

УДК 621.771.001

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02>

Василев Я.Д. Самокиш Д.М. Журавльова С.В. Пройдак Ю.С. Замогильний Р.О.

## Стан виробництва тонкого плоского сталевого прокату у світі і тенденції розвитку штабових станів холодної прокатки

Vasilev Ya., Zhuravlova S., Samokysh D., Projdak Yu., Zamogilniy R.

### State of production sheet steel rolled stock in the world and tendencies of development of cold strip rolling mills

Досліджено, проаналізовано та узагальнено стан виробництва і найбільш актуальних напрямків розвитку технології і обладнання станів холодної прокатки для випуску тонкого плоского сталевого прокату. Виконано порівняльний аналіз технології холодної штабової прокатки, яка реалізується в безперервному і реверсивному режимах роботи станів. Наведено технологічні обмеження і критерії при розробці режимів деформації на штабових станах холодної прокатки, спрямовані на розширення їх сортаменту в сторону меншої товщини. Запропонована методика визначення товщини і рекомендований ряд товщини тонкого (1,5-1,8 мм) гарячекатаного підкату для виробництва тонкої жерсті одинарної прокатки і тонких штаб високої якості. Розроблена методика розрахунку і характеру розподілу часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) стану. Представлено методику визначення найменшої товщини штаби, що прокатують на конкретному стані, яка враховує вплив жорсткості робочої кліті і особливостей силового навантаження валкового вузла зі зменшенням товщини і ширини штаби.

Використання наведених матеріалів дозволяє при заданому сортаменті і необхідному обсязі випуску тонкого сталевого холоднокатаного прокату або жерсті, вибрати і обґрунтувати оптимальний варіант технології холодної штабової прокатки, а також розробити раціональні режими деформації, що забезпечують реалізацію процесу холодної прокатки з максимальною ефективністю. В результаті врахування особливостей силової взаємодії тонкої штаби з валками при холодній прокатці і жорсткості робочих клітей стану підвищується точність і надійність визначення параметрів початкової настройки останніх, що відкриває додаткові можливості для розширення сортаменту станів холодної прокатки в сторону менших товщин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ХОЛОДНА ПРОКАТКА, ШТАБА, ПРОКАТНИЙ СТАН, РЕЖИМ ОБТИСКУ, ПІДКАТ, ЖЕРСТЬ.

The conditions of production and the most relevant directions of development of technology and equipment of cold rolling mills for the production of thin flat rolled steel are investigated, analyzed and summarized. A comparative analysis of cold rolling technology is carried out, which is implemented in continuous and reversed modes of mill. The technological limitations and criteria for the development of deformation modes on cold rolling strip mills, which allow to expand the assortment towards a smaller thickness, are given. A method for determining the thickness is proposed, and a series of thicknesses of thin (1.5-1.8 mm) hot-rolled break-down are recommended for the production of tinplate of single rolling and thin strips of high quality. The method of calculation schedule drafting on a specific mill is developed. The technique of determination of the smallest thickness of a strip on a concrete mill is presented, taking into account the influence of rigidity of the working cage and features of the force load of the roller node with a decrease in the thickness and width of the strip.

The use of the above materials allows to select and justify the optimal variant of cold band rolling technology, as well as to develop rational deformation modes that ensure the implementation of the cold rolling process with maximum efficiency, given the desired range and the required volume of thin cold-rolled sheet steel or tinplate. As a result of taking into account the features of the force interaction of the thin strip with the rolls during cold rolling and the rigidity of the working stands of the mill, the accuracy and reliability of determining the parameters are increased, it opens additional possibilities for expanding the range of cold rolling mills towards smaller thicknesses.

KEYWORDS: COLD ROLLING, STRIP, ROLLING MILL, DRAFTING SCHEDULE, BREAK-DOWN, TINPLATE

ВСТУП. Сталь, завдяки своїм незаперечним перевагам (висока питома міцність, легка обробка, задовільна корозійна стійкість, добре налагоджена технологія виробництва і відносно низька ціна) продовжує залишатися основним конструкційним матеріалом і в XXI столітті. Тому її виробництво безперервно збільшується [1, 2] і за даними Всесвітньої асоціації сталі (World Steel Association, WSA) в 2014 році вже перевищила 1670 млн. т. на рік. Приблизно 80% сталі, що виробляється випускається у вигляді прокату різноманітних форм поперечного перерізу і призначення, переважна частка в якому (до 60-73%) [3] належить профілям прямокутного перетину, тобто плоскому (листовому і штабовому) прокату. Плоский прокат підрозділяється по товщині на тонкий (до 4,0 мм) і товстий

(більше 4,0 мм), а за способом виробництва на гарячо-і холоднокатаний [4-6]. Перший спосіб є основним, але зі зменшенням товщини штаби зменшується і температура кінця гарячої прокатки, що обмежує можливості отримання гарячекатаного прокату малої товщини з необхідним комплексом властивостей і з необхідною стабільністю показників якості [5,7-9]. Спосіб холодної прокатки позбавлений цього недоліку і забезпечує високу якість прокату, в тому числі прокату малої товщини, але характеризується більш високими виробничими витратами [4,6,7,9].

Особливе місце в сортаменті плоского сталевого прокату займають тонкий штабовий холоднокатаний прокат [4,10] і жерсть [11-13]. Сталевий штабовий холоднокатаний прокат малої товщини (ме-

нше 0,8-1,2 мм, аж до 0,25-0,35 мм) і жерсть товщиною від 0,08-0,12 мм до 0,20-0,36 мм відрізняються високою якістю поверхні, гарним поєднанням механічних і технологічних властивостей, високою точністю геометричних розмірів і є одним з найбільш ефективних і затребуваних видів металопродукції [10,13]. З такого прокату методами штампування, гнуття і зварювання виготовляють легкі і міцні конструкції, які знаходять широке застосування і визначають технічний прогрес в таких галузях промисловості як автомобілебудування, будівництво, загальне і транспортне машинобудування, приладобудування, виробництво побутової техніки, виготовлення ємностей різного призначення, тари для тривалого зберігання харчових продуктів і ін. З цієї причини випуск сталевого холоднокатаного прокату малої товщини і жерсті постійно збільшується при одночасному посиленні вимог до показників якості продукції, що випускається.

В ході виконання цієї роботи, що відрізняється за структурою і змістом від традиційних науково-дослідницьких робіт були досліджені, проаналізовані та узагальнені отримані результати стану виробництва і найбільш актуальних напрямків розвитку технології і обладнання станів холодної прокати для випуску тонкого плоского сталевого прокату.

**АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ.** До кінця минулого століття, тобто до створення ливарно-прокатних агрегатів (ЛПА) [5,14] виробництво практично всього сталевого прокату товщиною менше 1,5-2,0 мм здійснювалося на штабових станах холодної прокати [4,6]. Це пояснюється тим, що технологія, яка реалізовується на безперервних широкоштабових станах (БШШС) гарячої прокати, через нестабільність температурних умов деформації по довжині розкатів і низьку температуру кінця прокати, не забезпечує отримання тонких гарячекатаних штаб з необхідним рівнем властивостей і стабільністю показників якості [5, 7-9]. З цієї причини частка гарячекатаних штаб товщиною менше 1,5 мм в сортаменті діючих БШШС гарячої прокати до недавнього часу складала всього 0,3%, а частка штаб товщиною 1,5-2,0 мм - 10,3% [9]. Крім того, через обмежені можливості технології гарячої прокати для виробництва тонкоштабової продукції з високими показниками якості поверхні і точності, частина плоского прокату товщиною 2,5-3,5 мм, що входить в сортамент штабових станів гарячої прокати також отримували холодною прокаткою. У зв'язку з цим в стандартах і в сортаменті багатьох діючих, і станів холодної прокати, що проектується входили і входять профілі (штаби) товщиною 2,5-3,5 мм [4,6]. Якщо технологічно таке рішення може бути виправданим, то економічно це недоцільно і невигідно, оскільки виробництво однієї тони холоднокатаного прокату обходиться дорожче гарячекатаного аналогічної товщини на 15-25 доларів США [1,2,9].

Після впровадження і широкого поширення ливарно-прокатних агрегатів співвідношення випуску тонкого штабового гарячо- і холоднокатаного прокату змінилося на користь першого. Сьогодні на ЛПА освоєно масове виробництво тонких гарячекатаних штаб товщиною 1,2-1,5 мм і менше аж до 0,9-1,0 мм (в перспективі до 0,7-0,8 мм) [5] практично зі сталі будь-якого складу з задовільними показниками якості, що дозволяє використовувати їх в багатьох випадках замість холоднокатаних. Це призвело до істотних змін в сегменті товщини споживаного тонкого гарячо і холоднокатаного прокату і, як наслідок, до змін в сортаменті штабових станів холодної прокати в сторону профілів меншої товщини. Облік цих змін передбачає зменшення товщини, поліпшення якості і розширення розмірного ряду товщин гарячекатаного підкату [5,8-11,15,16], вдосконалення існуючих і розробка нових режимів деформації, а також зменшення діаметра робочих валків штабових станів холодної прокати. З теорії і практики листопрокатного виробництва відомо, що зі зменшенням товщини штаб, що прокатують, або зі збільшенням параметра  $R/h_0$  (де  $R$ ,  $h_0$  - радіус робочого валка і товщина штаби на вході в осередок деформації) погіршується здатність робочих клітей до обтиску і знижується ефективність роботи штабових станів холодної прокати [4,9,17-19]. Одним з найбільш ефективних технічних рішень, спрямованих на підвищення здатності робочих клітей до обтиску і розширення сортаменту штабових станів холодної прокати в сторону менших товщин штаб, що прокатують, є зменшення діаметра робочих валків. Це підтверджується досвідом будівництва та експлуатації багатовалкових, перш за все двадцятивалкових реверсивних станів, а також двохклітьових реверсивних станів. Відома німецька фірма SMS, що є одним зі світових лідерів постачальників прокатного обладнання за останні 20 років побудувала десятки реверсивних, в тому числі близько 20 двохклітьових реверсивних станів холодної прокати для випуску тонких штаб, які оснащуються чотирьох- або шестивалковими клітьями з діаметром робочих валків від 200-300 до 420-450 мм [20]. Раніше (25-50 років тому) традиційні безперервні і одноклітьові реверсивні стани холодної прокати оснащували чотирьохвалковими клітьями з робочими валками діаметром 500-660 мм [4,6,7,11].

Таким чином, в результаті створення ЛПА, що об'єднали технології процесів розливання сталі і прокати в один комплекс почався новий етап у розвитку не тільки технології гарячої прокати тонких штаб, але і в технології холодної прокати, а також у розвитку сортаменту і обладнання станів холодної прокати для випуску тонких і особливо тонких штаб. Тому врахування тенденцій розвитку технології, сортаменту і обладнання штабових станів холодної прокати, що викликано широким застосуванням ливарно-прокатних агрегатів для виробництва тонких гарячекатаних штаб є актуальним завданням.

**МЕТА РОБОТИ.** Метою роботи є аналіз стану виробництва тонкого сталевого холоднокатаного прокату в світі, визначення тенденцій розвитку технології і обладнання штабових станів холодної прокатки і встановлення можливостей для розширення їх асортименту в сторону зменшення товщини штаб, що прокатують, з урахуванням асортименту тонких гарячекатаних штаб, виробництво яких освоєно на ЛПА.

**СТРУКТУРА І СОРТАМЕНТ ПЛОСКОГО СТАЛЕВОГО ХОЛДНОКАТАНОГО ПРОКАТА, ЩО СПОЖИВАЮТЬ.** Основними споживачами плоского сталевого холоднокатаного прокату є автомобілебудування, будівництво, машинобудування, а також галузь, що виготовляє металовироби, які використовуються при виробництві побутової техніки, сантехнічних систем, контейнерів і т.д., на частку яких припадає майже 90% продукції, що випускається. Однак лідируюче місце серед них займає автомобілебудування, яке споживає понад третину плоского сталевого холоднокатаного прокату [10]. Ще 25-30 років тому ніші виробництва тонкого гарячекатаного і холоднокатаного прокату були жорстко визначені і в асортимент станів холодної прокатки входили штаби товщиною 2,0-2,5 мм і менше. Однак, після освоєння випуску тонкого гарячекатаного сталевого прокату на ЛПА в структурі споживання плоского сталевого холоднокатаного прокату відбулися істотні зміни, що призвело до змін асортименту штабових станів холодної прокатки в сторону менших товщин, і до зменшення випуску окремих розмірів профілів холоднокатаного прокату. Протягом 2000-2008 рр. виробництво і споживання сталевого холоднокатаного прокату в світі залишилося на рівні 82-85 млн. т. [10]. У наступні 7 років виробництво холоднокатаного прокату в світі збільшилося приблизно на 25 млн. т. і в даний час за експертними оцінками становить 120-122 млн. т. на рік. Виробництво жерсті за останні 20-30 років практично не змінювалося та знаходиться на рівні 16,5-17,5 млн. т. на рік [13]. Таким чином, сумарне виробництво тонкого сталевого холоднокатаного прокату загального призначення і жерсті в світі сьогодні оцінюється на рівні 136,5-139,5 млн. т. на рік, що становить понад 10% від усієї продукції, що отримана прокаткою. Лідером серед країн виробників плоского холоднокатаного сталевого прокату є КНР, далі йде Японія, США і республіка Корея. Очікується, що позитивна динаміка розвитку виробництва плоского сталевого холоднокатаного прокату збережеться і в майбутньому, але при одночасному зменшенні товщини і збільшенні міцності властивостей продукції, що випускається за рахунок розширення марочного асортименту сталей. Ця тенденція визначається, перш за все, перспективами розвитку автомобільної промисловості - основного споживача холоднокатаного сталевого прокату. Сьогодні пріоритетним напрямком у розвитку автомобілебудування є використання тонкого сталевого холоднокатаного прокату з межею міцності до 1000-1500 Н/мм<sup>2</sup> з ви-

сокоміцних і сталей з над високою міцністю, з поступовою відмовою від застосування прокату м'яких (рядових) сталей [10]. Згідно з прогнозом фахівців Chrysler LLC і American Iron and Steel Institute, розробленого в рамках роботи над проектом FCV (Автомобіль майбутнього зі сталі) частка рядових сталей в автомобілі повинна скоротитись до 2020 р до 35-40% від рівня останніх років в 62,4%, а частка високоміцних зросте з 47,6% до 60-65%.

Дані про зміни асортименту і обсягу виробництва (споживання) плоского сталевого холоднокатаного прокату в світі з 2008 по 2015 р.р., показані на гістограмах (рис. 1), побудовані за матеріалами роботи [10].

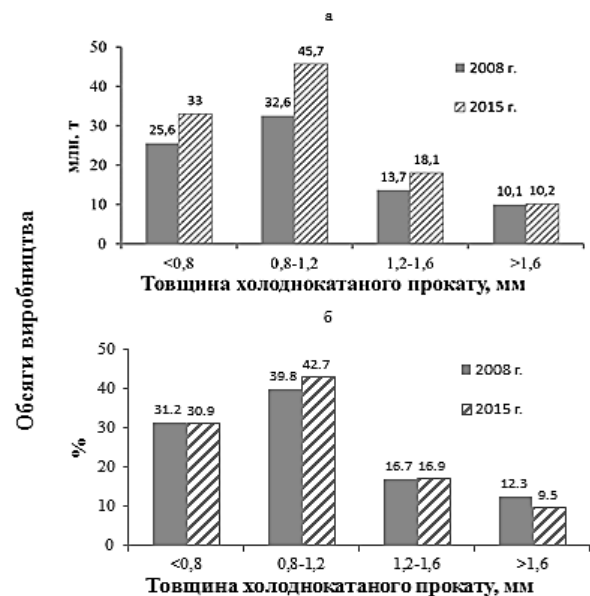


Рисунок 1 – Залежність зміни обсягів виробництва і асортименту плоского сталевого холоднокатаного прокату з 2008 по 2015 р.р., в млн.т/р (а) і в % (б)

З рис. 1, а видно, що обсяги випуску холоднокатаного прокату товщиною менше 1,6 мм збільшилися суттєво, але найбільше зростання (на 40%) зафіксовано при виробництві холоднокатаного прокату товщиною 0,8-1,2 мм, що служить підтвердженням тенденції зменшення товщини холоднокатаного прокату. Ці дані в відносних величинах представлені на рис. 1, б. Вони свідчать про те, що частка холоднокатаного сталевого «товстого» (товщиною більше 1,6 мм) прокату зменшилася з 12,3 до 9,5% або на 2,8%, в той час як частка прокату товщиною 0,8-1,2 мм збільшилася на 2,9% (з 39,8 до 42,7%). За ці сім років збільшилася також частка холоднокатаного прокату товщиною менше 1,2 мм з 16,7 до 16,9%. Бажана товщина жерсті односторонньої прокатки, що споживалась в світі з 2008 по 2015 р.р. зменшилася з 0,193 до 0,142 мм (рис. 2) [13], підтверджуючи тим самим загальну тенденцію зменшення товщини плоского холоднокатаного прокату.

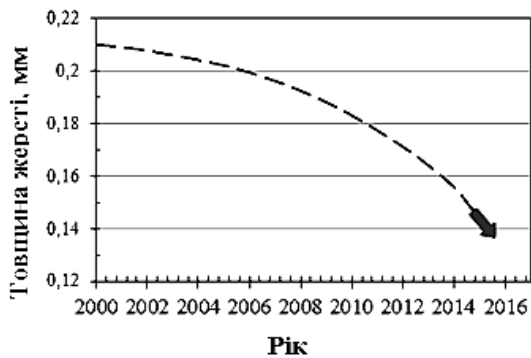


Рисунок 2 – Тенденція зменшення товщини жерсті одинарної прокатки, якій віддають перевагу споживачі

Важливим геометричним параметром плоского сталевого холоднокатаного прокату і жерсті є ширина профілю, яка залежить від його призначення і обмежується довжиною бочки валків станів холодної прокатки. Споживання плоского сталевого холоднокатаного прокату в світі по ширині виглядає наступним чином [10]: менше 1200 мм - 21%; 1200-1400 мм - 48%; 1400-1700 мм - 29%; більше 1700 мм - 2%. Таким чином, частка профілів шириною 1400 мм і менше становить 69%, що дозволяє розглядати їх як найбільш затребувані, для виробництва яких доцільно використовувати стани холодної прокатки з довжиною бочки до 1700 мм.

Ширина жерсті, що вироблена і споживана в світі до недавнього часу не перевищувала 864-1016 мм (34-40 дюймів). Однак в останні роки, з метою економії дорогого металу, в розвинених країнах стали виробляти і застосовувати жерсть шириною 1120-1220 мм (44-48 дюймів). Тому для виробництва жерсті використовують стани з довжиною бочки валків 1200 і 1400 мм.

**РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ ШТАБОВИХ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ.** Пластична деформація металу при холодній штабовій прокатці здійснюється в безперервному або реверсивному режимах роботи стану. У зв'язку з цим розрізняють технології безперервної і реверсивної прокатки. При безперервній прокатці, кількість клітей безперервного стану дорівнює числу частинних обтиснень штаби, тому напрямку руху останньої в процесі прокатки залишається незмінним і вона обтискається тільки один раз в кожній кліті. Технологія безперервної прокатки забезпечує максимальну продуктивність стану і високу якість продукції, що робить її застосування кращим, перш за все при великих обсягах і вузькому сортаменті продукції, що випускається. Технологія реверсивної холодної прокатки призначена для випуску різноманітної продукції в невеликих обсягах, тобто коли необхідна велика гнучкість виробництва. Ще двадцять років тому для реалізації даної технології використовували тільки одноклітьові реверсивні стани. При прокатці на одноклітьових реверсивних станах пластична деформація (обтиск) штаби здійснюється багаторазово в одній кліті з обов'язковою зміною напрямку руху останньої і початкової

настройки робочої кліті після кожного пропуску, що збільшує втрати робочого часу і обмежує можливість ведення процесу на великій швидкості. З цієї причини реверсивна прокатка на одноклітьових станах відрізняється низькою продуктивністю і значними технологічними відходами металу у вигляді некондиційних решт штаби кожного рулону, що видаляються. Реалізація технології реверсивної прокатки на двохклітьових станах (рис. 3) дозволяє мінімізувати істотно зазначені недоліки.

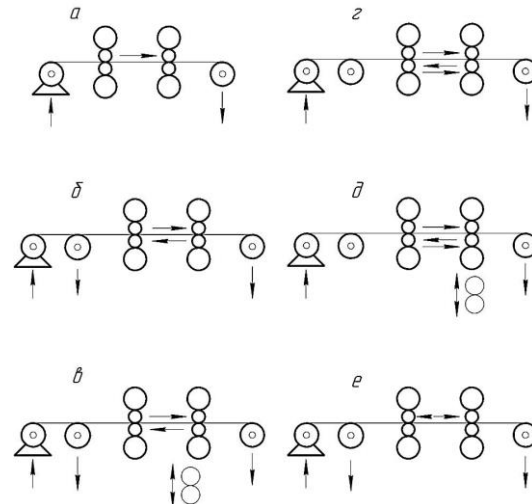


Рисунок 3 – Схеми прокатки на двохклітьовому реверсивному стані

Двохклітьові реверсивні стани - це новий тип станів холодної прокатки, які були створені приблизно двадцять років тому [21, 22]. Технологія прокатки на двохклітьових реверсивних станах забезпечує ведення процесу за кількома схемами (рис. 3): за один (рис. 3, а), два (рис. 3, б, в), три (рис. 3, г, д) або більше пропусків (рис. 3, е). При цьому в останній кліті останнього пропуску можуть бути використані робочі валки іншого діаметра або з іншою шорсткістю (рис. 3, в, д). У першому випадку (рис. 3, а) прокатка здійснюється як на звичайному двохклітьовому безперервному стані. У всіх інших випадках (рис. 3, б-е) прокатка реалізується в реверсивних режимах. Для забезпечення стійкості процесу прокатки і формування необхідної шорсткості поверхні готової продукції в кожній кліті двохклітьових реверсивних станів застосовують, як правило, робочі валки з різною шорсткістю. Технологія реверсивної прокатки на двохклітьових станах реалізується на швидкості до 22,5 м/с і в порівнянні з технологією прокатки на одноклітьових станах дозволяє скоротити кількість пропусків і отже пауз в два рази. У цьому сенсі вона може розглядатися як якийсь розумний компроміс між безперервною і одноклітьовою реверсивною прокаткою.

З викладеного випливає, що основними і найбільш перспективними технологіями для масового виробництва тонкого сталевого холоднокатаного прокату є технології безперервної і реверсивної прокатки, що реалізуються на багатоклітьових

безперервних і на двохкільтових реверсивних станах.

Статистика свідчить, що протягом останніх 70 років в різних країнах будували і експлуатували безперервні стани для виробництва сталевих холоднокатаного прокату з кількістю робочих клітей від 3 до 6. За даними роботи [6] в 1999 році в світі працювали 200 безперервних станів холодної прокатки (БСХП). У 1958 році таких станів тільки в США було 90 і 30 в Європі [23]. В даний час трьохкільтові БСХП не будуються і вже не експлуатуються. Практично припинено також будівництво нових чотирьохкільтових станів, оскільки холодна прокатка штаб товщиною менше 0,5 мм, тобто штаб малої товщини не тільки з високоміцних, але і з рядових сталей на цих станах неможлива або неефективна. Аналіз показав, що з 50 БСХП, побудованих з 1982 по 2017 р.р. в світі 35 (70%) призначені для прокатки вуглецевих, в тому числі високоміцних сталей, 8 - для прокатки жерсті, 4 - для прокатки нержавіючих сталей і 3 для прокатки кременистих сталей. Цікаво відзначити, що 26, тобто 74% з 35 безперервних станів для прокатки вуглецевих сталей були оснащені агрегатами безперервного цинкування (АБЦ). Більш того, після 1993 року БСХП без АБЦ не будувалися, що пояснюється необхідністю і доцільністю ефективного захисту від корозії тонкого холоднокатаного прокату. За кількістю робочих клітей всі 50 новозбудованих БСХП розподілилися наступним чином: шестикільтові - 3, п'ятикільтові - 39, чотирьохкільтові - 8. Найбільша кількість БСХП було побудовано в КНР - 20, в Республіці Корея - 8, в Японії - 7, в США і на Тайвані по 3, в Індії, Туреччині і Таїланді - по 2, в Мексиці, Канаді та В'єтнамі - по 1. Як видно більшість (39) з 50 новозбудованих БСХП є п'ятикільтовими. Саме п'ятикільтові безперервні стани з довжиною бочки від 48-56 дюйма (1220-1420 мм) до 68-90 дюймів (1730-2285 мм) становить основу і будуть визначати можливості і перспективи розвитку сучасної металургійної промисловості для виробництва тонкого сталевого прокату високої якості. Справедливість цього висновку підтверджується також накопиченим досвідом роботи відомої німецької машинобудівної фірми SMS group – проектувальника, виробника і одного з найбільших в світі постачальників прокатного обладнання для виробництва плоского сталевого холоднокатаного прокату. Згідно з даними цієї фірми нею з 1976 по 2016 р.р., тобто за останні 40 років було побудовано 35 безперервних станів холодної прокатки, з них 33 стани є п'ятикільтовими, один чотирьохкільтовим і один трьохкільтовим. На цих станах, що експлуатуються в дев'яти різних країнах світу (15 в КНР, 8 в США, 4 в Республіці Корея, по 2 в РФ і Бразилії, по 1 в Індії і на Філіппінах) реалізовані найсучасніші технологічні схеми прокатки. Двадцять вісім з 35 побудованих фірмою SMS group працюють за принципом «штаби нескінченної довжини», тобто є станами нескінченної холодної прокатки, причому 23 стану суміщені

(об'єднані) з безперервними травильними агрегатами (БТА), що на сучасному етапі є найбільш оптимальним варіантом поєднання технологічних операцій при виробництві штабового холоднокатаного прокату. І тільки 5 з станів, побудованих фірмою SMS group до середини вісімдесятих років минулого століття відносяться до безперервних станів традиційної конфігурації. У сортаменті діючих п'ятикільтових БСХП загального призначення входять штаби товщиною від 0,25-0,3 до 2,0-3,0 мм. Вони оснащені в основному клітьями кварто системи SVC-4, однак при прокатці тонких штаб з високоміцних сталей остання, або останні дві кліті виконують шестівалковими системи SVC-6. Максимальна швидкість прокатки зазвичай не перевищує 20-25 м/с і обмежується нестабільністю геометричних розмірів, станом поверхні і властивостей підкату, фрикційною взаємодією штаби з валками, температурними і швидкісними умовами прокатки, силовою взаємодією робочих клітей через штабу, динамічною ситуацією в лінії стану, ймовірністю виникнення вібраційних явищ і ін. [6,7,18,19,22-31]. Намітилася також тенденція до зменшення діаметра робочих валків клітей кварто з 600-660 до 450-500 мм [6,22,24]. Річна продуктивність п'ятикільтового БСХП загального призначення в залежності від сортаменту продукції, що випускається і прийнятої технологічної схеми прокатки знаходиться в межах від 1,0-1,5 до 1,8-2,3 млн. т.

З восьми безперервних станів для прокатки жерсті, побудованих після 1982 р. більша частина (п'ять станів) є п'ятикільтовими і тільки три шестикільтовими. Підвищений інтерес до шестикільтових безперервних жерстепрокатних станам, проявлений на початку шістдесятих років був пов'язаний з очікуваннями освоєння виробництва особливо тонкої жерсті одинарної прокатки товщиною 0,08-0,10 мм на цих станах. З цією метою з 1961 по 1982 р.р. в світі були встановлені дев'ять станів даного типу з довжиною бочки валків 1320-1420 мм [32]. Однак виявилось, що переробка особливо тонкої жерсті одинарної і подвійної прокатки нетехнологічна і її застосування в багатьох випадках недоцільно [12,13]. Тому сьогодні найменша доцільна товщина жерсті, що виробляється і споживається складає 0,12-0,14 мм. Виробництво жерсті одинарної прокатки зазначеної товщини, а також інших профілів тонкої жерсті (0,15-0,16 мм), що користуються підвищеним попитом вже освоєно на п'ятикільтових безперервних жерстепрокатних станах і доцільність в будівництві шестикільтових станів практично відпала. Це стало можливим в результаті вдосконалення параметрів технології та обладнання п'ятикільтових безперервних станів і використання більш тонкого (1,5-1,8 мм) гарячекатаного підкату з поліпшеними показниками якості [5,15,16]. У зв'язку з цим п'ятикільтові жерстепрокатні безперервні стани вже сьогодні можуть розглядатися в якості основних агрегатів для виробництва жерсті в великих обсягах (до 300-400 тис. т. на рік) і тонких штаб високої якості. Максимальна

швидкість прокатки, що забезпечує стабільну роботу цих станів становить не більше 25-28 м/с. Для забезпечення високої здатності робочих клітей жерстепрокатних станів до обтиску і отримання продукції з високими показниками точності, процес прокатки на цих станах доцільно вести при значеннях параметра  $b/L=0,70-0,88$  (де  $b$ ,  $L$  – ширина жерсті, що прокатують і довжина бочки валків).

Двохклітьові реверсивні стани зайняли міцнішу агрегативну структуру для виробництва жерсті і тонких штаб високої якості, а також холоднокатаних штаб широкого сортаменту в обсягах, отримання яких на одноклітьових реверсивних станах неможливо, а на безперервних станах не завжди доцільно. Цим пояснюється той факт, що за двадцять років таких станів в світі було побудовано близько двадцяти. Діючі двухклітьові реверсивні стани оснащені чотирьох або шестивалковими клітьями системи SVC-4 або SVC-6 з діаметром робочих валків від 200-300 до 420-450 мм і довжиною бочки валків 1200-1750 мм. Вони розраховані на максимальну швидкість прокатки 22,5 м/с і призначені для виробництва тонкої жерсті і тонких штаб високої якості товщиною від 0,09-0,15 до 0,35-0,50 мм, а також для випуску більш товстих (2, 0-3,5 мм) штаб широкого сортаменту. Річна продуктивність цих станів в залежності від сортаменту продукції, що випускається, знаходиться в межах від 0,2-0,4 до 0,5-1,0 млн. т. Зазначені можливості та переваги двухклітьових реверсивних станів холодної прокатки в поєднанні з великою гнучкістю в роботі робить доцільним їх спорудження, як на підприємствах середньої потужності, так і на великих металургійних комбінатах.

Параметри сучасних одноклітьових реверсивних станів холодної прокатки, за винятком швидкості, яка завжди значно менше, практично не відрізняються від параметрів двухклітьових реверсивних станів холодної прокатки. Однак продуктивність цих станів при однаковому сортаменті в 2,5-3,5 рази нижче продуктивності аналогічних по довжині бочки валків двухклітьових реверсивних станів, що і визначає доцільність і області їх застосування.

**РЕЖИМИ ДЕФОРМАЦІЇ І ТОВЩИНА ГАРЯЧЕКАТАНОГО ПІДКАТУ.** Режим деформації на будь-якому стані холодної прокатки є основним елементом технології виробництва плоского холоднокатаного прокату [26]. Режим обтиску визначає продуктивність стану, якість поверхні, точність і властивості готової продукції, ступінь завантаження механічного та електричного обладнання, питомі витрати електричної енергії, стабільність процесу і стійкість штаби при прокатці. Тому розрахунок режиму обтиску виконують для кожного сорторозміру штаб, що прокатують. В ході розрахунку режиму обтиску визначають товщину вихідної заготовки (підкату), значення частинних відносних обтиснень і натягів по клітям (пропускам), швидкісний і температурний режими прокатки, силу, момент і потужність прокатки, перевіряють дотримання технологічних обмежень і виконання прий-

ятих критеріїв оптимізації, обчислюють годинну продуктивність стану. За результатами розрахунків режимів обтиску визначають величину початкового зазору між валками і здійснюють початкову настройку робочих клітей стану [4,9,17,31]. Крім цього вони служать основою для управління технологічним процесом прокатки на стані [30,33]. Тому підвищення точності і надійності прогнозування технологічних параметрів процесу при розробці режимів деформації на штабових станах холодної прокатки актуально. Питання, пов'язані з розробкою режимів деформації на штабових станах холодної прокатки викладені досить повно в літературі [9,25,26,28,34], що виключає необхідність їх повторного викладу. Запропоновано також обґрунтовані розрахункові методики для їх реалізації [35,36]. У зв'язку з цим нижче розглянуто тільки окремі аспекти обговорюваної проблеми, пов'язані з особливостями розрахунку режимів деформації при холодній прокатці тонких і особливо тонких штаб на двухклітьових реверсивних і безперервних станах:

#### 1. Товщина гарячекатаного підкату

Товщина гарячекатаного підкату  $h_n$  є найважливішим параметром режиму деформації і технології виробництва холоднокатаного прокату. Теоретичне визначення товщини гарячекатаного підкату в даний час неможливо. У зв'язку з цим на практиці величину  $h_n$  обчислюють за емпіричною формулою [26]:

$$h_n = \frac{h_k}{1 - \varepsilon_\Sigma}; \quad (1)$$

де  $h_k$  - кінцева (необхідна) товщина холоднокатаного прокату, (мм);  $\varepsilon_\Sigma$  - сумарний відносний обтиск при холодній прокатці, (частки одиниці).

Ключову роль в цій формулі грає величина сумарного відносного обтиску  $\varepsilon_\Sigma$ , оскільки вона визначає не просто товщину підкату, а впливає на формування структури деформованого металу і має забезпечувати отримання готової продукції з необхідним комплексом властивостей [4,7,8,28,37,38]. Разом з тим, величина сумарного відносного обтиску  $\varepsilon_\Sigma$  може обмежуватися також можливостями механічного та електричного обладнання стану холодної прокатки, що призводить до звуження його сортаменту. Тому величину  $\varepsilon_\Sigma$ , а отже і остаточну товщину гарячекатаного підкату  $h_n$  визначають тільки експериментальним шляхом з урахуванням технологічних можливостей встановленого на конкретному підприємстві штабового стану гарячої прокатки [5,7,8,11,28]. Вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що величина  $\varepsilon_\Sigma$  при холодній прокатці змінюється в межах - від 0,45-0,50 до 0,9-0,925 [15,16], а товщина гарячекатаного підкату застосовується від - 1,5-1,6 до 3,0-6,5 мм. Отримання тонкого (1,5-1,8 мм), а в перспективі і особливо тонкого (1,1-1,4 мм) гарячекатаного підкату з необхідним комплексом властивостей і з необхідними показниками якості проблема технологічно складна, яка в даний час не отримала задовільного рішення, що стримує розширення сортаме-

нту і збільшення обсягів виробництва тонкої і особливо тонкої жерсті і особливо тонких штаб високої якості будь-якого призначення. Виробництво тонкого гарячекатаного підкату з необхідним комплексом властивостей на БШШС традиційної конфігурації технологічно важко, і в більшості випадків недоцільно, або неможливо. Результати дослідження, [39], виконаного на тихохідному БШШС 1680 гарячої прокатки традиційної конфігурації показали, що через нестабільність температурних умов деформації та низьку температуру кінця гарячої прокатки отримання підкату зі сталі 08кп з необхідними параметрами структури і з задовільною пластичністю і границею текучості не більше 260 Н/мм<sup>2</sup> можливо тільки при товщині останнього, що перевищує 3,0-3,5 мм. В даний час необхідні умови і можливості для виробництва тонкого і особливо тонкого гарячекатаного підкату з необхідним комплексом властивостей є тільки на ливарно прокатних агрегатах [5].

Виходячи зі сказаного і з огляду на те, що сумарний обтиск при прокатці жерсті складає 0,850-0,925, на діючих жестепрокатних станах використовують гарячекатаний підкат товщиною від 1,5-1,6 до 1,8-2,2 мм, а в ряді випадків і більшої товщини, що з точки зору енергетичних витрат не доцільно. Наприклад, на підприємстві Arcelor Mittal Теміртау (Казахстан) для виробництва всіх типорозмірів жерсті товщиною 0,16-0,36 мм, а також штаб товщиною 0,5 мм загального призначення застосовують підкат однієї товщини - 2,4 мм, що відрізняється задовільною пластичністю і низькою границею текучості (260 Н/мм<sup>2</sup>) [11,12,26]. У роботах [15,16] представлений компромісний розмірний ряд товщини гарячекатаного підкату для виробництва тонкої і особливо тонкої жерсті одинарної прокатки на п'яти і шестиклітьових безперервних станах, а також на двохкільтьових реверсивних станах. При прокатці тонких штаб товщиною 0,35-0,50 мм з низьковуглецевих сталей величина сумарного відносного обтиску знаходиться в діапазоні 0,75-0,84, а товщина гарячекатаного підкату становить 1,8-2,2 мм. При виробництві більш товстих штаб (від 0,6-1,0 до 2,0-3,5 мм) величина сумарного відносного обтиску знаходиться в діапазоні від 0,67-0,74 до 0,45-0,55, що дозволяє використовувати гарячекатаний підкат товщиною відповідно 2,3-3,0 і 3,8-6,5 мм.

2. Розподіл часткових відносних обтисків і натягів по клітям (пропускам)

В сортамент діючих станів холодної прокатки входять штаби зі сталей і сплавів, що відрізняються різним рівнем і характером зміни границі текучості (зміцнення) деформованого металу, що підтверджується відомою залежністю [26,40]:

$$\sigma_{\text{TE}} = \sigma_{\text{ТВІХ}} + m(100\varepsilon_{\Sigma})^k \quad (2)$$

$$\text{або } \sigma_{\text{TE}} = \sigma_{\text{ТВІХ}} k_{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - \left( 1 - \frac{k_{\text{сер}}}{k_{\varepsilon 1}} \varepsilon_{\text{сер}} \right) \left( 1 - \frac{k_{\text{сер}}}{k_{\varepsilon 2}} \varepsilon_{\text{сер}} \right) \left( 1 - \frac{k_{\text{сер}}}{k_{\varepsilon 3}} \varepsilon_{\text{сер}} \right) \times \dots \times \left( 1 - \frac{k_{\text{сер}}}{k_{\varepsilon n}} \varepsilon_{\text{сер}} \right), \quad (7)$$

$$\text{де } k_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{\text{TE}}}{\sigma_{\text{ТВІХ}}} = 1 + \frac{m}{\sigma_{\text{ТВІХ}}} (100\varepsilon_{\Sigma})^k; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = (h_{\text{П}} - h_{\text{К}}) / h_{\text{П}}; \quad (5)$$

$\sigma_{\text{ТВІХ}}$ ,  $\sigma_{\text{TE}}$  – вихідна границя текучості гарячекатаного підкату і розраховане з урахуванням зміцнення металу при холодній прокатці значення даного параметра, Н/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{\Sigma}$  – сумарна ступінь деформації при холодній прокатці, частки одиниці;  $m$ ,  $k$  – коефіцієнти, що визначають відповідно інтенсивність (Н/мм<sup>2</sup>) і характер зміцнення (безрозмірна величина) зміни границі текучості матеріалу штаби при холодній прокатці;  $k_{\varepsilon}$  – коефіцієнт зміцнення матеріалу штаби при холодній прокатці (безрозмірна величина).

Значення коефіцієнта зміцнення  $k_{\varepsilon}$  завжди більше 1,0 і для різних сталей і сплавів кольорових металів при  $\varepsilon_{\Sigma}=0,45-0,925$  досягають 2-4 і більше, що свідчить про сильний вплив зміцнення на рівень і характер розподілу часткових відносних обтисків і натягів по клітям (пропускам) стану холодної прокатки. Однак кількісний вплив цього чинника в даний час практично не досліджено. З цієї причини на практиці при визначенні величини і характеру розподілу часткових відносних обтисків і натягів по клітям (пропускам) на кожному конкретному стані керуються накопиченим досвідом, традиціями і інтуїцією. Недостатня обґрунтованість такого підходу підтверджується тим, що на різних заводах, на однотипних станах з однаковим сортаментом застосовують різні схеми розподілу часткових відносних обтисків і натягів [26,28,36].

Викладені міркування свідчать про необхідність і доцільність при визначенні рівня і характеру розподілу часткових відносних обтисків і натягів по клітям (пропускам) стану враховувати закономірності зміни характеристик міцності властивостей (границі текучості) деформованого металу. Вирішення цього завдання має здійснюватися в ході розрахунку режиму обтиску для кожного сорторозміру штаб, що прокатують. Беручи до уваги, що при виконанні розрахунку режиму обтиску на конкретному стані величина  $\varepsilon_{\Sigma}$  відома найзручніше для початку розрахунку прийняти значення часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) однаково і рівними  $\varepsilon_{\text{сер}}$ :

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{сер}})^n, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість робочих клітей (пропусків).

Далі для знайдених згідно (6) вихідних значень  $\varepsilon_{\text{сер}}$  розраховують величини коефіцієнта зміцнення матеріалу штаби в кожній кліті (кожному пропуску)  $k_{\varepsilon i}$  і його середнє значення  $k_{\varepsilon \text{сер}}$ . Знаючи  $k_{\varepsilon i}$  і  $k_{\varepsilon \text{сер}}$  запишемо рівняння (6) перед другою ітерацією для визначення часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) з урахуванням впливу зміцнення матеріалу штаби:

$$\text{або } \varepsilon_{\Sigma} = 1 - (1 - k_1 \varepsilon_{cp}) (1 - k_2 \varepsilon_{cp}) (1 - k_3 \varepsilon_{cp}) \times \dots \times (1 - k_n \varepsilon_{cp}), \quad (8)$$

$$\text{де } k_{\text{сеп}} = \frac{1 + k_{\varepsilon_1} + k_{\varepsilon_2} + k_{\varepsilon_3} + \dots + k_{\varepsilon_n}}{1 + n}; \quad (9)$$

$$k_i = \frac{k_{\text{сеп}}}{k_{\varepsilon_i}}; \quad (10)$$

1,2,3...n – порядкові номери робочих клітей стану (пропусків);  $k_{\varepsilon_1}, k_{\varepsilon_2}, k_{\varepsilon_3} \dots k_{\varepsilon_n}$  - значення коефіцієнта зміцнення матеріалу штаби у відповідній кліті (відповідному пропуску).

Для врахування впливу зміцнення матеріалу штаби на рівень відносних задніх  $q_0/\sigma_{T0}$  і передніх  $q_1/\sigma_{T1}$  натягів по клітям (пропускам) станів холодної штабової прокатки запропоновані наступні залежності [35,41]:

$$\frac{q_0}{\sigma_{T0}} = 1,15 k_q \left( \frac{1 + f}{1 + 5 \sqrt{\frac{h_0}{R}}} + \frac{1 + \varepsilon \varepsilon_{\Sigma}}{1 + \varepsilon} \right); \quad (11)$$

$$\frac{q_1}{\sigma_{T1}} = \frac{q_0}{\sigma_{T0}} \sqrt{1 - \left( \frac{q_0}{\sigma_{T0}} \right)^2}. \quad (12)$$

де  $k_q$  – коефіцієнт, що визначає можливий рівень відносного питомого натягу ( $k_q=0,05-0,20$ );  $q_0, q_1, \sigma_{T0}, \sigma_{T1}$  - абсолютні величини напруг натягу і границі текучості матеріалу штаби на вході і виході з осередку деформації відповідно, Н/мм<sup>2</sup>;  $f$  - коефіцієнт тертя;  $R, h_0$  - радіус робочого валка і товщина штаби на виході з осередку деформації у відповідній кліті (відповідному пропуску), мм;  $\varepsilon, \varepsilon_{\Sigma}$  - частковий і сумарний відносний обтиск штаби у відповідній кліті (відповідному пропуску), частки одиниці.

Значення відносних натягів, що обчислені за цими формулами при  $k_q=\text{const}$  не можуть перевищувати 0,45-0,50, причому  $q_0/\sigma_{T0}$  завжди більше  $q_1/\sigma_{T1}$ , і згідно з даними роботи [31] повинні задовольняти умові

$$0,17 < \frac{q}{\sigma_T} < 0,49. \quad (13)$$

Визначення параметрів  $\varepsilon$  і  $q/\sigma_T$  з урахуванням зміцнення матеріалу штаби при холодній прокатці за формулами (2)-(12) є невід'ємним елементом методики розрахунку режимів деформації на штабових станах холодної прокатки і здійснюється в ході реалізації єдиного алгоритму, що передбачає використання ітераційних процедур для обчислення технологічних параметрів із заданою точністю [35]. Розраховані за запропонованою методикою значення часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) зменшуються, а відносні натяги зростають у міру зменшення товщини штаби, що прокатують.

3. Розподіл сили прокатки по клітям (пропускам)

Розрахунки показали, що спадаючий характер розподілу часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) при розробці режимів деформації на штабових станах холодної прокатки забезпечує

більш раціональне використання можливостей технологічного обладнання і створює більш сприятливі умови для реалізації критеріїв оптимізації, особливо на двохклітьових реверсивних станах. Як вже зазначалося вище силові умови прокатки на двохклітьових реверсивних станах змінюються істотно після кожного пропуску і це негативно впливає на точність і стабільність геометричних розмірів штаб, що прокатують. Тому для стабілізації профілю активної твірної робочих валків [8,18,19] процес прокатки на цих станах доцільно здійснювати з постійною силою, що діє на натискні гвинти  $P_{\text{нв}}$  в кожній кліті в кожному пропуску:

$$P_{\text{нв}} = \text{const} \quad (14)$$

Повною мірою це відноситься і до одноклітьових реверсивних станів. При прокатці на безперервних станах кожна штаба обтискається тільки один раз в кожній кліті, що забезпечує більш високу стабільність силових умов деформації в лінії стану, хоча дотримання умови (14) і тут необхідно [28]. У зв'язку з цим цікаво відзначити, що режими деформації на багатьох промислових безперервних станах холодної прокатки також здійснюються практично з постійною силою по клітям [28,36].

Розробка режимів деформації на штабових станах холодної прокатки з використанням критерію (14) доцільна не тільки з метою підвищення стабільності технологічних параметрів, а і точності штаб. В роботі [41] розрахунковим шляхом показано, що ведення процесу холодної прокатки з постійною силою на проєктованому двохклітьовому реверсивному стані 1700 дозволяє зменшити витрату електричної енергії на 2,0-6,0%.

**НАЙМЕНША ТОВЩИНА ШТАБИ, ЩО ПРОКАТУЄТЬСЯ.** В даний час теоретично встановлено і експериментально підтверджено, що при певному співвідношенні абсолютних величин товщини, ширини і механічних властивостей штаби, радіуса, довжини бочки і пружних властивостей матеріалу робочих валків, коефіцієнта тертя, відносних натягів і модуля жорсткості робочої кліті створюються і реалізуються умови, коли відносний обтиск штаби при холодній прокатці зменшується або практично припиняється, хоча сила діюча на натискні гвинти велика [9,19,23,26]. Ці умови визначають граничну або найменшу товщину штаби, яка може бути прокатана на конкретному стані  $h_{1\text{нм}}$  [9,18,23,25,42]. Раніше цю товщину дослідники називали «мінімальною товщиною штаби, що прокатують  $h_{1\text{мін}}$ » і помилково вважали, що вона визначається тільки радіальним пружним стисненням («сплющенням») робочих валків [23,25,42]. Насправді найменша товщина штаби, що прокатують  $h_{1\text{нм}}$  визначається особливостями силової взаємо-



дії тонкої штаби з валковим вузлом і з робочої кліткою в цілому або параметрами початкової настройки робочої клітки [9,43]. При холодній прокатці тонких штаб шириною 1000 мм на промислових станах сила, що діє на натискні гвинти  $P_{нв}$  досягає 10-20 МН. Беручи до уваги, що модуль жорсткості робочих клітей станів холодної штабової прокатки знаходиться в діапазоні 4,5-7,0 МН/мм [4,9,17,18,25,42] пружні деформації  $\delta_{кл}$  останніх при зазначених вище значеннях сили  $P_{нв}$  складають 1,5-4,5 мм. Тому процес холодної прокатки вузьких штаб товщиною менше 1,5-4,5 мм на промислових станах здійснюється практично завжди в умовах, коли валки до початку прокатки знаходяться в «забої», тобто притиснуті силою  $P_{пр}$  [4,9,43]. Крім того, під час прокатки тонких і особливо тонких відносно вузьких штаб, тобто при  $b/L < 0,75-0,80$  (де  $b, L$  - ширина штаби і довжина бочки робочих валків), сумарна стріла прогину активної твірної робочих валків  $2\delta_{ао}$  [18,19] зазвичай перевищує товщину штаби на виході з осередку деформації  $h_1$  ( $2\delta_{ао} \geq h_1$ ) і зазор  $\delta_{1к}$  поблизу торців їх бочок набуває від'ємних значень ( $\delta_{1к} < 0$ ). Це означає, що кінцеві ділянки бочок робочих валків, кожен довжиною 0,5 (L-b), в процесі прокатки знаходяться в «забої», тобто притиснуті силою  $P_3$ . Тому рівняння для визначення сили  $P_{нв}$ , що діє на натискні гвинти в процесі прокатки записується у вигляді [9,43]:

$$P_{нв} = P_c + P_3 \quad (15)$$

Сила прокатки  $P_c$  є технологічним параметром і її значення розраховується за відомим теоретичним рішенням [44] і методикам [35]. Значення сил  $P_3$  і  $P_{пр}$ , які є параметрами початкової настройки робочої клітки при холодній прокатці тонких і особливо тонких штаб знаходять в результаті рішення системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{P_c + P_3 - P_{пр}}{M_{кл}} \\ P_c &= \varphi(h_1) \\ P_3 &= \varphi(h_1) \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Основні проблеми при вирішенні системи (16) пов'язані з визначенням функцій  $P_c = \varphi(h_1)$  і  $P_3 = \varphi(h_1)$ . Шляхи і можливості визначення цих функцій розглянуті в літературі [4,9,17-19,42,43].

На рис. 4 представлено графічне рішення системи (16) для випадків прокатки, коли процес здійснюється з «забоєм» кінцевих ділянок робочих валків (суцільні лінії 1 і 2) і без нього ( $P_3 = 0$ ), що характерно для умов холодної прокатки тонких і особливо тонких штаб ( $s_{1к} < 0$ ), наприклад, при  $b \approx L$  (штрихові лінії 1' і 2'). З рис. 4 випливає, що коли кінцеві ділянки робочих валків знаходяться в «забої» в процесі прокатки (суцільні лінії 1 і 2) отримання необхідної товщини штаби  $h_1$  досягається при більш високих значеннях сили  $P_{пр}$  або більшої величини негативного зазору між валками до прокатки. Різниця ординат кривих 2 і 2' при  $h = h_1$  чисе-

льно дорівнює силі забою кінцевих ділянок робочих валків в процесі прокатки  $P_3$ . Таким чином, облік впливу сили  $P_3$  при початковій настройці робочої клітки зводиться до збільшення сили попереднього притиснення валків з  $P'_{пр}$  до  $P_{пр}$  або до збільшення негативного зазору між ними з  $s'_0$  до  $s_0$ .

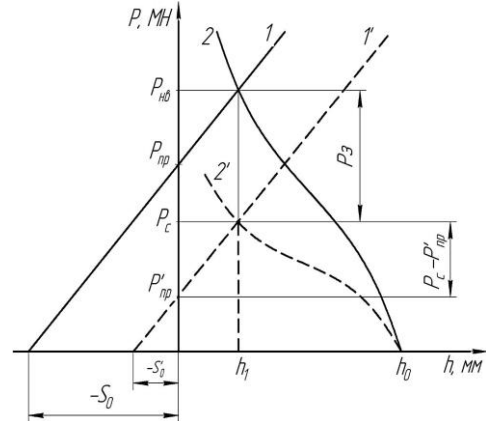


Рисунок 4 – Графічне рішення системи рівнянь при силевій взаємодії кінцевих ділянок робочих валків в процесі прокатки (початкової настройки клітки) 1, 1' – рівняння пружної лінії клітки; 2 –  $P_{нв} = \varphi(h_1)$ ; 2' –  $P_c = \varphi(h_1)$ ;  $h_0$  – товщина штаби до прокатки.

Система рівнянь (16) відображає особливості навантаження валкового вузла і настройки робочої клітки при холодній прокатці тонких і особливо тонких штаб, що дозволяє використовувати її також для визначення найменшої товщини штаби  $h_{1нм}$ , яка може бути прокатана на конкретному стані з «найбільшим» обтиском [9, 43]. З цієї метою скористалися першим рівнянням цієї системи записавши його у вигляді:

$$h_{1нм} = \frac{P_c + P_3 - P_{пр}}{M_{кл}} = \delta_{клс} + \delta_{клз} - \delta_{клпр}, \quad (17)$$

де  $\delta_{клс}$ ,  $\delta_{клз}$ ,  $\delta_{клпр}$  – пружні деформації робочої клітки, викликані силами прокатки  $P_c$ , забою кінцевих ділянок робочих валків  $P_3$  і попереднього притиснення валків  $P_{пр}$  відповідно.

З рівняння (17) видно, що найменша товщина штаби  $h_{1нм}$ , яка може бути прокатана на конкретному стані дорівнює алгебраїчній сумі пружних деформацій всієї робочої клітки, викликаних силами  $P_c$ ,  $P_3$  і  $P_{пр}$ , а не тільки сумарною деформацією радіального пружного стиснення робочих валків, як помилково вважали дослідники раніше [23,25,42]. Тут доречно зазначити, що при холодній прокатці тонких і особливо тонких штаб більша частина пружною деформації робочої клітки вибирається силою попереднього притиснення валків  $P_{пр}$  і це відбувається до початку процесу прокатки. Беручи до уваги (15) і враховуючи, що сила  $P_{нв}$ , діюча на натискні гвинти повинна задовольняти умові  $P_{нв} \leq [P]$  (де  $[P]$  - допустиме значення сили  $P_{нв}$  по міцності валків) [26,42] рівняння (17) постало в вигляді:

$$h_{1\text{нм}} = \frac{P_{\text{нв}} - P_{\text{пр}}}{M_{\text{кл}}} \geq \frac{[P] - P_{\text{пр}}}{M_{\text{кл}}}. \quad (18)$$

Аналіз останнього рівняння показує, що найменша товщина штаби  $h_{1\text{нм}}$ , яка може бути прокатана на конкретному стані, визначається різницею сил ( $P_{\text{нв}} - P_{\text{пр}}$ ) і модулем жорсткості робочої кліти  $M_{\text{кл}}$ , тобто технологічними обмеженнями. Очевидно, що чим менше різниця ( $P_{\text{нв}} - P_{\text{пр}}$ ), тим менше товщина штаби  $h_{1\text{нм}}$ , яка може бути прокатана на даному стані. Але це можливо тільки при високому і сумірному рівні сил  $P_{\text{нв}}$  і  $P_{\text{пр}}$  і підтверджує добре відомий з практики факт, що холодна прокатка тонких і особливо тонких штаб реалізується з «великими силами і малими крутячими моментами». Результати дослідження за визначенням найменшої товщини штаби  $h_{1\text{нм}}$ , що можливо прокатати актуальні і спрямовані на розширення сортаменту штабових станів холодної прокатки в сторону зменшення товщини продукції, що випускається. Параметри  $M_{\text{кл}}$ ,  $P_{\text{нв}}$  і  $P_{\text{пр}}$  входять в рівняння (18) можуть бути визначені розрахунковим шляхом, а на сучасних штабових станах холодної прокатки безперервно вимірюються і реєструються, що дозволяє прогнозувати і управляти товщиною штаби  $h_{1\text{нм}}$ , або будь-якою іншою малою товщиною штаби  $h_1$ .

## ВИСНОВКИ

1. Дан аналіз стану виробництва і споживання плоского холоднокатаного сталевих прокату в світі. Показано, що до створення ливарно-прокатних агрегатів (ЛПА) практично весь плоский сталевий прокат товщиною менше 2,0-2,5 мм виробляли тільки холодною прокаткою. Після освоєння масового виробництва тонкого гарячекатаного прокату задовільної якості, товщини 1,2-1,5 мм аж до 0,9-1,0 мм, стали успішно застосовувати замість холоднокатаного аналогічної товщини, в сегменті споживання плоского холоднокатаного прокату і в сортаменті штабових станів холодної прокатки відбулися істотні зміни. Однак, незважаючи на переваги гарячекатаного прокату сучасний рівень технології гарячої штабової прокатки не дозволяє розглядати тонкий гарячекатаний прокат як альтернативу тонкому холоднокатаного прокату. Тому викликані зміни в сортаменті штабових станів холодної прокатки після освоєння на ЛПА виробництва тонкого гарячекатаного сталевих прокату потребують критичного аналізу та осмислення з метою встановлення тенденцій подальшого розвитку технології і обладнання для ефективного виробництва тонкого сталевих холоднокатаного прокату високої якості.

2. За статичними даними і експертними оцінками сумарне виробництво плоского сталевих холоднокатаного прокату загального призначення (120-122 млн. т. на рік) і жерсті (16,5-17,5 млн. т. в рік) в світі в даний час оцінюється на рівні 136,5-139,5 млн. т. на рік, що становить понад 10% від усієї прокатної продукції, що випускається в світі. Встановлена чітка тенденція зменшення товщини

сталевих холоднокатаного прокату загального призначення і жерсті одинарної прокатки і визначені кращі значення товщин цих видів продукції, які складають відповідно: менш 0,8-1,2 мм аж до 0,35 мм і 0,14-0,18 мм. Найбільш затребуваним по ширині є холоднокатаний прокат загального призначення шириною 1000-1400 мм і жерсть шириною 865-1120 мм, для виробництва яких використовують стани з довжиною бочки валків відповідно 1400-1700 мм і 1200-1400 мм. Попит на холоднокатаний прокат шириною понад 1700 мм становить 2%. Частка холоднокатаного прокату з високоміцних сталей з границею текучості 1000-1500 Н/мм<sup>2</sup> для автомобілебудування зростає і перевищує 60%.

3. Виконано порівняльний аналіз технології холодної штабової прокатки, яка реалізується в безперервному і реверсивному режимах роботи станів. Технологія безперервної прокатки забезпечує максимальну продуктивність і високу якість продукції, що робить її застосування кращим практично завжди, особливо при великих обсягах виробництва і вузькому сортаменті продукції, що випускається. Технологія реверсивної прокатки реалізована на одноклітьових станах відрізняється більшою гнучкістю і її застосування доцільно для випуску широкого асортименту продукції в невеликих обсягах. Розглянуто особливості, можливості і переваги технології холодної штабової прокатки на двохклітьових реверсивних станах, створених приблизно двадцять років тому і відзначено їх широке поширення.

4. Виконано аналіз сортаменту і складу устаткування 50 безперервних станів холодної прокатки (БСХП), побудованих в світі з 1982 по 2017 р.р. Встановлено, що 70% з них призначені для прокатки вуглецевих сталей, в тому числі високоміцних, 16% для прокатки жерсті, 8% для прокатки нержавіючих сталей і 6% для прокатки кременистих сталей. Таким чином 86% з новозбудованих БСХП призначені для прокатки вуглецевих сталей і жерсті. За кількістю робочих клітей всі 50 БСХП розподілилися так: шестиклітьові – 3 або 6 %, п'ятиклітьові – 39 (78%), чотирьохклітьові – 8 (16%). Після 2000 року чотирьох- і шестиклітьові БСХП не будувалися.

5. Встановлено, що основними агрегатами для виробництва тонкого сталевих холоднокатаного прокату і жерсті є п'ятиклітьові безперервні і двохклітьові реверсивні стани. Сучасні п'ятиклітьові безперервні стани працюють за принципом «штаби нескінченної довжини» і в більшості випадків поєднані з безперервно-травільними агрегатами (БТА). Вони розраховані на максимальну швидкість прокатки до 25-28 м/с і більше і призначені для випуску продукції у великих обсягах: жерсті і тонких штаб - до 0,40-0,75 млн. т. на рік; холоднокатаного прокату широкого сортаменту - до 1,0-2,3 млн. т. на рік. Двохклітьові реверсивні стани розраховані на максимальну швидкість прокатки 22,5 м/с і призначені для випуску жерсті і тонких штаб

широкого сортаменту в обсягах від 0,2-0,4 млн. т. на рік до 0,5-1,0 млн. т. в рік. Одноклітьові реверсивні стани розраховані на швидкість прокатки до 10-15 м/с і призначені для випуску продукції широкого сортаменту в обсягах до 0,05-0,3 млн. т. на рік. Переважна більшість станів холодної прокатки оснащено чотирьохвалковими клітьями системи SVC-4 з діаметром робочих валків 400-500 мм. При прокатці тонкої жерсті і тонких штаб робочі кліті одно- і двохклітьових реверсивних станів і останні одна-дві кліті безперервних станів виконують шестивалковими системи SVC-6 з діаметром робочих валків 200-300 мм.

6. Запропоновано і реалізовано додаткові технологічні обмеження і критерії при розробці режимів деформації на штабових станах холодної прокатки, спрямовані на розширення їх сортаменту в сторону менших товщин:

– методика визначення товщини і рекомендований ряд товщини тонкого (1,5-1,8 мм) горячекатаного підкату для виробництва тонкої жерсті одинарної прокатки і тонких штаб високої якості;

– методика розрахунку і характеру розподілу часткових відносних обтисків по клітям (пропускам) стану;

– методика визначення найменшої товщини штаби, що прокатуються на конкретному стані, яка враховує вплив жорсткості робочої кліті і особливостей силового навантаження валкового вузла зі зменшенням товщини і ширини штаби.

7. Використання наведених в даній роботі матеріалів дозволяє при заданому сортаменті і необхідному обсязі випуску тонкого сталевого холоднокатаного прокату або жерсті, вибрати і обґрунтувати оптимальний варіант технології холодної штабової прокатки, а також розробити раціональні режими деформації, що забезпечують реалізацію процесу холодної прокатки з максимальною ефективністю. В результаті врахування особливостей силової взаємодії тонкої штаби з валками при холодній прокатці і жорсткості робочих клітей стану підвищується точність і надійність визначення параметрів початкової настройки останніх, що відкриває додаткові можливості для розширення сортаменту станів холодної прокатки в сторону менших товщин.

#### Бібліографічний опис

1. Аналитический бюллетень / Металлургия: Тенденции и прогнозы. РИАРЕЙТИНГ, 2017, С 2-35. ([www.riarating.ru](http://www.riarating.ru))
2. Прогноз развития мировой металлургической отрасли на 2016-2017 г.г.. Бюллетень «Черная металлургия», №12, 2016, С 7-8. Реферат Н. Г. Зиновьева.
3. Антипин В.Г. Черная металлургия США / В.Г. Антипин, Н.Г. Зиновьев, А.М. Овчинников // Черная металлургия: Бюл. Ин-та «Черметинформация», 2014, №2 (1370), С. 3-21.
4. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я.Д. Василев, М. М. Сафьян. – Киев: Вища школа, 1976. – 192 с.
5. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное пособие в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М.: «Теплотехник», 2008. – 640 с.
6. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное пособие в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М.: «Теплотехник», 2008. – 608 с.
7. Беляковский М.А., Мазур В.Л., Мелешко В.И. Производство автомобильного листа / М.А. Беляковский, В.Л. Мазур, В.И. Мелешко. – М.: Металлургия. 1979. – 256 с.
8. Коцарь С. Л. Технология листопрокатного производства / С. Л. Коцарь, А. Д. Белянский, Ю. А. Мухин. – М.: Металлургия, 1997. – 272 с.
9. Василев Я. Д. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос / Я. Д. Василев, А. В. Дементенко // Непрерывная прокатка: Коллект. Монография. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – С. 137-293.
10. Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках / О.В. Федонин, С.Я. Унру, М.В. Немкин [и др.] // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 9-16.
11. Холодная прокатка и отделка жести / А. Ф. Пименов, О. Н. Сосковец, А. И. Трайно [и др.] – М.: Металлургия, 1990. – 208 с.
12. Василев Я. Д. Производство жести методом двойной прокатки / Я. Д. Василев, А. В. Дементенко, С. Г. Горбунков. – М.: Металлургия, 1994. – 125 с.
13. Василев Я.Д. Тенденции развития производства и потребления жести в мире / Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш, Р.А. Замогильный // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация» – 2017. № 5. – С. 61-67.
14. Василев Я. Д. Современные комплексы для производства тонких и сверхтонких горячекатаных полос / Я. Д. Василев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №5. – С. 34-40.
15. Василев Я.Д. К определению рациональной толщины горячекатаного подката для производства тонкой жести методом одинарной прокатки / Я.Д. Василев, Р.А. Замогильный, Д.Н. Самокиш // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация» – 2016. № 12. С. 56-61.
16. Василев Я.Д. Определение размерного ряда толщин горячекатаного подката для производства тонкой жести методом одинарной прокатки / Я. Д. Василев, Р.О. Замогильный, Д.Д. Згуровец // Матеріали конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» 21 - 24 листопада 2017 р., м. Відень, Австрія (У 2-х томах) ТОМ 2 С. 186-191.
17. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Классен. – Изд-во «Металлургия», 1969. – 264 с.
18. Полухин П.И. Тонколистовая прокатка и служба валков / П.И. Полухин, Ю.Д. Железнов, В.П. Полухин – М.: Металлургия, 1967. – 388 с.

19. Полухин В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов / В. П. Полухин. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.
20. Cold Rolling Mills by SMS group – flexible plant concepts tailored to the demand of emerging markets. June, 2018, 22 p. ([http://seaisi.org/file/SSA-1%20SEAIISI\\_2018\\_CRM\\_V4%20-%20seto.pdf](http://seaisi.org/file/SSA-1%20SEAIISI_2018_CRM_V4%20-%20seto.pdf)).
21. Пелькинг Х. И. Новейшие технологии холодной прокатки / Х. И. Пелькинг // Труды III-го конгресса прокатчиков.: Липецк, 19-22 октября 1999 г. – М.: АО «Черметинформация», 2000. – С. 152-154.
22. Хекуэт Р. Новый двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки на металлургическом заводе фирмы «Heartland Steel». Черные металлы. – 2000, – сентябрь. – С. 84-88.
23. Белосевич В. К. Совершенствование процесса холодной прокатки / В. К. Белосевич, Н. П. Нетесов. – М.: Металлургия, 1971. – 272 с.
24. Гарбер Э. А. Производство проката: справочное издание. Т. I. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э. А. Гарбер. – М.: «Теплотехник», 2007. – 368 с.
25. Робертс В. Холодная прокатка стали / В. Робертс; Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с.
26. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я. Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
27. Разработка рациональных температурно-скоростных режимов прокатки тонкой жести / Я.Д. Василев, А.И. Якубовский, П.П. Чернов [и др.] // Сталь, 1990. – № 9. – С. 79-82.
28. Высокоточная прокатка тонких листов / Пименов А.Ф., Полухин В.П., Липухин Ю.В. и др. // Металлургия: М, 1988. 176 с.
29. Приходько И.Ю. Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control / И.Ю. Приходько, П.В. Крот, К.В. Соловьев [и др.] // Материалы Лондонской конференции «Вибрации в прокатных станах», г. Лондон. – 9 ноября 2006. – С. 87-106.
30. Приходько И.Ю. Средства компьютерного моделирования и системы управления процессами тонколистовой прокатки ИЧМ. Пластическая деформация металлов: Коллективная монография / И.Ю. Приходько. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014, С. 142-149.
31. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л. А. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1988. – 304 с.
32. Виткин А.И. Основы теории и технологии производства белой жести / А.И. Виткин, Д.П. Галкин, Б.И. Берлин. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
33. Тимошенко Э.В. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке / Э.В. Тимошенко, А.А. Самецкий. – К.: НПК «КИА», 1999. – 364 с.
34. Химич Г.Л. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ / Г.Л. Химич, М.Б. Цалюк. – М.: Металлургия, 1973. – 256 с.
35. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев, Д. Н. Самокиш, А. В. Дементенко, М. И. Завгородний // Бюллетень «Черная металлургия». – 2014. – №1. – С. 50-58.
36. Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев, Д. Н. Самокиш, А. В. Дементенко, М. И. Завгородний // Бюллетень «Черная металлургия». – 2014. – №2. – С. 65-73.
37. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник. 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 650 с.
38. Прокатка автолистовой стали /Ф.А. Ксензук, Н.А. Трощенко, А.П. Чекмарев, М.М. Сафьян. – М.: Металлургия, 1969. – 296 с.
39. Василев Я.Д. Исследование взаимосвязи толщины, температуры конца прокатки и предела текучести горячекатаного подката из стали 08кп // Сталь. – 2016. – №12. – С. 34-39.
40. Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки / А.В. Третьяков. – М. Металлургия, 1966 г. – 255 с.
41. Василев Я. Д. Разработка энергосберегающих режимов деформации на новом двухклетевом реверсивном стане холодной прокатки 1700 для комбината «Запорожсталь» / Я. Д. Василев, Д. Н. Самокиш, Р. А. Замогильный // Металл и литье Украины. – 2013. – №7(242). – С. 8-13.
42. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. Изд. 2-е перераб. и доп.-М.: Металлургия, 1985.- 376 с.
43. Василев Я.Д. Влияние особенностей контактного взаимодействия тонкой полосы с валками на параметры начальной настройки рабочей клетки и наименьшую толщину прокатываемой полосы / Я.Д. Василев, Р.А. Замогильный // «Металл и литье Украины» – 2019, № 3-4 (310-311), С. 1-7.
44. Василев Я. Д. Основы теории продольной холодной прокатки / Я. Д. Василев // Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 107-125.

#### References

1. Analiticheskiy byulleten / Metallurgiya: Tendentsii i prognozy. RIAREYTING, 2017, S 2-35. ([www.riarating.ru](http://www.riarating.ru))
2. Prognoz razvitiya mirovoy metallurgicheskoy otrasli na 2016-2017 g.g.. Byulleten «Chernaya metallurgiya», №12. – 2016. – S 7-8. Referat N.G. Zinovyeva.
3. Antipin V.G. Chernaya metallurgiya SShA / V.G. Antipin, N.G. Zinovyeve, A.M. Ovchinnikov // Chernaya metallurgiya: Byul. In-ta «Chermetinformatsiya», 2014. – №2 (1370). – S. 3-21.
4. Vasilev Ya. D. Proizvodstvo polosovoy i listovoy stali / Ya.D. Vasilev, M. M. Safian. – Kiyev: Vishcha shkola, 1976. – 192 s.
5. Konovalov Yu. V. Spravochnik prokatchika. Spravochnoye posobiye v 2-kh knigakh. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos / Yu. V. Konovalov. – М.: «Теплотехник», 2008. – 640 с.

6. Konovalov Yu. V. Spravochnik prokatchika. Spravochnoye posobiye v 2-kh knigakh. Kniga 2. Proizvodstvo kholodnokatanykh listov i polos / Yu. V. Konovalov. – M.: «Teplotekhnik», 2008. – 608 s.
7. Benyakovskiy M. A. Proizvodstvo avtomobilnogo lista / M. A. Benyakovskiy, V. L. Mazur, V. I. Meleshko. – M.: Metallurgiya, 1979. – 256 s.
8. Kotsar S. L. Tekhnologiya listoprokatnogo proizvodstva / S. L. Kotsar, A. D. Belyanskiy, Yu. A. Mukhin. – M.: Metallurgiya, 1997. – 272 s.
9. Vasilev Ya. D. Nepreryvnaya prokatka tonkikh i osobo tonkikh polos / Ya. D. Vasilev, A. V. Dementiyenko // Nepreryvnaya prokatka: Kollekt. Monografiya. – Dnipropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – S. 137-293.
10. Perspektivy razvitiya proizvodstva kholodnokatanogo prokata na mirovom i rossiyskom rynkakh / O.V. Fedonin, S.Ya. Unru, M.V. Nemkin [i dr.] // Metallurg. – 2011. – № 5. – S. 9-16.
11. Kholodnaya prokatka i otdelka zhesti / A. F. Pimenov, O. N. Soskovets, A. I. Trayno [i dr.] – M.: Metallurgiya, 1990. – 208 s.
12. Vasilev Ya. D. Proizvodstvo zhesti metodom dvoynoy prokatki / Ya. D. Vasilev, A. V. Dementiyenko, S. G. Gorbunkov. – M.: Metallurgiya, 1994. – 125 s.
13. Vasilev Ya. D. Tendentsii razvitiya proizvodstva i potrebleniya zhesti v mire / Ya. D. Vasilev, D. N. Samokish, R. A. Zamogilnyy // Chernaya metallurgiya: Byul. in-ta «Chermetinformatsiya» – 2017. № 5. – S. 61-67.
14. Vasilev Ya. D. Sovremennyye kompleksy dlya proizvodstva tonkikh i sverkh-tonkikh goryachekatanykh polos / Ya. D. Vasilev // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2002. – №5. – S. 34-40.
15. Vasilev Ya. D. K opredeleniyu ratsionalnoy tolshchiny goryachekatanogo podkata dlya proizvodstva tonkoy zhesti metodom odinarnoy prokatki / Ya. D. Vasilev, R. A. Zamogilnyy, D. N. Samokish // Chernaya metallurgiya: Byul. in-ta «Chermetinformatsiya» – 2016. – № 12. – S. 56-61.
16. Vasilev Ya. D. Opredeleniye razmernogo ryada tolshchin goryachekatanogo podkata dlya proizvodstva tonkoy zhesti metodom odinarnoy prokatki / Ya. D. Vasilev, R. O. Zamogilnyy, D. D. Zgurovets // Materialy konferentsii «Innovatsiyni tekhnologii v nauke ta osviti. Evropeyskiy dosvid» 21 - 24 listopada 2017 r.. m. Viden. Avstriya (U 2-kh tomakh) TOM 2 S. 186-191.
17. Povysheniye tochnosti listovogo prokata / I. M. Meyerovich, A. I. Gertsev, V. S. Gorelik, E. Ya. Klassen. – Izd-vo «Metallurgiya». 1969. – 264 s.
18. Polukhin P. I. Tonkolistovaya prokatka i sluzhba valkov / P. I. Polukhin, Yu. D. Zhelezov, V. P. Polukhin – M.: Metallurgiya. 1967. – 388 s.
19. Polukhin V. P. Matematicheskoye modelirovaniye i raschet na EVM listovykh prokatnykh stanov / V. P. Polukhin. – M.: Metallurgiya. 1972. – 512 s.
20. Cold Rolling Mills by SMS group – flexible plant concepts tailored to the demand of emerging markets. June. 2018. 22 p. ([http://seaisi.org/file/S5A-1%20SEAIIS\\_2018\\_CRM\\_V4%20-%20seto.pdf](http://seaisi.org/file/S5A-1%20SEAIIS_2018_CRM_V4%20-%20seto.pdf)).
21. Pelking Kh. Y. Noveyskiye tekhnologii kholodnoy prokatki / Kh. Y. Pelking // Trudy III-go kongressa prokatchikov.: Lipetsk. 19-22 oktyabrya 1999 g. – M.: AO «Chermetinformatsiya». 2000. – S. 152-154.
22. Khekuet R. Novyy dvukh-kletevyy reversivnyy stan kholodnoy prokatki na metallurgicheskom zavode firmy «Heartland Steel». Chernyye metally. – 2000. – Sentyabr. – S. 84-88.
23. Belosevich V. K. Sovershenstvovaniye protsessa kholodnoy prokatki / V. K. Belosevich, N. P. Netesov – M.: Metallurgiya. 1971. – 272 s.
24. Garber E. A. Proizvodstvo prokata: spravochnoye izdaniye. T. I. Proizvodstvo kholodnokatanykh polos i listov (Sortament. Teoriya. Tekhnologiya. Oborudovaniye) / E. A. Garber. – M.: «Teplotekhnik». 2007. – 368 s.
25. Roberts V. Kholodnaya prokatka stali / V. Roberts; Per. s angl. – M.: Metallurgiya. 1982. – 544 s.
26. Vasilev Ya. D. Inzhenernyye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoy prokatki / Ya. D. Vasilev. – M.: Metallurgiya. 1995. – 368 s.
27. Razrabotka ratsionalnykh temperaturno-skorostnykh rezhimov prokatki tonkoy zhesti / Ya. D. Vasilev, A. I. Yakubovskiy, P. P. Chernov [i dr.] // Stal. 1990. – № 9. – S. 79-82.
28. Vysokotochnaya prokatka tonkikh listov / A. F. Pimenov, V. P. Polukhin, Yu. V. Lipukhin i dr. // M.: Metallurgiya. 1988. – 176 s.
29. Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control / I. Yu. Prikhodko, P. V. Krot, K. V. Solovyev [i dr.] // Materialy Londonskoy konferentsii «Vibratsii v prokatnykh stanakh». g. London. – 9 noyabrya 2006. – S. 87-106.
30. Prikhodko I. Yu. Sredstva kompyuternogo modelirovaniya i sistemy upravleniya protsessami tonkolistovoy prokatki IChM. Plasticheskaya deformatsiya metallov: Kollektivnaya monografiya / I. Yu. Prikhodko. – Dnepropetrovsk: Aktsent PP. – 2014. – S. 142-149.
31. Kuznetsov L. A. Primeneniye UVM dlya optimizatsii tonkolistovoy prokatki / L. A. Kuznetsov. – M.: Metallurgiya. 1988. – 304 s.
32. Vitkin A. I. Osnovy teorii i tekhnologii proizvodstva beloy zhesti / A. I. Vitkin, D. P. Galkin, B. I. Berlin. – M.: Metallurgiya. 1978. – 392 s.
33. Timoshenko E. V. Sintez sistem upravleniya parametrami polos pri kholodnoy prokatke / E. V. Timoshenko, A. A. Sametskiy. – K.: NPK «KIA». 1999. – 364 s.
34. Khimich G. L. Optimizatsiya rezhimov kholodnoy prokatki na ETsVM / G. L. Khimich, M. B. Tsalyuk. – M.: Metallurgiya. 1973. – 256 s.
35. Edinaya metodika rascheta energosilovykh i temperaturno-skorostnykh parametrov protsessa kholodnoy polosovoy prokatki / Ya. D. Vasilev, D. N. Samokish, A. V. Dementiyenko, M. I. Zavgorodniy // Byulleten «Chernaya metallurgiya». – 2014. – №1. – S. 50-58.
36. Eksperimentalnaya proverka tochnosti i rabotosposobnosti edinoy metodiki rascheta energosilovykh i temperaturno-skorostnykh parametrov protsessa kholodnoy polosovoy prokatki / Ya. D. Vasilev, D. N. Samokish, A. V. Dementiyenko, M. I. Zavgorodniy // Byulleten «Chernaya metallurgiya». – 2014. – №2. – S. 65-73.

37. Gulyayev A.P. Metallovedeniye. Uchebnik. 5-e izd.. pererab. – M.: Metallurgiya. 1977. – 650 s.
38. Prokatka avtolistovoy stali / F. A. Ksenzuk, N. A. Troshchenkov, A. P. Chekmarev, M. M. Safian. – M.: Metallurgiya. 1969. – 296 s.
39. Vasilev Ya. D. Issledovaniye vzaimosvyazi tolshchiny. temperatury kontsa prokatki i predela tekuchesti goryachekatanogo podkata iz stali 08kp // Stal. – 2016. – №12. – S. 34-39.
40. Tretiakov A. V. Teoriya. raschet i issledovaniya stanov kholodnoy prokatki / A. V. Tretiakov – M. Metallurgiya. 1966. – 255 s.
41. Vasilev Ya. D. Razrabotka energosberegayushchikh rezhimov deformatsii na novom dvukhkletem reversivnom stane kholodnoy prokatki 1700 dlya kombinata "Zaporozhstal" / Ya. D. Vasilev, D. N. Samokish, R. A. Zamogilnyy // Metall i litye Ukrainy. – 2013. – №7(242). – S. 8-13.
42. Korolev A.A. Konstruktsiya i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov. Izd. 2-e pererab. i dop. – M.: Metallurgiya. 1985. – 376 s.
43. Vasilev Ya.D. Vliyaniye osobennostey kontaktного vzaimodeystviya tonkoy polosy s valkami na parametry nachalnoy nastroyki rabochey kleti i naimenshuyu tolshchinu prokatyvayemoy polosy / Ya. D. Vasilev, R.A. Zamogilnyy // «Metall i litye Ukrainy» – 2019. – № 3-4 (310-311). – S. 1-7.
44. Vasilev Ya. D. Osnovy teorii prodolnoy kholodnoy prokatki / Ya. D. Vasilev // Plasticheskaya deformatsiya metallov: Kollektivnaya monografiya. – Dnepropetrovsk: Aktsent PP. 2014. – S. 107-125.

Стаття поступила 09.01.2019

### Вимоги щодо оформлення статей:

Структура:

УДК

Назва статті українською мовою (регістр як в реченні, не більш 15 слів без переносів)

Автори українською мовою (Прізвище, І.П не більш 6)

Назва статті англійською мовою (регістр як в реченні, не більш 15 слів без переносів)

Автори англійською мовою (Прізвище, І.П не більш 6)

Анотація українська: (200-400 слів), повинна містити:

Мета.

Методика.

Результати.

Наукова новизна.

Практична значущість.

Ключові слова:

Анотація на англійській мові: (200-400 слів) , повинна містити:

Purpose

Methodology

Findings

Originality

Practical value.

Keywords

Текст статті українською або англійською мовою:

Вступ

Аналіз літературних даних та постановка проблеми (обов'язково з аналізом джерел, які індексуються в науково метричних базах даних Scopus або Webofscience).

Мета і завдання досліджень

Матеріали та методи дослідження

Результати дослідження

Обговорення результатів.

Висновки

Бібліографічний опис згідно ДСТУ 8302:2015 (при наявності у матеріалів індексів DOI або індексування матеріалу в наукометричних базах обов'язково вказувати ці індекси)

References (переклад бібліографічного опису на англійську мову, або транслітерація його на англійську мову)

Відомості про авторів статті: (на кожного автора: ПІБ, науковий ступінь, місце роботи, ORCID, e-mail, телефон)

Стаття повинна бути оформлена в редакторі Word. Поля 20мм x 20 x 20. Шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал 1,5.

Формули повинні бути набрані в об'єкті Microsoft Education 3.0.

Рисунки повинні бути в складі тексту, обтікання виставлено в режим «в тексті», або включені у комірку таблиці з таким же режимом.