

На правах рукопису

НОГОВИЦІН Олексій Володимирович

УДК 621.771.23/24:681.5.015:002.2

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ВИРОБНИЦТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ НА ПІДСТАВІ
МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.03.05 “Процеси та машини обробки тиском”

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ

1997



Робота виконана в Інституті чорної металургії
Національної Академії наук України

Науковий керівник (консультант) _____

ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я та по-батькові

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Тарновський Валерій Йосипович

доктор технічних наук, професор Ніколаєв Віктор Олександрович

доктор технічних наук, професор Долженков Федір Єгорович

Провідна організація - наука, відомство, місто ДонНДІчермет, Донецьк,

Мінпром

Захист дисертації відбудеться "17" июня 1997 р.в 12³⁰ годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 03.11.01 при Державній металургійній академії України (320635, Дніпропетровськ, пр.Гагаріна, 4 ДМетАУ).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці академії.

Автореферат розісланий "16" мая 1997 р.

Факс (0562) 76-59-24

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук професор

М.М. САФ'ЯН

АВ 37784

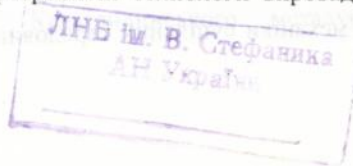
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність тематики дисертації. Розвиток промисловості, сільського господарства, будівництва та транспорту у багатьох випадках залежить від виробництва листового прокату з чорних металів. Розробка і вдосконалення технології одержання листової сталі підпорядковані вирішенню комплексного завдання - одержання прокату з мінімальними відхиленнями за розмірами, формою, механічними властивостями при максимальних обсягах виробництва.

Створення нових і удосконалення існуючих технологій на теперешній час повинно опиратися на надійний теоретичний фундамент і не може обмежуватися різноманітними напівемпіричними підходами, що побудовані на узагальненні виробничого досвіду. У зв'язку з цим розвиток теорії листової прокатки прямує до створення методів досить точного кількісного опису процесів, що відбуваються у металі при його деформації та після неї. Всебічне дослідження поведінки металу в зоні деформації і встановлення закономірностей, що пов'язують параметри якості штаби з режимами її деформації, вимагають створення нових теоретичних та нестандартних емпіричних підходів, що дають змогу вирішувати нові класи прикладних і наукових завдань металопрокатного виробництва, у тому числі, прогнозування структури та властивостей металу, дефектів суцільності прокату, розподілу деформації в перерізі прокатуваної штаби, а також визначення навантажень на прокатні валки та прокатувану штабу.

І нарешті, завжди важко визначити, які умови прокатування необхідно створити, щоб одержати очікувані параметри якості прокату.

Дисертація являє собою комплексне дослідження основних закономірностей взаємодії прокатних валків та штаби, що деформується, пластичної текучості металу у міжвалковому зазорі, еволюції структури прокатуваного металу. Робота має теоретичний характер, заснований на методі обчислювального експерименту. Вірогідність висновків базується на експериментальному підтвердженні прогнозних результатів, розроблені технології впроваджені у практику.



Мета і завдання досліджень. Розвиток теорії листової прокатки у роботі здійснюється шляхом вирішення слідуочих завдань:

1. Створення двомірної моделі зони деформації; дослідження методом обчислювального експерименту пластичної текучості металу при різноманітних критеріях геометричної, кінематичної і реологічної подібності.

2. Розвиток математичної моделі тонколистової прокатки і встановлення нових закономірностей впливу умов деформації на параметри процесу прокатування тонкої штаби ($\frac{h_1}{R} < 0,002$).

3. Розробка моделі і дослідження з її допомогою стаціонарних і не-стаціонарних процесів безперервного холодного прокатування штаби, у тому числі із зварними з'єднаннями.

4. Створення математичної моделі структурних і фазових перетворень у ферито-перлітних сталях при гарячому прокатуванні і дослідження на її підставі закономірностей формування механічних властивостей гарячекатаної штабової сталі.

Теоретична і практична цінність досліджень. Результати теоретичних досліджень дали змогу розробити новий метод аналізу взаємодії прокатних валків і штаби, який дозволяє підвищити точність обчислення енергосилових параметрів процесу прокатування, поглибити знання з питань пластичної текучості металу в зоні еформації і контактної взаємодії прокатуваного металу з валком; вивчити нестационарний процес прокатування зварюваних встик кінців штаби; визначити вплив технологічних параметрів гарячої прокатки на формування мікроструктури та механічних властивостей штабової сталі. В результаті виконання роботи створено пакет прикладних програм, що дали змогу аналізувати, досліджувати і проектувати (в широкому розумінні цього слова) процеси листового прокатування та здійснювати управління ними.

Наукова новизна. Вперше проведено комплексне дослідження основних параметрів процесу листового прокатування на підставі методів класичної механіки, механіки суцільних середовищ, динаміки механічних систем, реології

сталі в гарячому та холодному стані, структурних та фазових перетворень в сталі при циклічній деформації і безперервному охолодженні. Новизна наукових результатів полягає:

- у розробленому методі аналізу процесу прокатування в рухомій системі координат та в одержаних формулах для обчислення обертального моменту на валку;

- у встановленні закономірностей пластичної текучості металу в зоні деформації при площинній деформації;

- в уточненні методики аналізу контактної взаємодії прокатуваного металу з інструментом (валком);

- у вивченні нових закономірностей між факторами деформації та енергосиловими параметрами прокатування тонкої штаби і жерсті;

- в описуванні процесу і основних закономірностей прокатування штаби із зварними з'єднаннями різних геометричних розмірів при різноманітних технологічних режимах прокатування;

- в описанні еволюції структурних і фазових перетворень у вуглецевих і низьколегованих сталях при багатоцикловій деформації та безперервному охолодженні;

- у вивченні окремих закономірностей формування мікроструктури і механічних властивостей штабової сталі;

- у розробці технологічних режимів виробництва штаби на безперервних станах гарячої та холодної прокатки;

- у створенні дослідно-промислового зразка автоматизованої системи керування властивостями прокату на безперервних станах гарячої прокатки.

Впровадження наукових розробок. Автоматизована система управління властивостями гарячекатаної штаби пройшла дослідно-промислове випробування на стані 2000 АТ “Северсталь” (Череповецький меткомбінат); пропозиції і рекомендації до технології виробництва гарячекатаного підкату з низьковуглецевої сталі впроваджені на широкоштабових станах 1700 Маріупольського металургійного комбінату ім.Ілліча, Карагандинського металургійного

комбінату; технологічні режими холодного прокатування тонкої штаби впроваджені на чотирьохкільтьових станах 1700 МарМК, ім.Ілліча і АТ “Северсталь”, на п’ятикільтьових станах 1700 КарМК і АТ “Северсталь”; режими обтисків і натягу при прокатуванні жерсті впроваджені на п’ятикільтьовому стані 1200 Магнітогорського металургійного комбінату та на стані 1400 КарМК. Багато розробок може бути використано при реконструкції діючих і створенні нових листопрокатних станів. Комп’ютерні програми для обчислення параметрів пластичної текучості металу в зоні деформації (ОСНАГ), обчислення енергосилових параметрів прокатування штаби (СТАН), розрахунку структурних та фазових перетворень при багатоциклової гарячій деформації сталі та безперервному охолодженні (LAB, ПРОКАТ, ТКД, АУСТЕН) та інші, як автоматизоване робоче місце (АРМ), використовуються в ІЧМ НАНУ, а також передані на комбінати ім. Ілліча та АТ “Северсталь”.

Апробація дисертаційної роботи. Матеріали дисертації доповідалися на всесоюзних науково-технічних конференціях: “Теоретичні проблеми прокатного виробництва” - Дніпропетровськ, 1980, 1988 р.р., “Проблеми підвищення якості в основних переробах чорної металургії” - Дніпропетровськ, 1989 р., “Використання ЕОМ в наукових дослідженнях і розробках” - Дніпропетровськ, 1989 р., “Підвищення механічних і експлуатаційних властивостей сталей масового виробництва” - Москва, 1990 р., на Галузевій науково-технічній конференції “Підвищення якості листового прокату - основне завдання прокатників” - Липецьк, 1977 р., на Об’єднаному науковому семінарі кафедри ОМД ДМетІ (ДМетАУ) та в прокатних відділах ІЧМ - Дніпропетровськ, 1974-1997р.р.

Публікації. На тему дисертації опубліковано 1 монографію, 48 статей, 15 авторських свідоцтв на винаходи, 4 статті надруковані у зарубіжних виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, 12 глав, висновків та додатків, вміщує 458 сторінок тексту, 151 малюнок, 43 таблиці, 349 бібліографічних посилань.

Особистий внесок автора. Теоретичні дослідження, обчислювальні експерименти здійснені автором самостійно. Автор брав участь у підготовці,

проведенні та обробці даних усіх описаних в роботі експериментів; постановка більшості з них належить йому особисто; саме він провів аналіз та узагальнення результатів. Ряд даних отримано та опубліковано спільно з В.Л.Мазуром. Більшість публікацій, що належать авторським колективам, описують результати досліджень, здійснених під керівництвом та за участю автора дисертації.

Методологія та методика досліджень. В роботі використані сучасні методи математичного моделювання процесів, що відбуваються в деформованому металі. Робота здебільшого побудована на методології обчислювального експерименту, що включає етапи побудови математичної моделі, її адаптації, розробки алгоритму розрахунку, реалізації комп'ютерної програми, здійснення розрахунків. Вирішення досить складних математичних задач базується на сучасних обчислювальних методах, серед яких визначальне місце належить методу кінцевих різниць (МКР). Для проведення експериментальних досліджень використовувалася тензометрична та випробна апаратура, яка була сучасною для 70-80 років. Застосовані методи статистичної обробки результатів спостережень та експериментів. Результати розрахунків підтверджені подальшими дослідженнями інших авторів. Теоретичні висновки адекватні результатам експериментальних досліджень, що дає змогу вважати основні наслідки роботи обґрунтованими і вірогідними.

Автор захищає:

- метод і результати енергетичного аналізу процесу прокатування в рухомій системі координат;
- розв'язання двомірної задачі в'язко-пластичної текучості металу у міжвалковому зазорі, що базується на використанні методу кінцевих різниць та біциліндричної системи координат;
- встановлення закономірностей текучості металу в міжвалковому зазорі та контактної взаємодії металу з валком;
- метод розрахунку контактних напружень, зусилля прокатування та обертового моменту на валку при тонколистовому прокатуванні, який базується на розв'язанні пружно-пластичної задачі контактної взаємодії штаби та валка з

урахуванням сучасних реологічних моделей сталі в гарячому та холодному стані;

- закономірності, що установлені при дослідженнях процесу холодного прокатування тонкої штаби ($h_1/R < 0,002$) у клітках безперервних станів;

- математичну модель нестационарного процесу прокатування тонкої штаби із зварними з'єднаннями і, одержані на її основі, залежності навантажень в елементах прокатної кліті, привода та прокатуваної штаби;

- комп'ютерне моделювання структурних та фазових перетворень у сталі при нагріванні перед обробкою, деформації штаби в клітках безперервного стану гарячої прокатки, а також охолодженні на відповідних рольгангах і в рулоні;

- результати числового аналізу впливу режимів нагріву, прокатування і охолодження штаби на структуру та механічні властивості ферито-перлітних сталей;

- технологічні режими виробництва штаби на безперервних станах гарячої і холодної прокатки, що забезпечують стабільність процесу та якість прокату;

- концепції та комп'ютерні системи проектування технологій і управління технологічними процесами виробництва широкоштабової сталі.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ

Сучасне листопрокатне виробництво базується на досягненнях таких фундаментальних наук, як математика, фізика, хімія, опір матеріалів, теоретична механіка та прикладних дисциплін, як теорія прокатки, матеріалознавство, теплотехніка, прикладна механіка, обчислювальна техніка. Створення нових та удосконалення існуючих технологій у теперішній час має опиратися на надійний теоретичний фундамент і не може обмежуватися різноманітними напівемпіричними підходами, побудованими на узагальненні виробничого досвіду. У зв'язку з цим розвиток теорії листової прокатки іде у напрямку створення методів досить точного кількісного описання процесів, що відбуваються під час деформації металу у міжвалковому зазорі та після де-

формації. Всебічне дослідження поведінки металу в зоні деформації під час прокатування та встановлення закономірностей, що пов'язують параметри якості штаби з режимами деформації, можливе тільки при використанні методів механіки суцільних середовищ, які дозволяють провадити кількісні оцінки процесів, що здійснюються в металі під час прокатування.

В той же час значна кількість досягнень фундаментальних наук, перед усе фізичного металознавства, належним чином не використовується при розробці нових теоретичних та нестандартних емпіричних підходів, що дають змогу вирішувати нові питання прикладних та наукових завдань листопрокатного виробництва, у тому числі прогнозування структури та властивостей, дефектів суцільності листового прокату, а також напружено-деформаційного стану металу у міжвалковому зазорі і навантажень на прокатні валки.

Автор своєю метою поставив у певній мірі доповнити ці прогалини, опираючись у своїй роботі на труди відомих вчених-прокатників: Білосевича В.К., Бровмана М.Я., Біби Н.В., Воронцова В.К., Григоряна Г.Г., Грудєва А.П., Дружиніна Н.Н., Клименко П.Л., Ковальова С.И., Коновалова Ю.В., Кузнєцова Л.А., Поздєєва А.А., Полухіна В.П., Тарновського І.Я., Третьякова А.В., Цалюка М.Б., Целікова О.І., Чекмарьова О.П., вчених-механіків: Гуна Г.Я., Колмогорова В.Л., Непершина А.І., Смірнова - Аляєва Г.О., Шевченко К.Х.; вчених-металознавців: Бернштейна М.Л., Лізунова В.І., Потьомкіна В.К., Штремеля М.Я. та інших.

Виявлені в роботі закономірності досліджували з метою вдосконалення технології листової прокатки, причому ряд рішень і технологій одержані вперше у світовій практиці.

На протязі тривалого часу в дослідженні закономірностей листової прокатки автор співпрацював з В.Л.Мазуром, ряд даних було одержано та опубліковано у результаті спільної роботи.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЗОНИ ДЕФОРМАЦІЇ

Інверсія прокатування

Прокатка - це один з безперервних способів обробки металів тиском. В ньому, на відміну від інших процесів (волочиння, видавлювання) робочий інструмент - прокатні валки - здійснюють деформацію і подачу заготовки в зону деформації. Тобто, прокатування є суперпозицією двох процесів: переносного руху металу до валків та деформації його у міжвалковому зазорі. Математичним заходом, що дає змогу виконати аналіз складових частин процесу прокатування, є вибір відповідної інерційної системи відліку. Автор розглядає прокування у рухомій системі координат, яка переміщується у напрямку руху металу із швидкістю, що дорівнює окружній швидкості валка V_v . Абсолютна швидкість V_a матеріальної частки металу дорівнює сумі швидкостей рухомої системи координат V_v (переносна швидкість) та швидкості частки металу в рухомій системі координат V_m (відносна швидкість). У вибраній рухомій системі координат прокатні валки варто уявити як такі, що котяться без ковзання площинами які, в свою чергу, жорстко зв'язані з рухомою системою координат і проходять поверхнею прокатоної штаби. Точки дотику A і A^1 валків з поверхнями β і β^1 вважаються миттєвими центрами обертання контактних площин, тобто в кожен момент часу процес прокатування є аналогічним осадці металу між похилими плитами, які шарнірно закріплені у цих точках. Встановлена аналогія відрізняється від відомого аналогу прокатування з осадкою між плитами з плоскопаралельним рухом.

Енергетичний аналіз процесу деформації при прокатуванні, проведений у рухомій системі координат, дозволив визначити роботу, яка здійснюється поверхневими силами, що діють на метал в зоні деформації. Зокрема, одержані аналітичні залежності, що визначають внесок контактних напружень заднього та переднього натягу (підпору) штаби в роботу прокатування.

Показано, що обертальний момент на валку дорівнює моменту сил, що діють на валок (контактні напруження, реакція станин) відносно миттєвого центру обертання валків.

$$M_{кр} = 2BR^2 \int_0^\alpha \left[p_r \cos \frac{\varphi}{2} + \tau_v \sin \frac{\varphi}{2} \right] \sin \frac{\varphi}{2} d\varphi - \frac{T_1 - T_0}{2R} \quad (1)$$

Вираз (1) являє собою не тільки теоретичну новизну, але має також і практичне значення.

Звичайно обертальний момент на валку визначають як момент сил, що діють на валок, відносно центру валка O . У цьому випадку моменти реакцій станин та нормальних контактних напружень дорівнюють нулю і обертальний момент визначають тільки контактні дотичні напруження. Практичні обчислення за цим методом можуть призвести до суттєвих погрішностей, він дуже чутливий до незначних помилок в визначенні нейтрального перерізу в зоні деформації та сил зовнішнього тертя. Формула (1) уникла цього недоліку, основною ваговою часткою в ній є контактні нормальні напруги, в той час як частка дотичних напружень, наприклад, для випадків холодного прокатування штаби, на 3-4 порядку менша.

Рішення плоскої задачі пластичної текучості металу в зоні деформації (ЗД)

Гаряче прокатування листової заготовки (слябу) і товстого листа відрізняється нерівномірністю деформації за товщиною. Плоска текучість нестисливого середовища в декартових координатах x, y визначається трьома компонентами тензора напружень $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ та двома компонентами вектора швидкості v_x, v_y , які задовольняють умовам рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

та нестисливості

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Метал, деформований при гарячому прокатуванні найбільш яскраво відображає в'язко-пластичні властивості. Тому для замикання системи рівнянь відносно п'яти невідомих ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, v_x, v_y$) використаємо рівняння реології в'язко-пластичного середовища:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -p + \left(\mu + \frac{K}{H}\right) \dot{\epsilon}_x, \\ \sigma_y &= -p + \left(\mu + \frac{K}{H}\right) \dot{\epsilon}_y, \\ \tau_{xy} &= \left(\mu + \frac{K}{H}\right) \dot{\gamma}_{xy},\end{aligned}\quad (4)$$

де $p = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2}$ - гідростатичний тиск; μ - динамічна в'язкість; K - опір чистому зсуву; H - інтенсивність швидкості деформації; $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\gamma}_{xy}$ - тензор швидкості деформації.

Система п'яти рівнянь (2) - (4) приведена до системи двох кінематичних рівнянь відносно функції текучості ψ та напруженості вихору ω :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2\omega = 0; \quad \frac{\partial^2 (\mu' \omega)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\mu' \omega)}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

$$\text{де } \mu' = \mu + \frac{K}{H}; \quad \omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right); \quad V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V_y = \frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Перехід від системи рівнянь (2)-(4) до системи (5) дає ряд суттєвих переваг при розв'язанні задачі визначення параметрів плоскої текучості; зменшення розмірності системи рівнянь; перехід до задачі з кінематичними граничними умовами, які у випадку прокатування задавати значно легше, ніж силові; можливість використання для розв'язання крайової задачі добре розроблених методів обчислювальної гідродинаміки.

Подальший розвиток методу розв'язання задачі пов'язаний з використанням біциліндричної системи координат, в якій прокатувальні валки вписуються в координатні лінії $(-\eta, +\eta)$. Тому досліджувана зона деформації вписується в просту ортогональну область: $(-\pi < \xi < \pi; -\eta_0 \leq \eta \leq \eta_0)$. Використання біциліндричної системи координат для дослідження прокатування настільки органічне, що дозволяє описати геометричну подібність 3Д одним безрозмірним критерієм подібності $\frac{\xi_0 + \pi}{2\eta_0}$ на відміну від двох $(\frac{h_0}{R}, \epsilon, \alpha)$ при викори-

станні декартової системи координат. Деякі переваги біциліндрична система координат дає і при встановленні граничних умов.

Складність проблеми заданості граничної умови на лінії контакту полягає у тому, що заздалегідь невідомі положення і протяжність зони прилипання та положення нейтрального кінематичного перерізу. Тому граничні умови уточнювалися в процесі розв'язання задачі. Для цього запропоновано метод, згідно з яким вважали, що ковзання металу по контактній поверхні настає тоді, коли дотичні напруження досягають величини, яка дорівнює опору деформації зсуву в приконтактному шарі :

$$\tau_{\xi\eta}|_{\eta_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)|_{\eta_0} \quad (6)$$

Одночасно на ділянці контакту, де ця умова не виконується, піддали перевірку умову настання ковзання:

$$\tau_{\xi\eta}|_{\eta_0} < f_n \sigma_n \quad (7)$$

де f_n - коефіцієнт зовнішнього тертя спокою в ЗД.

Якщо умова (7) була порушена, то мало місце ковзання.

Систему рівнянь (5) розв'язали методом кінцевих різниць (МКР).

Вибрано найбільш простий алгоритм розв'язання різницевої задачі - явна схема, для якої були виконані умови стійкості і збіжності. В основу алгоритму покладено метод розв'язання стаціонарної задачі - метод установлювання. Сутність його у тому, що досліджуваний зрівноважений стан розглядають як результат установлення процесу, що розгортається у часі. Для розв'язання системи різницевих рівнянь використали ітераційний метод Зейделя. Маючи розмір сітки 20×20 і точність рішення 0,01, кількість ітерацій обліку одного варіанту із заданими граничними кінематичними умовами не перевищує 100 ітерацій.

Дослідження впливу геометричних та граничних факторів на текучість металу у зоні деформації (ЗД)

Вплив геометричного фактору. Пластичну текучість металу досліджували при різноманітних значеннях параметру l/h_{cp} . Характерною особливістю прокатування високої штаби ($l/h_{cp} < 1$) при двомірній деформації мета-

лу є перевищення швидкості текучості центральних і контактних шарів у вхідній зоні деформації над середньою, визначеною за умов рівномірної деформації. Однак, на більшій частині ЗД центральні шари металу відстають від середньої швидкості деформації, а приконтактні - випереджають її. При цьому екстремум епюри \bar{v}_ξ просуванням до виходу ЗД переміщується у напрямку до центру на 1/4 товщини штаби. Характерним для прокатування високої штаби є наявність зони зворотньої текучості металу, яка знаходиться у приконтактному шарі вхідної ділянки ЗД. Із збільшенням параметру $1/h_{cp}$ розподіл \bar{v}_ξ за високою ЗД стає все більш рівномірним. Аналіз епюр деформації показує, що пластична деформація центральних та приконтактних шарів металу при прокатуванні високої штаби починається ще до геометричної межі ЗД. Контактні шари у вхідному перерізі внаслідок наявності назадньої текучості зазнають деформації стискування. При досягненні приконтактним шаром зони прилипання зростання деформації різко зменшується. Центральні шари при цьому починають швидко подовжуватися.

Вплив кінематичних граничних умов. Оцінили вплив довжини зони прилипання на напружено-деформаційний стан (НДС) в ЗД. Показано, що у випадку прокатування високої штаби ($1/h_{cp} < 1$) зростання довжини зони прилипання від 20 до 90% довжини дуги контакту не спричиняє помітного змінювання НДС. При $1/h_{cp} > 3,0$ зростання довжини зони прилипання починає суттєво позначатися на величинах напружень. Так, наприклад, збільшення довжини зони прилипання з 10 до 40% у випадку $1/h_{cp} = 6,6$ приводить до зростання напружень стиску у 6 разів.

Довжина зони прилипання визначається співвідношенням сил внутрішнього та зовнішнього тертя. Для в'язко-пластичного середовища принциповий характер впливу на кінематику та динаміку текучості має швидкість прокатування, так як із зміною швидкості деформації, змінюється співвідношення в'язкої і пластичної складових, що характеризуються числом Сен-Венан. При зростанні швидкості прокатування більш значною стає роль в'язкої компоненти, переважне змінювання дотичних напружень порівняно з нормальними

приводить до скорочення довжини зони прилипання. Розрахунки показали, що зростання швидкості прокатування високої штаби призводить до зменшення випередження, а при $l/h_{cp} > 0,9$ - до збільшення випередження. Закономірності зміни положення та розмірів зони прилипання на дузі захвату мають практичне значення при дослідженні нестационарних процесів безперервної (зв'язаної) прокатки. Так, виродження (зникнення) зони прилипання призводить до проковзання валка на поверхні металу, що може в свою чергу привести до створення дефектів на ній і поломки обладнання прокатного стану.

Контактна взаємодія металу з прокатними валками. У процесі деформування в'язко-пластичного середовища величина сил контактної тертя пов'язана із швидкостями зсуву у тонкому приконтактному шарі. Значення дотичного напруження в тій чи іншій точці контактної поверхні при даних властивостях середовища, що деформується, визначається величиною та знаком відповідної швидкості деформації зсуву $\dot{\gamma}_{\xi\eta}$ (8):

$$\dot{\gamma}_{\xi\eta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial V_{\eta}}{\partial \xi} \right) \quad (8)$$

Частка кожної складової в (8) нерівнозначна і залежить від форми ЗД. Розв'язання кінематичної задачі визначило необхідність розподілу понять кінематичного та силового нейтральних перерізів ЗД. За кінематичний нейтральний переріз приймається поперечний переріз зони, в якій витрати металу (Q) відносно валка дорівнюють нулю. Як силовий нейтральний переріз маємо той поперечний переріз ЗД, в якому контактні дотичні напруження (τ) змінюють знак на протилежний. При $l/h_{cp} < 1$ обидві компоненти $\frac{\partial V_{\xi}}{\partial \eta}$ і $\frac{\partial V_{\eta}}{\partial \xi}$ сумірні, що призводить до суттєвого незбігу кінематичного γ^0 та силового γ^{τ} нейтральних кутів. При $l/h_{cp} > 3$ силовий і кінематичний нейтральні перерізи практично збігаються. Одержано розрахунки залежності довжини зони прилипання від фактору форми l/h_{cp} при різних величинах перепаду температури (Δt) по товщині прокатуваної штаби. Із збільшенням Δt до 200 °C довжина зони прилипання зростає. Крім того, встановлено, що залежно від величини кое-

фіцієнту тертя спокою f_n , параметру l/h_{cp} , а також перепаду температури металу Δt довжина зони прилипання визначатиметься або за умовою (6), або за умовою (7).

Одномірна модель зони деформації. Дотримання методу аналізу процесу прокатування в рухомій системі координат дає можливість спостерігати вектори руху точок деформованої дуги контакту. На ділянці дуг контакту X_1 від входу в ЗД до лінії центрів валків (ЛЦВ) складова швидкості контактної поверхні валка спрямована до осі прокатування, тобто виникає навантаження прокатуваної штаби. За лінією ЛЦВ вертикальна складова вектора швидкості контактної поверхні валка спрямована в напрямку від осі прокатування. На цій ділянці X_0 виникає розвантаження і пружне відновлення деформованого валка, а прокатуваний метал за теоремою А.А.Іл'юшина переходить з пластичного стану у пружний. Висунута гіпотеза підтверджується експериментальними даними А.В.Зінов'єва.

Рівняння прокатування. Диференційне рівняння рівноваги вирішували в поздовжніх напруженнях σ_x :

$$d\sigma_x = (p_r - \sigma_x) \frac{2tg \varphi}{h} dx + \frac{2\tau_v}{h}, \quad (9)$$

де p_r , τ_v - нормальні і дотичні контактні напруження; h - товщина штаби; φ - кут координата.

Оскільки у рівнянні (9) три невідомі величини p_r , σ_x , τ_v , його доповнили двома співвідношеннями. Як перше використаємо відоме співвідношення для контактних дотичних напружень:

$$\tau_v = f p_r \quad (10)$$

де f - коефіцієнт тертя.

За друге співвідношення взяли вираз для інтенсивності напруження (Т):

$$p_r - \sigma_x = T \quad (11)$$

В зоні пластичної деформації (X_1) згідно з умовою пластичності:

$$T = 2K \quad (12)$$

де K - опір деформації зсуву.

В зоні пружного відновлення ($0 < X < X_0$) розподіл інтенсивності напружень від $2K$ до нуля приймали еліптичним:

$$\tau = 2K \sqrt{1 - \left(\frac{X}{X_0}\right)^2} \quad (13)$$

Одночасне застосування умов (12) та (13) суттєво відрізняє запропонований підхід до дослідження одномірної ЗД від відомих методів, в яких рівняння (9) вирішується для пластичної зони. Зокрема, розв'язання рівняння (9) в поздовжніх напруженнях дозволяє подолати проблему завдання граничних умов у вхідному та вихідному перерізах ЗД. Числова його реалізація дозволила досліджувати складний випадок прокатування тонкої штаби із зварними з'єднаннями.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ПРОКАТУВАННЯ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ

При гарячому прокатуванні листів та штаби вирішуються проблеми не тільки отримання прокату із заданими формою, розмірами і станом поверхні, але й з регламентованими фізико-механічними властивостями. Зв'язок технологічних параметрів процесу гарячого прокатування і механічних властивостей готового прокату доцільно описувати через змінювання металографічної структури сталі, т.я. регресивні рівняння типу "хімсклад - технологія - властивості" завжди мають обмежений простір використання. Напрямок математичного моделювання процесу структуроутворення отримав бурхливий розвиток в останні роки. Ці досягнення покладено в основу розробленої математичної моделі.

Модель базується на металофізичних уявленнях про формування механічних властивостей сталі. Алгоритм моделей передбачає послідовне визначення процесів структурних перетворень металу, що здійснюються у технологічній лінії прокатного стану.

Основними етапами формування мікроструктури сталі у процесі гарячого прокатування є аустенітизація сталі при нагріванні заготовки, наклеп і рекристалізація аустеніту при багаторазовому деформуванні металу у клітках стану,

фазове перетворення (розпад) аустеніту при безперервному охолодженні прокату, постфазові перетворення (зростання зерна фериту, коагуляція перлиту, відпуск мартенситу, тощо). Етапи формування структури при прокатуванні, зазвичай відповідають конкретним дільницям обробки металу. Розмір зерна аустеніту (D) при нагріванні обчислювали на основі рівняння швидкості міграції границі зерна:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 D^{-1} \quad (14)$$

де $K_1 = K_0 \exp\left[-\frac{Q_a}{RT}\right]$; K_0 - константа; Q_a - енергія активації зростання зерна; R - газова стала Больцмана; T - температура, $^{\circ}\text{K}$.

У роботі запропоновані методи обчислення Q_a з урахуванням розчинення в аустеніті вторинних фаз. Показано, що нерозчинені в аустеніті карбіди та нітриди Al, V і Nb у 10 разів ефективніше впливають на енергію активації зростання зерна, ніж розчинені.

До основи моделі рекристалізації гарячедеформованого аустеніту закладені методика та рівняння С.М. Селларза:

$$\tau_r (X = 95\%) = k_1 Z^{a_1} \varepsilon^{b_1} d_0^{c_1} \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right) \quad (15)$$

$$d_r = f(Z) \varepsilon^{d_1} D^{b_2} \quad (16)$$

$$X(\tau) = 1 - \exp\left[-2,996\left(\frac{\tau}{\tau_r}\right)^2\right] \quad (17)$$

$$D^n = d_r^n + k_2 \exp\left[-\frac{Q_j}{RT}\right], (\tau > \tau_r) \quad (18)$$

де $k_1, a_1, b_1, c_1, d_2, b_2, k_2, n$ - константи;

$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right)$ - параметри Зеннера-Холломена;

Q_r, Q_j, Q - енергії активації первинної і збірної рекристалізації, деформації.

Змінювання середнього діаметра зерна аустеніту у процесі первинної рекристалізації описане нами слідуючою формулою:

$$d = D - (D - d_r)^{\alpha}, \quad (\tau < \tau_r) \quad (19)$$

З метою урахування наклепу аустеніту у черговому циклі деформації, отриманого в попередньому проході, визначали залишкову еквівалентну деформацію:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1(1-X) \quad (20)$$

Виходячи з середнього розміру аустенітного зерна (d) і ступеню його наклепу ($\Delta \epsilon$) визначили час і температуру початку утворення фериту, перліту, бейніту. Для цього використали апроксимальні формули для ізотермічних C-подібних діаграм розпаду аустеніту сталей, хімічний склад яких лежить у діапазоні: C від 0,1 до 0,6, Mn від 0,2 до 2,0, Si від 0,20 до 2,5, Ni до 3,0, Cr до 2,0, Mo до 0,8% (мас). Емпіричні коефіцієнти апроксимальних залежностей визначені методом множинного регресивного аналізу 100 діаграм ізотермічного розпаду.

Ступінь перетворення при утворенні кожної фази визначили на основі рівняння Аврамі:

$$X = 1 - \exp(-\beta t^n) \quad (21)$$

де X - об'ємні долі фази, %; β , n - коефіцієнти, залежність яких від температури визначили за допомогою рівнянь C-подібних діаграм.

При виборі методики обчислення середнього розміру зерна фериту (d_a) виходили із слідуючого: розмір зерна фериту, прямо залежить від розміру зерна аустеніту, ступеня його наклепу, від температури перетворення. Наш досвід показав, що найкраще цьому положенню відповідає формула:

$$d_a = \left[A d_{\text{ефф}}^{\alpha} \exp\left(-\frac{Q_k}{RT_{0,05}}\right) V_{\text{max}} \right]^{1/3} \quad (22)$$

де $d_{\text{ефф}} = \frac{d}{1 + b_4 \rho^c}$; $\rho = \rho(\Delta\epsilon)$ - щільність дислокацій; V_{max} - максимальна кількість фериту на діаграмі Fe-C; $T_{0,05}$ - температура 5% феритного перетворення, °K

По завершенні дослідження розпаду аустеніту переходили до обчислення кінетичних процесів, що протікають при повільному охолодженні металу. Для описування процесу сфероїдизації перліту використовували функцію виду:

$$P = 1 - \exp\left[-\beta_p \left(\frac{\tau}{\tau_p}\right)^{K_p}\right] \quad (23)$$

де β_p , K_p - константи; τ_p - час повної фероїдезації перліту.

Час повної сфероїдизації перліту одержали на основі узагальненої діаграми перетворень пластинчатого цементиту у глобулярний, а потім уточнювали, використовуючи металографічні данні, що одержали у ході експериментів російські досліджувачі Шкатов В.В., Чернишов А.П., Лізунов В.І.

Зменшення зміцнюваної частки перліту ($\Delta\Pi$) внаслідок сфероїдизації виражали лінійною залежністю:

$$\Delta\Pi = a_5 \Pi P, \quad (24)$$

де a_5 - емпіричний коефіцієнт.

Визначення механічних властивостей проводили з використанням модифікованих рівнянь Ф. Пікерінга.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ПРОКАТУВАННЯ ШТАБИ НА БЕЗПЕРЕРВНОМУ СТАНІ

Безперервний стан холодного прокатування (БСХП) є складним агрегатом, робочий стан якого описується значною кількістю параметрів. Параметри процесу залежать від умов прокатуваною в кожній окремій кліті стану і взаємопов'язані прокатуваного штабою. Розроблена і реалізована математична модель БСХП, що включає модель зони деформації, яка використовується для обчислення енергосилових, кінематичних та геометричних параметрів процесу

прокатування в кожній кліті стану; модель змінювання величини, міжвалкового зазору; модель для визначення температури штаби в стані; динамічна модель руху маси кліті та привода.

Опір деформації. В розробленій математичній моделі прокатки при описуванні опору деформації (межі текучості) враховували вплив ступеню, температури та швидкості деформації. Величину межі текучості представляли у вигляді суми статичної та динамічної складових:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau \text{ст}} + \sigma_{\tau \text{дин}} \quad (25)$$

Для описування статичної складової застосовується залежність виду:

$$\sigma_{\tau \text{ст}} = n_t \sigma_{\tau \text{ст}}^{20} \quad (26)$$

де $n_t = 1 - \frac{n_x \sqrt{t}}{100}$ - температурний фактор ;

$\sigma_{\tau \text{ст}}^{20} = \sigma_{\tau \text{исх}} + a \epsilon^b$ -деформаційне зміцнення сталі при $t = 20$ °С;

$\sigma_{\tau \text{исх}} = c_0 + c_1[C] + c_2[Mn] + \dots + c_d d_a^d$ - межа текучості гарячого підкату з низьковуглецевої сталі; n_x - коефіцієнт температурного знеміцнення; t - температура мелалу при деформації, °С; a, b - константи деформаційного знеміцнення; ξ - накопичена деформація, c_0, c_1 - константи хімічного зміцнення сталі, c, d - константи зернового зміцнення зерна, [C], [Mn]- масова доля елементів у сталі, % .

Динамічна складова межі текучості має вигляд:

$$\sigma_{\tau \text{дин}} = \exp(6,5) \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0(\bar{\epsilon})} \right]^{\frac{N(t+273)}{0,14}} \quad (27)$$

Дослідження показали, що застосування залежностей (25)-(27) дозволяє підвищити точність обчислення енергосилових параметрів холодного прокатування до 25%.

Коефіцієнт тертя. При холодному прокатуванні тонкої штаби та жерсті коефіцієнт тертя впливає переважно на зусилля прокатки. З метою уточнення методики його обчислення в умовах промислового стану проведені дос-

лідження у впливу геометричних, кінематичних, реологічних та трибологічних параметрів ЗД, у клітях промислового стану. Аналіз даних про коефіцієнт тертя, що одержані методом тиску, дав змогу узагальнити їх у вигляді залежності:

$$f = m_0 K_b K_{ct} \varepsilon^{(m_1 + m_2 \frac{h_0}{R} + m_3 \sigma + m_4 V)} \exp(m_5 \varepsilon) \quad (28)$$

де m_0, m_1, \dots, m_5 - константи, h_0 - товщина штабу перед обтискуванням, R - радіус робочого валка, V_b - швидкість робочого валка, $K_b = 1 + 0,25 (R_{ав} - 0,85)$; $R_{ав}$ - шорсткість поверхні робочого валка, K_{ct} - коефіцієнт враховуючий склад технологічного мастила.

Динамічна модель системи "кліть-привід-штаба". Вивчення динамічних процесів які виникають в безперервному стані, вивчали шляхом обчислювальних експериментів з використанням чисельного рішення системи, що включає рівняння контактних напружень (p_r, τ_r), сили прокатки (P), обертаючого моменту ($M_{кр}$), випередження (S), а також диференційне рівняння вертикальних переміщень валкових мас:

$$m\ddot{x} + C_K x = P(t) - \text{sign}(\dot{x}) F(t), \quad (29)$$

де m - приведена маса валкового вузла, C_K - жорсткість кліті, x - переміщення валкового вузла, $F(t)$ - сила тертя подушок валків та станини кліті, обертальних коливань валків і приводу:

$$\begin{aligned} \theta_1 \ddot{\varphi}_1 &= \Delta M_{кр} - 2\bar{p}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \\ \theta_2 \ddot{\varphi}_2 &= \Delta M_{дв} + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned} \quad (30)$$

де $\Delta M_{кр}$, $\Delta M_{дв}$ - прирість обертального моменту на валках і моменту двигуна; θ_1, θ_2 - приведені до валу двигуна моменти інерції валкового вузла і якоря двигуна; C_{12} - приведена жорсткість валопроводу; φ_1, φ_2 - кути повороту мас θ_1 та θ_2 ; \bar{p} - коефіцієнт затування.

Рух електроприводу:

$$\Delta U = L \Delta I + R_a \Delta I + C_e \dot{\varphi}^2 \quad (31)$$

де R_a, L - активний опір і індуктивність якірного ланцюга двигуна, ΔU - зміна напруження якірної обмотки двигуна, ΔI - приріст сили току в ланцюгу якоря двигуна, i , нарешті, міжклітьового натягу штаби:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EQ}{l} (v_x' - v^0) \quad (32)$$

де T - натяг штаби, E, Q - модуль пружності і поперечний переріз штаби, l - відстань між клітями, V_x - швидкість входу штаби в наступну кліть, V^0 - швидкість виходу штаби з кліті..

Розроблені алгоритм і комп'ютерна програма дозволили змоделювати перехідний процес у системі "кліть-привід-штаба" при прокатуванні зварених встик кінців штаби. Оскільки більшість обривів зварених швів виникають в останніх міжклітьових проміжках, дослідження перехідного процесу проведені для четвертої кліті п'ятиклітьового стану. В результаті розв'язання системи рівнянь (29)-(32) одержали картину зміни параметрів в момент прокатування звареного шва в четвертій кліті стану (рис.6). Такий результат було вперше одержано автором і не має аналогів. Аналіз одержаних результатів показав, що в момент проходження звареного шва через зону деформації різко змінюються випередження, зусилля і обертальний момент. Перше приводить до зміни швидкості виходу штаби із міжвалкового зазору, друге - до поступальних, а третє - до обретаельних коливань валків, що викликає періодичну різнотовщинність штаби. Встановлено, що зміна натягу штаби має складний характер і складається з відхилення натягів за рахунок поступальних коливань валкового вузла (високочастотна складова), обертаельних коливань валків (низькочастотна складова), зміни випередження металу в ЗД, зміни швидкості якоря двигуна. Показано, що сукупна дія різнотовщинності стикуваних кінців штаби і потовщення власне зварювального шва призводить до значного збільшення натягу штаби, що може в свою чергу привести до її обривання. Розроблена модель дала змогу провести комплексне дослідження впливу параметрів технології на величину ривків натягу в штабі при прокатуванні зварених швів різноманітної конфігурації.

УСТАНОВЛЕНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ

ЛИСТОВОГО ПРОКАТУВАННЯ

Вплив технології гарячого прокатування на якість листового прокату. Вивчали вплив технологічних параметрів на появу дефектів поверхні штаби, внутрішніх дефектів суцільності металу, дефектів структури, на формування механічних властивостей. Дефекти поверхні штабової сталі в значній мірі залежать від НДС металу в ЗД. Дійсно, розтягуючі напруження можуть спричиняти появу надривів, а ступінь вкорінення окалини в метал залежить від величини напружень і деформацій у контактному прошарку. Аналіз результатів обчислювальних експериментів показав, що найбільша імовірність розривання зовнішніх та внутрішніх шарів розкату має місце в першій чорновій кліті НШС, де $1/h_{cp} < 1,5$. Зменшенню імовірності утворення розривів в поверхневих шарах слябу сприяє збільшення обтискування, до того ж найбільш інтенсивно розтягуючі напруження зменшуються при збільшенні обтискування до 25 %. Крім того, сприятливо позначаються на НДС металу знижені обтискування в першій кліті чистової групи НШС. При прокатці в першій кліті чистової групи стану на величину напружень значний вплив виявляє коефіцієнт тертя, а збільшення обтискування призводить до різкого збільшення деформації зсуву поверхневих шарів металу. Збільшення обтискування і коефіцієнт тертя в ЗД створює найбільш сприятливі умови для вкочування повітряної окалини в поверхневі шари прокату.

Інтенсивне підстужування розкату і штаби між проходами зменшує нерівномірність деформації за товщиною прокатої штаби і знижує величину розтягуючих напружень в поверхневому прошарку металу. Встановлено, що при прокатці з підстужуванням поверхневим шаром зменшуються стискуючі напруження в контактному шарі, зникають розтягуючі напруження. Досліджена нерівномірність деформації в перерізі штаби при прокатуванні в останній кліті стану. Встановлено, що найбільшій деформації зазнають поверх-

неві шари штаби; нерівномірність деформації за товщиною штаби є мінімальною при обтискуванні 15 % .

Прогнозування мікроструктури та властивостей гарячекатаного листа. Технологія прокатування штаби на безперервному стані характеризується температурно-швидкістними та деформаційними параметрами прокатування: температурою розкату, швидкістю прокатування, ступенем деформації у чистовій групі клітей, розподілом обтисків у клітях. У листопрокатному виробництві технологію прокатування з позицій формування структури та властивостей металу частіше характеризують температурою кінця прокатки ($T_{кп}$). Однак, теж саме значення $T_{кп}$ може бути досягнуто різноманітними технологічними заходами: за рахунок змінювання температури та товщини розкату; за рахунок змінювання швидкості прокатування, за рахунок охолодження штаби у міжклітьових проміжках; за рахунок перерозподілу обтиску металу між клітями. Тому в роботі оцінювали вплив саме цих параметрів на структуру та властивості штабового прокату. Наприклад, при прокатуванні штаби із сталі Ст3сп товщиною 8 мм швидкість прокатування змінювали в діапазоні 3-6 м/с. $T_{кп}$ при цьому змінювалась від 770 до 880 °С. При постійній температурі змотування ($T_{зм}$), що забезпечували режимом охолодження, зменшення швидкості прокатування призвело до зростання границі текучості на 28 Н/мм² (з 343 до 371 Н/мм²). Це зумовлено подрібненням зерна фериту з 19,2 до 12,7 мкм, що в свою чергу, пов'язується з подрібненням аустенітного зерна (з 60 до 44 мкм). Із збільшенням товщини розкату спостерігалось деяке зростання зерна аустеніту. Однак, на кінцевій структурі сталі і її механічних властивостях це не позначилося. Температуру розкату (T_p) перед чистовою групою клітей варіювали в діапазоні 985-1185 °С. Швидкість прокатування приймалася постійною - 4,5 м/с. Температура кінця прокатування змінювалась при цьому від 800 до 890 °С. Зерно аустеніту при зниженні T_p подрібнювалось з 60 до 52 мкм; відповідно зерно фериту - з 20 до 15 мкм; границя текучості підвищилася на 18 Н/мм² (з 359 до 377 Н/мм²).

Вплив технології охолодження та змотування штаби. Розрахункові залежності механічних властивостей штаби з низьковуглецевої сталі типу Ст3сп та низьколегованої типу 09Г2С підтверджують загальновідомий факт, що при зниженні $T_{зм}$ структура стає більш дисперсною, а метал відповідно зміцнюється. Новизна належить результатам досліджень, які свідчать, що криві зміцнення прокату із зниженням $T_{зм}$ мають різні градієнти на різних інтервалах температур змотування. Виділяються три частки кривої $\sigma=\sigma(T_{зм})$: два крайні з відносно невеликими градієнтами та середній з найбільшим градієнтом. Аналіз структурних змін у металі пояснює перебіг кривих зміцнення. На крайніх частках кривої $\sigma=\sigma(T_{зм})$ зміцнення відбувається тільки за рахунок подрібнення ферито-перлітної структури (на правому - за рахунок подрібнення зерна фериту, на лівому - за рахунок дисперсності перліту). На середньому участку кривої температур змотування на хід кривої зміцнення накладається ефект постфазових перетворень, а саме знеміцнююча дія сфероїдизації пластинчатого перліту. Дослідженнями визначені інтервали температур змотування, при яких внутрішні та зовнішні витки рулону мають однакову міцність.

Вибір оптимальної товщини підкату для виробництва тонкої холоднокатаної штаби. Розв'язана задача оптимізації, що враховує взаємозв'язок структури, механічних властивостей та різнотовщинності гарячекатаної штаби з її товщиною, вплив цих факторів на енергосилові параметри процесу холодного прокатування тонкої штаби та жерсті. Показано, що не завжди доцільно зменшувати товщину гарячекатаної штаби для одержання тонкої холоднокатаної штаби. Це пов'язано з тим, що із зменшення товщини гарячекатаної штаби погіршується пластичність сталі, знижується стабільність механічних властивостей, збільшується різнотовщинність штаби, знижується продуктивність стану гарячої прокатки і безперервного травильного агрегату. Результати досліджень довели, що зменшення розміру зерна фериту в тонкій гарячекатаній штабі викликає більш інтенсивне зміцнення металу при подальшому холоднокатаному прокатуванні.

Вибір обтиску в останній кліті безперервного стану холодного прокатування. Величини обтиску в останній кліті стану визначають ефективність роботи автоматичних систем регулювання товщини та натягу (САРТ і Н), профілю та форми (САРПФ) штаби. Методом обчислювального експерименту визначені передавальні відношення “товщина-натяг”, “натяг-переміщення нажимного пристрою”, “профіль-вигин” за умов різних обтисків штаби в останній кліті стану. Встановлено, що для ефективного функціонування локальних систем автоматичного регулювання обтиск в останній кліті стану має бути досить великим, що забезпечується рядом технологічних заходів: вибором оптимальної товщини підкату, шорсткістю поверхні валків, типом технологічного мастила.

Принципове теоретичне та практичне значення має установа в роботі аномальна залежність зусилля прокатування в останній кліті від товщини штаби, що надходить до валкового зазору. Показано, що у випадку прокатування надто тонкої штаби (жерсті) в гладеньких валках з застосуванням технологічного мастила при збільшенні зусиль обтиску за рахунок збільшення товщини штаби, що надходить до валків, зусилля прокатування зменшуються, і навпаки при зменшенні товщини штаби, що надходить до кліті, нижче визначеної величини одержання заданої кінцевої товщини штаби стає неможливим через високі показники зусиль прокатування. Це аномальне явище пояснюється характером змінювання напруженого стану в ЗД з параметрами $\frac{h_0}{R} < 0,001$; $F=0,02$; $\sigma > 700 \text{ Н/мм}^2$.

Прокатування штаби із зварними з'єднаннями. При дослідженні процесу прокатування зварних швів, зокрема, динамічних навантажень в прокатуваній штабі, враховували наявність реальних збурювань факторів: різнотовщинності стикових кінців штаби і самого зварного шва, відносні розміри якої збільшуються під час прокатування, відмінність механічних властивостей штаби і зварного шва, що повільно зменшується з деформацією штаби. Для зменшення обривності зварних швів режими прокатування маємо ви-

бирати таким чином, щоб одержати найменші динамічні навантаження в прокатуваній штабі. Встановлено, що збільшення різнотовщинності зварного стику спричиняє зростання ривка натягу штаби, і ця залежність має зростаючий градієнт. Із зростанням обтиску у кліті зменшується вплив різнотовщинності зварного стику на змінювання натягу штаби під час прокатування зварного шва. Збільшення рівня міжклітьового натягу призводить до зменшення відносного відхилення натягу штаби при прокатуванні шва, але абсолютні його значення швидко досягають критичної величини, що викликає обрив штаби. Вплив швидкості прокатування на ривки натягу при прокатуванні зварних швів має екстремальний характер. Встановлено діапазон швидкостей (~6 м/с), при яких ривки натягу максимальні.

Вибір конструктивних рішень при проектуванні безперервних станів холодної прокатки. Для розвитку сучасних безперервних станів холодної прокатки характерним є збільшення кількості клітей до 5-6 і використання робочих валків діаметром 600 мм замість 500 мм. Досвід освоєння та експлуатації станів нового покоління виявив особливості реалізованої з їхньою допомогою технології: остання кліть стану може працювати тільки як дресирувальна, тобто з мінімальним обтиском. Такий режим прокатування не є оптимальним, про що свідчать проведені дослідження. Намагання збільшити обтиск в останній кліті цих станів закінчувалося, як правило, невдачею внаслідок значного збільшення зусилля прокатування, дестабілізації товщини, натягу та профілю штаби. В роботі доведено, що причина цих явищ криється в збільшенні діаметру робочих валків. Для прокатування тонкої штаби діаметр робочих валків 500 мм є критичним, і подальше його збільшення призводить до непропорційного зростання зусилля прокатування.

РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК У ЛИСТОПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Автоматизована система керування властивостями прокату на стані гарячої прокатки. Комп'ютерна система, в основу якої покладено розроблену автором математичну модель механічних властивостей вуглецевих та низько-

легованих сталей пройшла дослідно-промислово перевірку на стані 2000 АТ "Северсталь". Призначення системи - забезпечення гарантованого рівня механічних властивостей прокату за умов нестабільності хімічного складу сталі. Управління реалізується таким чином: після виплавлення сталі, визначення її хімічного складу, розливу, одержані заготовки надходять до складу листопрокатного цеху. Обліковець складу заготовок вводить в комп'ютерну систему величини масових часток хімічних елементів цієї партії заготовок. Інженер-технолог завчасно вводить в комп'ютерну систему величини параметрів базової технології прокатування штаби заданого сортаменту та призначення, включаючи температуру кінця прокатування і температуру змотування штаби у рулон. Фабрикатор ПРБ вводить в комп'ютерну систему потрібні замовникові величини механічних властивостей листового прокату і запускає в дію програму, яка визначає режими прокатування та охолодження штаби. З липня до листопада 1993 року система знаходилася в дослідно-промисловій експлуатації. Були прокатані 22 спробні плавки, по яких система запропонувала скоригувати технологію прокатування. Кожна з цих плавок була поділена на дві частини: одна частина плавки прокатувалася за режимами, які вказані в технологічній інструкції, друга - за режимами, які запропоновані системою. Від спробних рулонів кожного з варіантів відбиралися проби на механічні випробування. Аналіз одержаних даних показав наступне. По-перше, встановлено, що система виконує коригування режимів прокатування (температура кінця прокатки, температура змотування) у вірному напрямку; по-друге, досягнуто поліпшення механічних властивостей на кінцях штаби за показниками границі міцності до 50 Н/мм^2 , в середині - до 80 Н/мм^2 . Дві плавки були перепризначені на інший сортамент. Вихід придатного за механічними властивостями на партіях металу, що прокатувалися за рекомендаціями системи склав 100%. Весь період дослідно-промислового випробування система працювала безпомилково.

Технологія виробництва підкату для холодного прокатування. Шляхом теоретичних та експериментальних досліджень визначена оптимальна технологія (температурні режими) виробництва підкату на Карагандинському та

Маріупольському ім.Ілліча комбінатах. Впровадження технології на цих підприємствах дало змогу в значній мірі вирішити проблеми оптимізації механічних властивостей підкату, що, в свою чергу, сприяло стабілізації подальшого процесу холодного прокатування, а також поліпшення якості холоднокатаної штаби.

Оптимізація режимів холодної прокатки. При виконанні цієї роботи безперервні стани холодної прокатки були “вузьким” місцем у нарощуванні виробництва холоднокатаної штаби. Проблема полягала у низькій стабільності процесу прокатування штаби, особливо, тонкої (0,5 мм): обриви штаби в міжклітьових проміжках та незадовільне викатування штаби на задану товщину.

Для вирішення цієї проблеми до кожного дослідного стану застосовувався комплексний підхід: розробка технології одержання підкату, визначення оптимального розподілу обтисків, вибір мінімально допустимого рівня натягу штаби між клітьями, вибір стратегії керування станом у нестационарних умовах роботи (холодні валки, шорсткі валки, прокатування зварних швів). На підставі виконаних досліджень впроваджено вдосконалені технологічні режими прокатування тонкої штаби (0,5–0,6 мм) на безперервних станах: п’ятиклітьовому стані 1700 Карагандинського, чотириохклітьових станах 1700 Маріупольського ім. Ілліча та Череповецького меткомбінатів; а також режими прокатування жерсті: на п’ятиклітьовому стані 1200 Магнітогорського та шестиклітьовому 1400 Карагандинського меткомбінатів. Реалізація розроблених режимів у більшості випадків дала можливість вирішити проблеми стабілізації процесу прокатування тонкої штаби та жерсті. Найбільш значимі результати, як в науковому, так і в практичному аспектах одержані при розробці та впровадженні технології прокатування на стані 1400 КарМК. Розроблені режими обтисків, що забезпечують “завантаження” останньої кліті стану, дали змогу стабілізувати процес прокатування, освоїти проектні швидкості прокатування (до 30 м/с), знизити обривність штаби до 5-6 на 1000 т прокату, підвищити

прокатуваність зварних швів до рівня 99,5%, знизити відбракування холоднокатаної жерсті за дефектами форми штаби у 5-6 разів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ РОБОТИ:

1. Процес прокатування, як засіб обробки тиском, мається за суперпозицію двох процесів: переносного руху штаби у міжвалковий зазор і процесу власно деформації. Розроблено метод декомпозиції процесу прокатування і виконано кінематичний, силовий та енергетичний аналізи зони деформації із застосуванням методу інверсії прокатування. Доведено, що обертальний момент на валку еквівалентний моменту сил, які діють відносно миттєвого центру обертання валка. Одержана нова формула обчислення обертального моменту на валку.

2. Розроблено та реалізовано на ЕОМ метод обчислення напружено-деформаційного стану металу в зоні деформації. Метод заснований на розв'язанні плоскої задачі в'язко-пластичної текучості металу у міжвалковому зазорі. Задача вирішена методом кінцевих різниць (МКР), в основі якого лежать методи установалення і Гаусса-Зейделя. Геометрична зона деформації зображена ортогональним полем в біциліндричній системі координат, в якій окружності прокатних валків збігаються з координатними лініями.

3. Досліджені і визначені граничні кінематичні умови по периметру геометричної зони деформації. Встановлено, що на входній і вихідній границях зони деформації найкращу збіжність з результатами експерименту забезпечують "м'які" граничні умови типу Неймана; застосування гіпотези "жорстких кінців" (умов типу Діріхле) правомірне при $l/h_{cp} > 3$. На контакті металу з валком граничні кінематичні умови встановлюються виходячи з наявності зон "ковзання" і "прилипання". Межа зони "прилипання" визначається умовами досягнення граничними дотичними напруженнями величини опору деформації зсуву прокатуваного металу і/або сили тертя спокою. Дослідженнями визначений вплив геометрії зони деформації, коефіцієнта тертя спокою і реології прокатуваного металу на довжину зони "прилипання".

4. Виявлені та встановлені закономірності зміни кінематичних параметрів текучості у міжвалковому зазорі при широкому діапазоні фактора форми зони деформації ($1/h_{cp}=0,55 - 6,6$). Показано, що при прокатуванні високої штаби ($1/h_{cp}= 0,55 - 1,0$) довжина зони “прилипання” не робить помітного впливу на напружено-деформаційний стан металу. Із збільшенням $1/h_{cp}$ вплив довжини зони “прилипання” є суттєвим. Досліджено вплив параметру $1/h_{cp}$ на положення кінематичного і силового нейтральних перетинів в зоні деформації. Показано, що при $1/h_{cp} < 3$ має місце їх незбіжність, яка різко зростає із зменшенням $1/h_{cp}$.

5. Розроблена одномірна модель зони деформації при тонколистовому прокатуванні, в основу якої покладено силовий і кінематичний аналіз взаємодії валка і прокатуваного металу у рухомій системі координат; метод кінцевих різниць для розв’язання рівняння у поздовжних напругах; сучасні уявлення про реологію гарячого і холодного металу. Дослідження, проведені на моделі, дали змогу одержати нові закономірності змінювання контактних напружень та зусиль при холодному прокатуванні штаби та жерсті, в ряду яких найбільш актуальними є “аномальна” залежність зусиль прокатування від відносного обтиску тонкої штаби, дослідження холодного прокатування штаби із зварними швами.

6. Представлено розвиток математичної моделі безперервного гарячого прокатування листової сталі у напрямку прогнозування її структурних та фазових перетворень. В основу моделі покладені сучасні досягнення у галузі комп’ютерного моделювання зростання зерна аустеніту у сталі при нагріванні перед прокатуванням; еволюції зерна аустеніту при багаторазовій деформації, фазових перетворень у сталі під час охолодження; механічних властивостей листового прокату на базі хімічного складу та структури. У роботі ці питання одержали подальший розвиток. А саме, розроблено метод розрахунку розміру зерна аустеніту з урахуванням його хімічного складу при нагріванні; метод розрахунку розміру зерна аустеніту у процесі первинної та збіркової рекристалізації під час циклічної деформації; залежності для розрахунку

ізотермічних діаграм розпаду аустеніту; методи розрахунку фазового складу дисперсності структурних складових сталі після охолодження деформованої штаби; метод розрахунку механічних властивостей сталі, як поліфазової суміші.

Показано, що моделювання опору деформації сталі та температури штаби нерозривно пов'язане з проблемою прогнозування структурних та фазових перетворень прокатуваної сталі.

7. Розроблені та реалізовані на ЕОМ математичні моделі стаціонарного та нестаціонарного процесів холодного прокатування штаби на безперервному стані. Модель включає сучасні, у тому числі розроблені автором методи прогнозування опору деформації, температури металу, коефіцієнту тертя, зусиль та моменту прокатування, метод обчислювання динамічних навантажень в елементах прокатної кліті, приводу та у прокатуваній штабі. Розроблена модель дала автору змогу провести дослідження енергосилових параметрів процесу при стаціонарних та нестаціонарних умовах прокатування. Наприклад, з її допомогою розкрито один з механізмів обриву штаби під час прокатування зварного шва, який пов'язаний з ривком штаби у міжклітьовому проміжку.

8. Здійснено комплекс обчислювальних експериментів з метою виявлення закономірностей формування якості гарячекатаного листа:

- досліджено вплив обтиску у перших клітях чорнової та чистої груп безперервного широкоштабового стану на величину розтягуючих напружень у прокатуваному металі; показано, що з метою зниження розтягуючих напружень та імовірності руйнування поверхневих шарів слябу та розкату, що приводять до дефектів поверхні, доцільно у першій кліті чорнової групи стану застосовувати підвищені обтиски, а у першій кліті чистої групи - знижені обтиски;

- інтенсивне підохолодження розкату на проміжному рольгангу та штаби у міжклітьових проміжках зменшує нерівномірність деформації металу за товщиною прокатуваної штаби і знижує величину розтягуючих напружень у поверхневих шарах, при цьому максимальне значення використання ресурсу пластичності зміщується від поверхні шару до центру перерізу;

- при зниженні обтиску в останній кліті (< 5%) істотно зростає нерівномірність деформації за товщиною прокатуваної штаби, яка може бути однією з причин формування неоднорідної структури;

- дослідженнями впливу температурно-швидкісних параметрів прокатування та режимів прискореного охолодження штаби на її стару структуру і механічні властивості встановлено, що для низьковуглецевих та низьколегованих сталей температура нагріву металу перед прокатуванням практично не впливає на кінцеву структуру сталевих штаб; підвищення температури кінця прокатування за рахунок збільшення швидкості прокатування, температури та товщини розкату призводить до укрупнення зерна аустеніту і зниження ступеню його наклепу; розпад аустеніту низьковуглецевих сталей практично встигає завершитися при знаходженні штаби на відповідному рольгунгу, а у низьколегованих сталей розпад завершується у змотаному рулоні (60-95%); встановлений механізм утворення нерівномірності механічних властивостей за довжиною гарячекатаної штаби; визначені температурні умови змотування штаби у рулон, що забезпечують рівномірність механічних властивостей.

9. Визначено науковий підхід до розробки технологій гарячого прокатування підкату, призначеного до подальшого холодного прокатування тонкої штаби та жерсті. В результаті досліджень встановлено, що зменшення товщини підкату для холодного прокатування тонкої штаби неоднозначно впливає на границю текучості холоднодеформованої сталі. На практиці менші товщини холоднокатаної сталі часто можуть бути одержані у випадку використання більш товстого підкату, це пояснюється тим, що структура сталі та механічні властивості підкату, одержуваного на безперервних широкоштабових станах гарячої прокатки, залежать від товщини штаби. Показана залежність вихідної границі текучості підкату та його зміцнення у процесі холодного прокатування від розміру зерна фериту у структурі сталі. При зменшенні розміру зерна вихідна границя текучості підкату та показник зміцнення сталі зростають. Показано, що для кожної товщини холоднокатаної штаби є оптимальна товщина підкату. Тонкі штаби (до 0,22 – 0,25 мм) доцільно прокатувати із підкату тов-

щиною 2,4 – 2,5 мм. Для виробництва штаби товщиною 0,2 мм і менше належить застосовувати більш тонкий підкат. Запропоновано метод оптимізації режимів холодного прокатування тонкої штаби за умовою мінімального наклепу деформованого металу.

10. Комплексними дослідженнями процесу холодного прокатування штаби на безперервних станах отримані такі результати:

- для ефективного функціонування локальних систем автоматичного регулювання товщини, натягу та профілю штаби при холодному прокатуванні обтиск в останній кліті стану повинен бути достатньо високим; величину передавальних коефіцієнтів в автоматичних системах необхідно встановлювати з урахуванням обтиску та товщини штаби у кліті;

- досліджено механізм обриву штаби по зварному шву. Встановлено що сукупний вплив різнотовщинності зварного стику, в якому після товстого кінця штаби іде тонкий, і локального потовщення власне зварного шва, викликає значні динамічні навантаження у прокатуваній штабі, які можуть досягати граничних значень і призвести до обриву зварного шва.

Показано, що усунення одного з цих збурювальних факторів, особливо різнотовщинності стикових кінців штаби, призводить до різкого зниження динамічних навантажень у прокатуваній штабі;

- встановлено, що в останніх клітях безперервного стану зварні шви доцільно прокатувати із зниженими міжклітьовими натягами ($0,15 - 0,20 \sigma_r$) та підвищеними обтисками ($\epsilon > 25\%$). З підвищенням швидкості прокатування зварного шва до 5-6 м/с динамічні навантаження у штабі різко зростають. При подальшому збільшенні швидкості прокатування коливання штаби зменшується;

- досліджені зміни товщини штаби на виході з клітей безперервного стану при прокатуванні зварних швів з урахуванням впливу швидкості прокатування на коефіцієнт тертя, границю текучості та товщину масляного шару у ПРТ опорних валків. Запропоновано метод обчислення корекції положення натискних гвинтів для компенсації впливу зазначених факторів на товщину прокату-

ваної штаби. Одержані рахункові криві корекції положення натяжних гвинтів при прокатуванні тонкої штаби на п'ятиклітьових станах, які повинні забезпечити постійність товщини та міжклітьових натягів при прокатуванні зварних швів;

- показано, що підтримання постійного зусилля та товщини штаби при прокатуванні у насічених валках можливо забезпечити шляхом динамічної перебудови обтискування у клітях стану в залежності від зносу насічок валків;

- розроблено спосіб прокатування, що забезпечує отримання планшетної штаби при прокатуванні у "холодних" валках, цей спосіб заснований на динамічному змінюванні натягу штаби у відповідності з розігріванням валків;

- при проектуванні станів холодної прокатки не слід прагнути збільшення діаметру робочих валків понад 500 мм., в такому разі не буде потреби збільшувати чисельність клітей до 5-6.

11. На основі одержаних наукових результатів розроблено:

- автоматизовану систему прогнозування та управління властивостями гарячекатаної штаби на безперервних станах гарячої прокатки;

- технологію виробництва підкату з вуглецевих, низьколегованих та низьковуглецевих марок сталей, що забезпечує комплекс механічних властивостей, сприятливий до стабілізації процесу холодного прокатування та забезпечення високої якості холоднокатаної листової сталі та жерсті;

- технологічні режими холодного прокатування штаби на безперервних станах, що забезпечують високу стабільність та продуктивність станів холодної прокатки, необхідний рівень якості холоднокатаної штаби та жерсті.

12. Розвинені теоретичні уявлення, обчислювальні методи та комп'ютерні програми у сукупності з експериментальними дослідженнями покладені в основу технологічних рекомендацій і пропозицій, спрямованих на підвищення ефективності листопрокатного виробництва і поліпшення якості листової продукції та впроваджені на Маріупольському металургійному комбінаті ім. Ілліча, Магнітогорському, Карагандинському, Череповецькому металургійних комбінатах.

Основний зміст дисертації опубліковано у наступних роботах:

1. Ноговицын А.В. К решению плоской задачи течения металла при горячей прокатке // Теория и практика производства широкополосной стали. - М.: Metallurgiya, 1979. - № 3. - С. 5-11.
2. Ноговицын А.В. Исследование неравномерности деформации полосы при прокатке в последней клетке непрерывного широкополосного стана // Прокатка широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. М.: Metallurgiya, 1985. - С. 41-43.
3. Ноговицын А.В. Исследование вязкопластического течения металла при плоской прокатке // Известия АН СССР. Металлы. - 1986. - № 3. - С. 88-96.
4. Ноговицын А.В. Исследование влияния условий деформации на образование дефекта "вкатаная окалина" // Улучшение качества горячекатаной широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Metallurgiya, 1987. - С. 87-90.
5. Ноговицын А.В. Влияние кинематических граничных условий на напряженно - деформированное состояние при плоской прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. - 1988. - № 7. - С. 50-55.
6. Ноговицын А.В. Исследование кинематических параметров контактного взаимодействия металла и вала при прокатке с помощью математической модели вязкопластического течения // Известия вузов. Черная металлургия. - 1987. - № 12. - С. 63-68.
7. Ноговицын А.В. Влияние обжата на эффективность работы систем автоматического регулирования толщины, натяжения и формы полосы при холодной прокатке // Научно-технический прогресс в листопрокатном производстве: Научные труды МЧМ СССР.- М.: Metallurgiya, 1988.- С. 58-65.
8. Ноговицын А.В. Пути повышения эффективности применения ЭВМ в научных исследованиях ИЧМ. // Черная металлургия. Наука-технология-производство МЧМ СССР. -М.: Metallurgiya, 1989. - С.379-384.
9. Ноговицын А.В. Некоторые тенденции развития станов холодной прокатки //Сталь. - 1991. - № 2, - С. 46-49.

10. Ноговицын А.В. Усилие прокатки тонколистовой стали // Интенсификация процессов производства тонколистового проката: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1988. - С. 4-10.

11. Ноговицын А.В. К теории очага деформации при холодной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. - 1992. - № 1. - С. 38-43.

12. Ноговицын А.В. Применение подвижной системы координат для описания процесса прокатки // Известия АН СССР. Металлы. - 1989. - №6. - С. 59-65.

13. Ноговицын А.В. Применение биполярной системы координат для исследования очага деформации при плоской прокатке // Повышение качества тонколистовой стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1986. - С. 91-97.

14. Прокатка металла со сварными соединениями. / В.Л.Мазур, В.И.Мелешко, Д.П.Галкин, А.И.Добронравов, А.В.Ноговицын, В.В.Акишин. - М.: Металлургия, 1985. - 112 с.

15. Мазур В.Л., Ноговицын А.В., Добронравов А.И. Рациональный метод расчета на ЭВМ параметров тонколистовой прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. - 1977. - № 12. - С. 54-59.

16. Качайлов А.П., Бойков В.Г., Ноговицын А.В. Расчет оптимального режима обжатий для непрерывного стана холодной прокатки с применением метода планирования эксперимента // Теория и практика производства широкополосной стали: Научные труды. МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1977. - № 1. - С. 24-30.

17. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Математическая модель прокатки сварного шва // Теория и практика производства широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1977. - № 1. - С. 36-43.

18. Левченко Г.В., Ноговицын А.В. Сопротивление деформации стали 15ГЮТ // Сталь. - 1977. - № 4. - С. 336-338.

19. Мазур В.Л., Акишин В.В., Добронравов А.И., Ноговицын А.В. и др. Рациональные режимы прокатки полос, сваренных встык // Сталь. - 1978. - №7. - С. 629-633.

20. Галкин Д.П., Мазур В.Л., Добронравов А.И., Ноговицын А.В., Кувшинов В.А. Совершенствование режимов прокатки жести на реконструированном стане 1200 ММК // Сталь. - 1978. - №12. - С. 1099-1102.

21. Мазур В.Л., Притоманова М.И., Анохина А.И., Ноговицын А.В. и др. Пути улучшения качества подката для производства тонких холоднокатаных полос на КарМК // Теория и практика производства широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Metallurgia, 1979. - № 3. - С. 30-34.

22. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Коэффициент трения при холодной прокатке полос на промышленных станах // Теория и практика производства широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Metallurgia. - 1979. - № 4. - С. 61-65.

23. Ноговицын А.В., Мазур В.Л. Сопротивление деформации листовой стали при холодной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия, 1980. - № 2. - С. 68-72.

24. Тищенко О.И., Мазур В.Л., Сосковец О.Н., Ноговицын А.В., Чернов П.П. Производство холоднокатаного листа на стане 1700 Карагандинского металлургического комбината // Сталь. - 1979. - №5, - С. 355-358.

25. Девятко В.И., Ноговицын А.В., Дрозд И.Г. и др. Исследование холодной прокатки концов полосовой стали на непрерывных станах // Теория и практика производства широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Metallurgia. - 1981. - № 5 - С. 24-27.

26. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Исследование на ЭЦВМ процесса непрерывной прокатки сваренных встык полос. Сообщение I // Известия вузов. Черная металлургия, 1980. - № 8. - С. 30-32.

27. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Исследование на ЭЦВМ процесса непрерывной прокатки сваренных встык полос. Сообщение II // Известия вузов. Черная металлургия, 1980. - № 10. - С. 112-116.

28. Мелешко В.И., Ноговицын А.В. Расчет крутящего момента при прокатке // Технология прокатки и отделки широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1981. - С. 4-6.

29. Мазур В.Л., Акишин В.В., Ноговицын А.В. и др. Способы улучшения прокатываемости сварных швов на непрерывных станах // Сталь. - 1981. - № 1 - С. 51-56.

30. Мелешко В.И., Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Математическая модель непрерывного стана холодной прокатки // Производство горячекатаной и холоднокатаной листовой стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1983. - С. 29-34.

31. Ноговицын А.В., Парсенюк Е.А. Исследование "эффекта скорости" при холодной прокатке тонких полос // Производство горячекатаной и холоднокатаной листовой стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1983. - С. 38-43.

32. Ноговицын А.В., Кузнецов В.В., Парсенюк Е.А. и др. Стабилизация параметров холодной прокатки тонких полос в насеченных валках непрерывного стана // Бюллетень института "Черметинформация". - 1982. - № 17. - С. 50-51.

33. Кузнецов В.В., Масленников В.А., Гринберг Д.Л., Дубовой И.Г., Ноговицын А.В. Оптимизация режимов производства подката для холодной прокатки низкоуглеродистой стали // Сталь. - 1982. - № 12. - С. 58-61.

34. Мелешко В.И., Безнос В.И., Ноговицын А.В. и др. Совершенствование технологии производства подката и процесса холодной прокатки тонких полос на заводе им.Ильича // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1983. - № 2. - С. 15-16.

35. Ноговицын А.В., Мазур В.Л., Парсенюк Е.А. и др. Внедрение оптимальных режимов прокатки полос на непрерывных станах // Бюллетень института "Черметинформация". - 1983. - № 14. - С. 42-44.

36. Ноговицын А.В., Кузнецов В.В., Парсенюк Е.А. Механические свойства динамной стали // Технология производства широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1983. - С. 30-32.

37. Зенченко Ф.И., Ноговицын А.В., Мазур В.Л. и др. Эффективная технология холодной прокатки тонколистовой стали на непрерывных станах // Сталь. - 1985. - № 1. - С. 43-48.

38. Ленский А.Н., Скороход А.Г., Ноговицын А.В. Исследование автоколебаний в главных линиях станов при прокатке в валках с принудительным рассогласованием скоростей // Сталь. - 1984. - № 12. - С. 35-37.

39. Зенченко Ф.И., Сосковец О.И., Баранов В.И., Ноговицын А.В. и др. Особенности технологии прокатки на шестиклетевом стане 1400 // Сталь. - 1985. - № 12. - С. 36-39.

40. Ноговицын А.В., Карагодин Н.Н., Смирнов П.Н. и др. Влияние температурного режима прокатки и охлаждения полос на механические свойства среднеуглеродистой стали // Улучшение качества горячекатаной широкополосной стали: Научные труды МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1987. - С. 52-58.

41. Зенченко Ф.И., Мазур В.Л., Ноговицын А.В. и др. Выбор оптимальной толщины подката для производства холоднокатаных полос // Сталь, 1984, - № 7, - С. 40-44.

42. Приходько И.Ю., Ноговицын А.В., Сафьян А.М. и др. Разработка и опробование двояковыпуклой профилировки рабочих валков тонколистового стана // Депонирована в институте "Черметинформация". - 1990. - № 5413. - 30 с.

43. Приходько И.Ю., Ноговицын А.В., Швецов В.В. и др. Исследование возможностей регулирования плоскостности полос в условиях СБП 2030 НЛМК // Рукопись депонирована в институте "Черметинформация". - 1990. - № 5408. - 16 с.

44. Ноговицын А.В., Приходько И.Ю., Акишин В.В. и др. "Загрузка" последней клетки стана тандем холодной прокатки - эффективный резерв повыше-

ния плоскостности полос и улучшения качества поверхности // Депонирована в институте "Черметинформация". - 1990. - № 5395. - 29 с.

45. Костяков В.В., Ноговицын А.В. Исследование микроструктуры и механических свойств сталей проектного сортамента ШСГП 2500 НЛМК// Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1994. - № 4. - С. 28.

46. Пилюшенко В.Л., Ноговицын А.В. Феноменологическая модель механических свойств проката из низкоуглеродистой микролегированной стали // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : Сборник научных трудов НАН Украины, Киев: Наукова думка, - 1995. - с. 206.

47. Горбунков С. Г., Приходько И.Ю., Ноговицын А.В. Методы расчета обжатия при многопроходной прокатке //Металл и литье Украины. - 1995. - № 6. - С. 23-25.

48. Левченко Г.В.,Ноговицын А.В., Воробей С. Д. Исследование возможности повышения и стабилизации прочностных свойств горячекатаной широкополосной стали // Металл и литье Украины. - 1996. - № 1-2.- С. 41-44.

49. А.с. № 564937, МКИ В 23 К 11/04. Способ сварки горячекатаных полос / А.П.Качайлов, В.Л.Мазур, В.Г.Бойков, А.В.Ноговицын; УПМ (СССР). Оpubл. 1977, Бюл. № 26.

50. А.с. № 732046, МКИ В 21 С 47/00. Способ намотки полосы, выходящей из прокатного стана на барабан моталки/ В.Л. Мазур, В.И.Мелешко, А.И. Добронравов, В.А. Кувшинов, О.Н. Сосковец, А.А. Бибишев, В.И. Тимошенко, А.В. Ноговицын и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1980, Бюл. № 17.

51. А.с. №747900, МКИ С 21 Д 7/04//И 23 К 11/00. Способ обработки сварного шва /В.Л. Мазур, А.И. Добронравов, Л.Г.Тубольцев, А.В. Ноговицын и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1980, Бюл. № 26.

52. А.с. 910244, МКИ В 21 В 27/02. Способ профилирования валков прокатного стана / А.И.Добронравов, В.Л. Мазур, Л.Г.Тубольцев, А.Ф.Кириевич, А.В.Ноговицын и др.; УПМ(СССР). Оpubл. 1982, Бюл. № 9.

53. А.с. № 969339, МКИ В21 В 1/26; В 21 В 27/02. Способ регулирования процесса холодной прокатки полос в валках с шероховатой поверхностью/

В.Л.Мазур, А.В.Ноговицын, В.В.Акишин и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1982, Бюл. №40.

54. А.с. № 995923, МКИ В 21 В 1/22. Способ регулирования процесса прокатки стальной полосы на непрерывном многоклетьевом стане/ П.П. Чернов, В.А. Мазур, А.А. Первухин, В.Л. Мазур, Е.А. Бендер, В.И.Виноградов, В.И.Куликов, А.А.Дитц, Л.Н.Козлов, А.В.Ноговицын; УПМ (СССР). Оpubл. 1983, Бюл. № 6.

55. А.с. № 995951, МКИ В 21 В 45/00. Стан для прокатки слябов/ А.А.Чмелев, Л.Г.Матюха, В.Л.Мазур, А.В.Ноговицын; УПМ (СССР). Оpubл. 1983, Бюл. № 6.

56. А.с. № 997882, МКИ В 21 В 37/10. Способ регулирования охлаждения листового проката/ Е.А.Парсенюк, С.А.Воробей, В.Л.Мазур, В.А.Тригуб, П.П.Чернов, А.В.Ноговицын; УПМ (СССР). Оpubл.1983, Бюл. № 7.

57. А.с. № 1044348, МКИ В 21 В 1/28. Способ непрерывной прокатки полос/ В.Л.Мазур, А.В.Ноговицын, Е.А.Парсенюк и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1983, Бюл. № 36.

58. А.с. № 1178509, МКИ В 21 В 1/22. Способ холодной прокатки полосового металла/ В.Л.Мазур, В.В.Акишин, А.В.Ноговицын и др.; УПИ (СССР). Оpubл. 1985, Бюл. № 34.

59. А.с. № 1248686, МКИ В 21 С 47/00. Способ измерения упругих свойств рулонов полосового проката/ В.В.Костяков, В.Л.Мазур, А.В.Ноговицын; УПИ (СССР). Оpubл. 1986, Бюл. № 29.

60. А.с. № 1268230, МКИ В 21 В 37/00. Устройство управления прокатным станом/ Е.А.Парсенюк, В.Л.Мазур, В.В.Акишин, А.В.Ноговицын и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1986. Бюл. №41.

61. А.с. № 1283255, МКИ С 21 Д 9/46. Способ обработки полос из низкоуглеродистой стали/ А.В.Ноговицын, В.Л.Мазур, А.П.Качайлов и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1987, Бюл. № 2.

62. А.с. № 1447437, МКИ В 21 В 1/28, 37/00. Способ непрерывной холодной прокатки полос со сварными швами/ В.В.Акишин, Е.А.Парсенюк,

П.П.Чернов, В.Л.Мазур, А.В.Ноговицын и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1988, Бюл. № 48.

63. А.с. № 1680396, МКИ 5 В 21 В 27/02. Комплект валков клетки кварто непрерывного полосового стана холодной прокатки/ И.Ю.Приходько, А.В.Ноговицын, А.М.Сафьян и др.; УПМ (СССР). Оpubл. 1991, Бюл. № 36.

Ноговіцин О.В. «Розвиток теорії та удосконалення технології виробництва листового прокату на підставі методів математичного моделювання».

Дисертація на здобуття наукового ступіню доктора технічних наук, за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Державна металургійна академія України, Дніпропетровськ, 1997.

Захищається 1 монографія, 47 наукових робіт і 15 авторських свідоцтв, що містять результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу листового прокатування. Проведено аналіз пластичної текучості металу в зоні деформації, вивчено закономірності контактної взаємодії прокатуваного металу з валками, досліджено нестационарні процеси прокатування штаби, зокрема зі зварними з'єднаннями, визначено вплив технологічних параметрів гарячої прокатки на формування структури та механічних властивостей штабової сталі.

Здійснено промислове освоєння і впровадження режимів виробництва гарячекатаного підкату, холоднокатаної штаби та жерсті на 7 безперервних станах металургійних підприємств. Наведено дані про ефективність цих режимів виробництва.

Ключові слова: листовий прокат, теорія прокатки, зона деформації, пластична текучість, математичне моделювання, метод кінцевих різниць, режими деформації, якість прокату, механічні властивості, управління технологією.

A.V. NOGOVITZYN. "Theoretical development and technological improvement of rolled steel sheets production process based on mathematical modelling technique".

The Dissertation Thesis to be submitted for the degree of Doctor of Technical Science on the speciality 05.03.05 "Processes and machines used in pressure processing technologies".- Mining and Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 1997.

The subject to defence is 1 monograph, 47 scientific publications and 15 author's certificates which contain the results of theoretical and experimental investigations devoted to steel sheets rolling process. The analysis of plastic flow of metal within deformation zone has been performed. The regularities of contact interactions between the metal under rolling and rolling rolls as well as non-stationary rolling processes of metal strip including those welded have been investigated. The effects of parameters of hot rolling process on forming of structure and properties of steel sheets have been disclosed.

On base of above mentioned scientific researches the industrial introduction of pass (reduction) schedules for producing semi-finished hot-rolled products, cold-rolled strips and tinplates have been realized at seven continuous rolling systems of different metal works. The dissertation thesis also includes the data of efficiency of the technological improvements introduced.

Keywords: rolled steel sheets, theory of rolling process, deformation zone, plastic flow, mathematical modelling, finite difference method, reduction schedules, quality of rolled products, mechanical properties, control of technology.

Р87.7С 8А

Ксерокс ДТИ зак. № 1101, т. 50
Авт. отп. 14.05.97 г.

435512

10-27384
AB 37.784

The Dissertation Thesis by its author for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 07.04.01 "Mechanics and mechanics used in pressure processing technology". Mining and Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipropetrovsk, 1977.

The subject of research is a monograph of 17 sheets by publication and 15 author's certificates which contain the results of theoretical and experimental investigations devoted to steel sheets rolling process. The analysis of plastic flow of metal with a delay in time from just been deformed, the effect of various interactions is analyzed. The results of rolling experiments are analyzed on the basis of existing models of metal flow. Various forms of metal flow have been investigated. The effects of parameters of rolling process on the form of metal flow and properties of steel sheets have been described.

The flow of metal in different rolling conditions is analyzed. The introduction of new conditions of rolling for producing semi-finished and rolled products, calculated stress and torque have been realized. The results of rolling of steel sheets of different width, thickness, and starting metal state are given. The effect of rolling of the metal is given. Approximation law is shown.

Keywords: rolling; steel sheets; flow; of metal in process; mathematical model; plastic flow; mathematical modeling; finite difference method; reduction schedules; quality of rolled products; metal flow.

10-27384