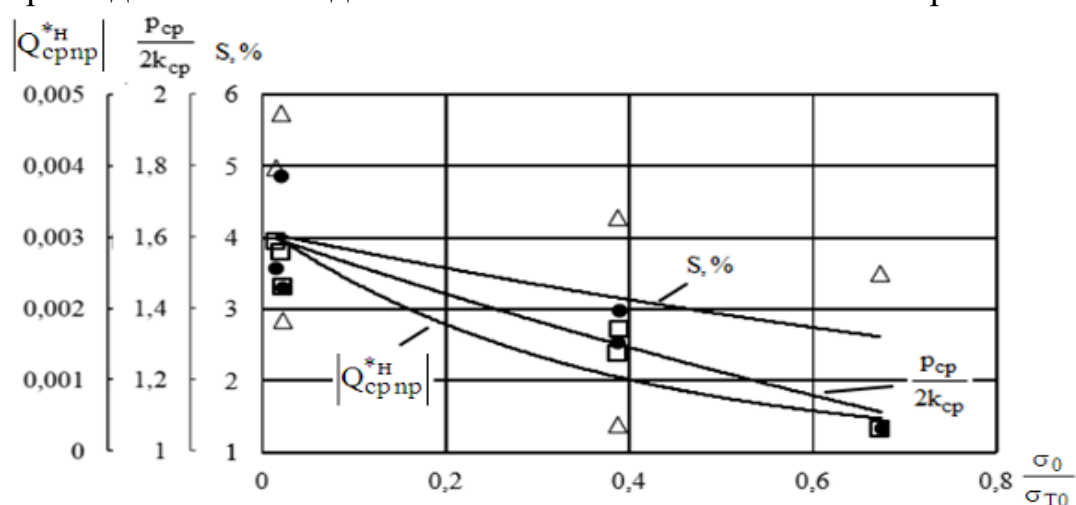


Рисунок 9 – Вплив заднього натягіння штаби на силові і кінематичні параметри:

$$\bullet \quad \frac{p_{\text{сер}}}{2k_{\text{сер}}} \quad \blacktriangle \quad S \quad \blacksquare \quad Q_{\text{сер.п.}}^{*H}$$

Як видно з графіків рис. 9, зі збільшенням заднього питомого натягіння середній тиск і випередження в осередку деформації зменшуються. Зі збільшенням заднього натягіння також по абсолютній величині знижується і середня результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^{*H}$, що свідчить про меншу стабільність процесу прокатування в поздовжньому напрямку.

Проведений аналіз показує, що запропонована методика оцінки поздовжньої стабільності досить точно відображає результати дослідів. Аналіз показав, що середня результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^{*H}$ істотно залежить від заднього натягіння штаби і слабо – від переднього. Теоретичні дані повністю узгоджуються з результатами дослідного прокатування, яке у всіх випадках відбувалося без буксування.

В розділі наведені результати експериментальних досліджень впливу заднього натягіння на випередження.

Дослідження проводилися на одноклітьовому стані 180 кафедри ОМТ ДДТУ в валках номінальним діаметром 180 мм. Привід стану від електродвигуна через редуктор і шестеренну кліть. Вид прокатного стану та установки для створення заднього натягіння наведено на рис. 10.

Результати даних досліджень наведено на графіку, представленою на рис. 11. Випередження при прокатуванні визначали методом кернів.

Як видно з рисунка 10, власні досліди підтвердили залежності отримані при аналізі відомих експериментальних даних. Аналіз отриманих при обробці експериментальних даних показав, що граничні умови прокатування настають при $Q_0 = 2200-2250 \text{ Н}$ ($q_0 = Q_0 / 2k_{\text{сер}}h_1b = 0,24-0,245$) перед пробуксовкою штаби випередження становить 1-2%.

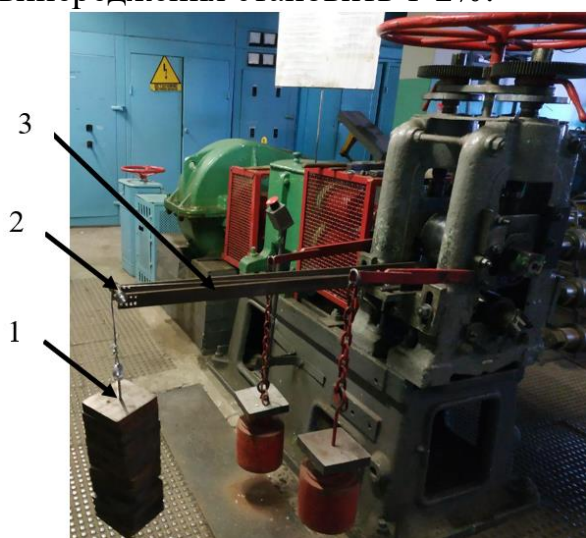


Рисунок 10 – Конструкція для створення заднього натягіння лабораторного стану 180 кафедри ОМТ ДДТУ

1 – вантаж; 2 – блок; 3 – корпус

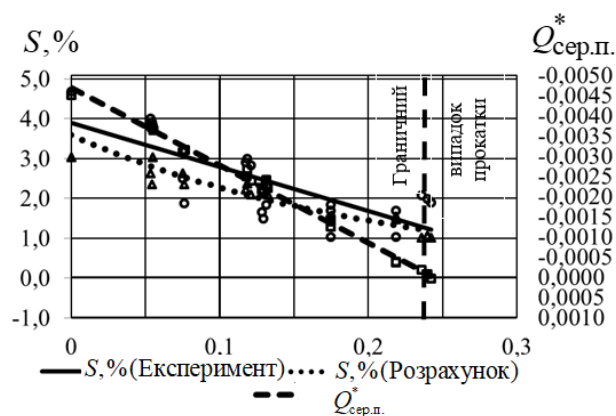


Рисунок 11 – Експериментальні дані по впливу заднього натягіння на поздовжню стабільність процесу прокатування

У четвертому розділі розроблено методику розрахунку раціональних з точки зору енергозбереження режимів натягіння, що базується на визначенні середньої результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу в осередку деформації. Проаналізовано поздовжню стабільність процесу прокатування при режимах, що використовуються на реальних листових станах холодного прокатування 1680, 1400, 1700 та запропоновані раціональні з точки зору стабільності та енергоефективності.

Аналіз результатів дослідження показує, що з посиленням режиму натягіння розкату погіршується поздовжню стабільність його в осередку деформації, так як абсолютне значення сили $Q_{\text{сер.п.}}^*$ зменшується. Така картина спостерігається по всіх клітях стану 1400. Слід підкреслити, що при режимі з найбільшими значеннями натягіння прокатування в другій кліті ведеться в граничних умовах

($Q_{\text{сер.п.}}^* = 0$) і будь-яка зміна параметрів, наприклад, зменшення коефіцієнту тертя, може викликати часткове або повне буксування металу в валках. Крім того, під час прокатування по цьому режиму натяжіння розкату в третій кліті рівноважний стан металу в осередку деформації неможливий ($Q_{\text{сер.п.}}^* = 0,0002$).

Було також виконано аналіз впливу режиму натяжіння на ефективність енергозбереження в цілому по стану 1400. Для цього підсумовано моменти по всім клітям при відповідному режимі натяжіння.

Дослідження показали, що зі збільшенням натяжіння розкату сумарний момент на бочках валків безперервного стану зменшується. Частка першої кліті в загальному зниженні моменту є найбільш суттєвою. Показано, що при цьому знижується і поздовжня стабільність металу в осередках деформації. При значному натяжінні в окремих клітях процес може відбуватися в умовах, близьких до граничних. Такі залежності мають місце при різних моделях тертя на контактні металу з валками. Перерозподіл обтиснень по клітях в умовах безперервного прокатування з натяжінням розкату також впливає на сумарний момент прокатування.

У розділі було удосконалено режими натяжіння на стані 1700 з метою зменшення енерговитрат на ведення процесу. Для цього запропоновано збільшення і перерозподіл натяжіння по клітям. Для цього було скореговано режими натяжіння в міжклітьових проміжках з урахуванням умови сталості секундних об'ємів таким чином, щоб вийти на граничні умови прокатування. При цьому результуюча сила $Q_{\text{сер.п.}}^{*Н}$ буде рівною або близькою до нуля, а сумарний по стану момент прокатування відповідно до проведених досліджень, буде мінімальним. Для забезпечення запасу втягуючих метал в валки сил при можливих коливаннях параметрів деформації (коефіцієнту тертя, температури, геометрії осередку деформації та ін.), отримані значення натяжіння для граничних умов зменшували на 2-3%. При цьому середня результуюча сила по клітях стану була $Q_{\text{сер.п.}}^{*Н} < 0$, що свідчить про стабільність процесу, тобто про достатність сил, що втягують метал в валки сил для забезпечення нормальних умов прокатування. У той же час сумарний момент по клітях близький до раціонального.

Надано технологічні рекомендації з призначення режимів натяжіння на листових станах холодного прокатування, що забезпечують отримання листів при мінімальних енерговитратах. За результатами теоретичних досліджень запропоновано методику обрання оптимальних з точки зору енерговитрат величин натяжіння на неперервних станах. Збільшення натяжіння металу в міжклітьових проміжках дозволило зменшити сумарний момент на неперервних станах холодного прокатування в середньому на 3-5%, що знижує енерговитрати при виробництві листів. Спосіб оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатування захищено патентом України. Запропоновано ряд оптимальних режимів натяжіння, що забезпечують стабільний процес прокатування при мінімально можливих витратах енергії на процес деформації. Розроблені режими натяжіння і методику оцінки

поздовжньої стабільності процесу листового прокатування передано та використано на підприємстві.

Результати досліджень та розроблена на їх основі методика оцінки поздовжньої стабільності простого процесу прокатування та процесу з натяжінням розкату, лабораторна установка та програми використовуються також в наукових дослідженнях і навчальному процесі кафедри ОМТ ДДТУ.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримали подальший розвиток теоретичні основи та методики оцінки поздовжньої стабільності процесу тонколистового прокатування з натяжінням, який дозволить розробляти і удосконалювати технологію виробництва якісної продукції при мінімальних енергетичних витратах.

1. Аналіз теорії і практики холоднокатаного виробництва показав, що він є одним з енергетично затратних процесів пластичної деформації. Значні енерговитрати при холодному прокатуванні листової сталі призводять до здороження продукції і зниження її конкурентоспроможності. В даний час відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо визначення режимів натяжіння листа в межкліткових проміжках. Досліди показують, що гранична умова прокатування, пов'язана з рівністю випередження нулю, не завжди здійснима, тому при призначенні режимів натяжіння часто керуються емпіричними даними без особливого обґрунтування практичними даними.

2. Розроблено критерій оцінки поздовжньої стабільності процесу і граничних умов прокатування, заснований на визначенні безрозмірної середньої результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу $Q_{\text{сер.п.}}^*$. Якщо ця результуюча, будучи силою опору, спрямована протилежно руху штаби (від'ємна), то процес відбувається стабільно без часткових або повних буксувань металу в валках. При нульовому значенні цієї сили прокатування ведеться в граничних умовах, яке є більш жорсткими у порівнянні з вище згаданим ($S = 0$), тому що порушення рівноваги розкату в валках з подальшим буксуванням відбувається і при наявності випередження в 3-5% і більше. Якщо результуюча поздовжніх сил додатна, тобто допомагає процесу, прокатка неможлива.

3. У роботі доведено, що визначення середньої результуючої поздовжніх сил при прокатуванні середніх і тонких листів можливо безпосередньо виходячи з диференціального рівняння рівноваги в осередку деформації. Це істотно спрощує процедуру розрахунків.

4. Показано, що контактні втягуючі сили витрачаються не тільки на подолання виштовхують сил, але і на зрівноважування внутрішніх поздовжніх сил, середня результуюча яких може досягати 30% від запасу сил тертя в осередку деформації. Цей факт підтверджує необхідність враховувати дані сил при аналізі рівноваги металу в осередку деформації і особливо для забезпечення сталого, стабільного процесу прокатки.

5. На основі експериментальних даних з розподілу контактних напружень в різних умовах прокатування проведено порівняння відомих граничних умов (

$\gamma = 0$) з запропонованими і показано, що якщо в першому випадку $\alpha_y^{\max} = 2f_y$, то в другому $\alpha_y^{\max} = (1,4 \div 1,5)f_y$. Як видно, запропонована гранична умова більш точно характеризує граничні умови прокатування.

6. Проаналізовано стабільність процесу прокатування на основі експериментальних даних наведених в літературі прокатки сталеві стрічки з натяжінням. При теоретичному аналізі показано, що при прокатуванні в розглянутих умовах, у всіх випадках процес здійснювався стабільно, що підтверджує результати дослідів. Проведений аналіз дозволив оцінити вплив натяжіння штаби на поздовжню стабільність процесу прокатування. Показано, що заднє натяжіння штаби істотно впливає на абсолютне значення результуючої сили, зменшуючи її. Порівняльний аналіз показав, що при збільшенні заднього натяжіння в 1,7-2 рази середня результуюча поздовжня сила зменшується на 30-40%. Переднє натяжіння штаби слабо впливає на цю силу, декілька збільшуючи її.

З метою більш повного аналізу залежності випередження і середньої результуючої сили від заднього натяжіння штаби, особливо в умовах близьких до граничних, були проведені додаткові дослідження, результати яких показали, що в розглянутих умовах з подальшим збільшенням заднього натяжіння до $Q_0 = 2200-2250$ Н ($q_0 = Q_0 / 2k_{\text{сер}}h_1b = 0,24-0,245$) перед пробуксовкою штаби випередження становить 1-2%, середня сила близька до нуля, що якісно узгоджується з дослідженнями інших авторів і підтверджує правомірність граничної умови.

7. Показано, що зі збільшенням заднього натяжіння штаби по клітям стана зменшується, як результуюча поздовжніх сил, так і сумарний момент, що дозволило запропонувати раціональний за умовами енергозбереження режими натяжіння металу і отримати патент України на новий спосіб прокатки плоских виробів. Збільшення натяжіння металу дозволяє зменшити сумарний момент на станах холодного прокатування в середньому на 5-8%, що знижує енерговитрати при виробництві листів.

8. Результати дисертаційної роботи прийняті до апробації в промислових умовах і подальшого впровадження у виробничу практику удосконалення режиму натяжіння при прокатуванні листів на стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» (акт від 06.08.18 р.), використовується на кафедрі обробки металів тиском Дніпровського державного технічного університету. Розроблено методику визначення поздовжньої стійкості процесу прокатування при виробництві листів на який отримано патент України. На основі запропонованої методики оцінки поздовжньої стійкості процесу прокатки з натяжінням розроблені раціональні режими натяжіння з точки зору економії енергії для діючих листових станів 1400, 1700, 1680.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Максименко О. П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. – Днепропетровск : ДДТУ, 2016. – 212 с.

2. Максименко О. П. Теоретический анализ влияния натяжений на энергозатраты и устойчивость процесса прокатки / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко // Вісник «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 119-125..
3. Maksimenko, O. P., The longitudinal stability of the rolling process with strip tension at a two-section friction model in the roll pass / O. P. Maksimenko, M. K. Izmailov, D. I. Loboyno // Metallurgical and Mining Industry, 2015. – № 9 – pp. 1184-1188. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701867264>
4. Максименко О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – № 6. – С. 47-49.
5. Максименко О. П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2015. – № 1. – С. 59-62.
6. Максименко О. П. Баланс продольных сил в очаге деформации и предельные условия прокатки / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2016. – № 4. – С. 34-37.
7. Максименко О. П. Исследование энергетического взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Ю. А. Минина // Вісник «ХПІ». Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків : НТУ «ХПІ». – 2018. – № 31 (1307). – С. 51-55.
8. Максименко О. П. Влияние натяжения полосы и модели трения на продольную устойчивость процесса прокатки / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. Н. Штода // Сб. науч. тр. Тематичний випуск «Машини і пластична деформація металу» – Каменское ДГТУ. – 2018. – С. 45-51.
9. Максименко О. П. Методика оценки устойчивости процесса прокатки по результирующей продольных сил пластически деформируемого металла / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко // Сб. науч. тр. Тематичний випуск «Машини і пластична деформація металу» – Каменское, ДГТУ. – 2018. – С. 52-58.
10. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки при новой модели трения в очаге деформации / О. П. Максименко, М. К. Измайлова, Д. И. Лобойко, А. В. Атамась // Сб. науч. тр. – Днепропетровск ДГТУ. – 2014. – № 2. – С. 43-48.
11. Максименко О. П. Теоретическое исследование продольной устойчивости полосы в валках / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, В. В. Бакун // Сб. науч. тр. – Каменское ДГТУ. – 2017. – № 2. – С. 21-26.
12. Максименко О. П. Влияние натяжения полосы на суммарный момент при непрерывной прокатке / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Ю. А. Горбатенко // Сб. науч. тр. – Каменское ДГТУ. – 2018. – № 1. – С. 41-48.

13. Расчет рационального режима натяжения полосы с учетом её продольной устойчивости в очаге деформации / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, А. А. Васильев, А. Г. Присяжный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – № 2. – С. 11-15.

14. Пат. 89747 Україна, МПК В21В 1/22 (2006.01). Спосіб прокатування плоских виробів / О. П. Максименко, В. М. Самохвал, М. Є. Нехаєв, Д. І. Лобойко; заявник і патентовласник Дніпродзержинський державний технічний університет. – ; заявл. 16.12.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

15. Максименко О.П. Особенности оценки продольной устойчивости полосы в очаге деформации при прокатке с натяжением / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко // *Вісник «ХП»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХП». – 2015. – № 47 (1166). – С. 49-52. (по матеріалам VII МНТК «Ресурсозбереження та ефективність процесів та обладнання обробки металів тиском машинобудуванні та металургії», Харків, 2015 р.).

16. Исследование продольной устойчивости полосы при прокатке на непрерывных станах / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. Н. Штода, И. И. Штода // *Сб. науч. тр. Тематичний випуск «Машини і пластична деформація металу»* – Каменское ДГТУ. – 2018. – С. 59-64. (по матеріалам IV МНТК «Машини і пластична деформація металу», Кам'янське, 2018 р.).

17. Максименко О.П. Особенности теоретического анализа продольной устойчивости процесса прокатки с натяжением / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. // *Пластична деформація металів: зб. наук. праць / НМетАУ*. – Дніпропетровськ, 2014. – Т.1. – С.33-38.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві: автора в спільних публікаціях:

[1] – дослідження поздовжньої стабільності при різних умовах прокатування; [2, 4, 9, 14] – уточнення методики оцінки поздовжньої захоплюючої здатності валків, що враховує внутрішні поздовжні сили пластично деформованого металу; [3] – розробка моделі тертя; [5, 16] – уточнення методики оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатки з натяжінням і аргументація можливості виділення результуючої внутрішніх сил пластично деформованого металу; [6] – аналіз балансу поздовжніх сил; [7] – на основі методики оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатування доведено фізичну суть середньої результуючої внутрішніх сил; [8] – аналіз впливу величини натяжіння при неперервному прокатуванні на поздовжню стабільність процесу прокатування; [10] – аналіз поздовжньої стабільності процесу безперервного процесу прокатування; [11] – аналіз можливості використання диференційного рівняння рівноваги для визначення величини середньої результуючої внутрішніх сил; [12] – аналіз впливу натяжіння на момент прокатування при різних моделях тертя; [13] – розрахунок раціональних з точки зору енерговитрат режиму натяжіння для стану 1400; [15, 17] – розробка методики оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатки з натяжінням і аналіз експериментальних даних на її основі.

АНОТАЦІЯ

Лобойко Д.І. Удосконалення технології неперервного прокатування на основі моделювання процесу з використанням критерію поздовжньої стійкості – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2019.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі розвитку теоретичних основ поздовжньої стабільності неперервного листового прокатування з метою зменшення енерговитрат.

На основі аналізу результуючої внутрішніх поздовжніх сил, що отримана за допомогою вирішення диференційного рівняння рівноваги розроблено метод оцінки поздовжньої стабільності процесу прокатування з натягінням штаби. На основі розробленого методу оцінки граничних умов прокатування встановлено залежність між величиною натягіння, стабільності розкату в осередку деформації та енергосиловими параметрами, що витрачаються на ведення процесу деформації.

Достовірність отриманих теоретичних результатів підтверджено порівняльним аналізом з експериментальними даними інших вчених та власними дослідженнями. Використання запропонованої в роботі методики дозволяє вдосконалити процеси прокатування з точки зору економії енергії на ведення процесу.

Запропоновано режими натягіння для реальних станів при використанні яких процес безперервного прокатування відбувається при мінімальних енергетичних витратах і при цьому забезпечується стабільність процесу.

Ключові слова: прокатування листа, кут захоплення, коефіцієнт тертя, сила прокатування, момент прокатування, неперервне прокатування, натягіння, стабільність процесу.

АННОТАЦИЯ

Лобойко Д.И. Усовершенствование технологии непрерывной прокатки на основе моделирования процесса с использованием критерия продольной устойчивости – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2019.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи развития теоретических основ продольной устойчивости непрерывной листовой прокатки с целью уменьшения энергозатрат.

На основе анализа результирующей внутренних продольных сил, полученной с помощью решения дифференциального уравнения равновесия разработана методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки с натяжением полосы. На ее основе установлена зависимость между величиной натяжения, стабильностью раската в очаге деформации и энергосиловыми параметрами, которые тратятся на ведение процесса прокатки. Показано, что на ряду со снижением момента прокатки снижается и продольная устойчивость процесса.

В работе предложено и обосновано использование при оценке продольной устойчивости процесса прокатки с натяжением, разработанной в работе модели трения, которая учитывает ряд теоретических и кинематических условий теории прокатки.

В качестве граничного условия прокатки предложено использовать среднюю результирующую продольных сил. Это условие более точно характеризует граничные условия прокатки.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена сравнительным анализом с экспериментальными данными других ученых и собственными опытами. Использование предложенной в работе методики позволяет усовершенствовать процессы прокатки с точки зрения экономии энергии на ведение процесса. Сравнительный анализ показал, что при увеличении заднего натяжения в 1,7-2 раза средняя результирующая продольная сила уменьшается на 30-40%. При этом переднее натяжение полосы слабо влияет на эту силу, несколько увеличивая ее.

Предложено режимы натяжения для действующих станов, при использовании которых процесс непрерывной прокатки происходит при минимальных энергетических затратах и при этом обеспечивается устойчивость процесса. Для этого предложено увеличение и перераспределение натяжения по клетям для станов 1400, 1680 и 1700. Для этого необходимо скорректировать режимы натяжения в межклетевых промежутках с учетом условия постоянства секундных объемов таким образом, чтобы выйти на граничные условия прокатки. При этом средняя результирующая внутренних сил будет равной или близкой к нулю, а суммарный по состоянию момент прокатки, будет минимальным. Для обеспечения запаса втягивающих металл в валки сил при возможных колебаниях параметров деформации (коэффициента трения, температуры, геометрии очага деформации и др.), Полученные значения натяжения для граничных условий следует уменьшить на 2-3%.

Ключевые слова: прокатка листа, угол захвата, коэффициент трения, сила прокатки, момент прокатки, непрерывная прокатка, натяжение, устойчивость процесса.

ABSTRACT

Loboiko D.I. Improving the technology of continuous rolling through the simulation process using the criterion of longitudinal stability - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the Candidate's degree of Technical Science, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of plastic working. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk. 2019.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical task of developing the theoretical foundations of the longitudinal stability of continuous sheet rolling in order to reduce energy consumption.

Based on the analysis of the resulting internal longitudinal forces, obtained by solving the differential equilibrium equation, a method is developed for evaluating the longitudinal stability of the rolling process with tension of the strip. Based on the developed method for assessing the rolling boundary conditions, a addition is established between the magnitude of the tension, the stability of the roll in the deformation zone and the energy-power parameters that are spent on the deformation process.

The reliability of the theoretical results obtained is confirmed by a comparative analysis with the experimental data of other scientists and our own experiments. Using the methodology proposed in this work, it is possible to improve the rolling processes from the point of view of saving energy on the process.

Tension modes are proposed for real states when using which the process of continuous rolling occurs at minimum energy costs and at the same time, the stability of the process is ensured.

Keywords: rolling sheet, angle of capture, coefficient of friction, rolling strength, moment of rolling, continuous rolling, tension, stability of process.

Підписано до друку 05.11.2019. Формат 60×84 1/16
Папір друк. Друк – різнограф. Ум-друк. арк. 1,05.
Тираж – 120. Зам. № 51/19.

Видавець і виготовлювач
Дніпровський державний технічний університет
51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавництв серія ДК № 1944
від 16.09.2004 р.