

УДК 621. 771. 252. 06
№ держреєстрації 0110U000528
Инв. №

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий
університет”
(Державний ВНЗ „НГУ”)
49005, м. Дніпропетровськ, пр. К.Маркса, 19; тел./факс (0562) 47-32-09;
телекс 143457 « AGAT SU »; E-mail Shevchsergey@gmail.com

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи,
д-р техн. наук, проф.

_____ О.С. Бешта
« ___ » _____ 2011 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУВАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ (заключний) ГП - 436

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доц.

Р.О. Дичковський

Керівник науково-технічного центру
автоматизації технологічних процесів у
гірничому і металургійному виробництві,
науковий керівник теми,
доктор техн. наук

В.М. Куваєв

Рукопис роботи закінчено 8 грудня 2011р.
Результати роботи розглянуті науково-технічною радою.
Протокол № 3 від 12.12.2011р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, головний науковий співробітник, доктор техн. наук	В.М. Куваєв (редагування звіту розділи 1-8)
Головний науковий співробітник, доктор техн. наук	В.В. Ткачов (редагування розділу 7)
Старший науковий співробітник, доктор техн. наук	Т.В. Бабенко (редагування розділу 5)
Провідний науковий співробітник, канд. техн. наук	Ю.П. Карпинський (патентні дослідження, розділи 1,3,6)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук	О.Б. Владико (розділ 1)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук	Я.Г. Куваєв (розділ 8)
Відповідальний виконавець, старший науковий співробітник	Д.О. Іванов (розділи 3,4,7)
Старший науковий співробітник	І.В. Політов (розділ 2,4,6,8)
Науковий співробітник	О.В. Худа (розділ 1,8)
Молодший науковий співробітник	О.О. Бешта (систематизація матеріалів розділів 3,4,7)

Молодший науковий співробітник	Д.О. Бешта (систематизація матеріалів розділу 6)
Молодший науковий співробітник	А.В. Бакутін (систематизація матеріалів розділу 7)
Молодший науковий співробітник	К.В. Уліцький (систематизація матеріалів розділу 5)
Молодший науковий співробітник	Н.Б. Собко (оформлення звіту розділів 1-4)
Технік I категорії	Н.В. Чумакова (систематизація матеріалів розділу 1, оформлення звіту розділів 5-8)
В роботі приймали участь студенти:	Т.Б. Антоненко, К.І. Корніленко, А.В. Сичов , В.В. Твердохлебов
Нормоконтролер	Л.С. Шломіна

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 247 с., 22 рис., 5 табл., 3 додатки, 154 джерела.

Мета роботи – мінімізація енерговитрат на регулювання технологічних режимів сортопрокатних станів, що здійснюється для забезпечення потрібних якісних показників товарного прокату.

Метод дослідження – системний аналіз, аналітичні дослідження і методи багатокритеріальної оптимізації.

На основі аналізу процесів виробництва сортового прокату виявлені загальні закономірності формування споживчих властивостей товарного прокату незалежно від типу прокатного стану. В цілому, оцінка результатів роботи сортопрокатних станів може бути зведена до трьох груп узагальнених критеріїв: критеріїв виконання замовлення, технічних критеріїв та економічних критеріїв.

Відображення узагальнених критеріїв на процеси, що формують споживчі властивості, а саме: на швидкісний режим прокатки, режим прискореного охолодження та термозміцнення прокату, процес розкроювання прокату на стрижні замовленої довжини, дозволило сформулювати критерії управління окремими операціями та групами операцій, які формують показники призначення сортового прокату. Ці критерії формуються відносно параметрів технологічних операцій, для оцінювання яких вони призначені.

Досліджено взаємозв'язок параметрів, що входять до узагальнених систем критеріїв, з параметрами технологічного процесу вироблення прокату. Розроблені і досліджені методики автоматичного вибору режимів: швидкісного режиму прокатки, термозміцнення та розкроювання прокату.

Виконана оцінка енергозаощадження та економічної ефективності при застосуванні автоматичного вибору вказаних режимів виробництва товарного прокату.

СОРТОВИЙ ПРОКАТ, БЕЗПЕРЕРВНІ СТАНИ, ШВИДКІСНИЙ РЕЖИМ ПРОКАТКИ, РОЗКРОЮВАННЯ ПРОКАТУ, ТЕРМОЗМІЦНЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ	11
1.1 Структурний аналіз сортового прокату.....	11
1.2 Аналіз станів, що виробляють сортовий прокат.....	14
1.3 Типи станів і їхня конструкція.....	20
1.4 Тенденції розвитку сортопрокатного виробництва.....	23
1.5 Актуальні технічні і технологічні напрямки виробництва сортового прокату	39
1.6 Системний аналіз виробництва сортового прокату на безперервних станах	46
2 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ	53
2.1 Аналіз вимог стандартів до різних видів сортового прокату	53
2.2 Аналіз техніко-економічних показників виробництва сортового прокату	57
2.3 Аналіз процесів формування споживчих властивостей сортового прокату.....	65
2.4 Розробка критеріїв для оцінювання результатів виробництва сортового прокату	67
3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНИХ СИСТЕМ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ОКРЕМИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ	73
3.1 Аналіз узагальнених критеріїв по пріоритетності їхнього виконання для оцінки результатів виробництва сортового прокату	73
3.2 Система критеріїв для оцінки якості управління швидкісним режимом прокатки	75
3.3 Система критеріїв для управління прискореним охолодженням прокату.....	81

3.4 Система критеріїв для управління виробництвом прокату в стрижнях	90
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВХОДЯТЬ В УЗАГАЛЬНЕНІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ОКРЕМИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ	96
4.1 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління швидкісним режимом прокатки	96
4.2 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління режимом охолодження (термозміцнення) прокату	105
4.3 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління виробництвом прокату в стрижнях	111
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВХОДЯТЬ В УЗАГАЛЬНЕНІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ З ПАРАМЕТРАМИ, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ.....	118
5.1 Параметри, що входять у критерії якості управління швидкісним режимом прокатки.....	118
5.2 Параметри, що входять у критерії якості управління режимом прискореного охолодження (термозміцнення) арматурного прокату.....	136
5.3 Параметри що входять в критерії якості управління розкромом прокату.....	148
6 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОКАТКИ.....	154
6.1 Загальна методика настроювання швидкісного режиму безперервних станів.....	154
6.2 Методика автоматичного настроювання швидкісного режиму двониткового дрібносортового стану.....	156

6.3	Методика автоматичного настроювання швидкісного режиму багатониткового дровового стану.....	159
6.4	Методика визначення параметрів систем автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки в однострункової чорновій групі....	163
6.5	Оцінка енергозбереження при автоматизації швидкісного режиму прокатки.....	174
7	РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ РЕЖИМУ ПРИСКОРЕНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ.....	177
7.1	Стратегія контролю процесу термозміцнення арматурного прокату.....	177
7.2.	Підвищення точності настроювання режиму термозміцнення арматурного прокату електромагнітним методом.....	180
7.3	Технічне забезпечення електромагнітного контролю магнітної фази в прокаті на виході установки термозміцнення.....	190
7.4	Оцінка енергозбереження при автоматичному управлінні процесом термозміцнення арматурного прокату.....	192
8	РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ РЕЖИМУ РОЗКРОЮ ПРОКАТУ.....	194
8.1	Методика оптимізації розкрою прокату як потокового однолінійного процесу.....	194
8.2	Формування технічних критеріїв оптимізації управління розкром прокату	200
8.3	Оцінка енергозбереження при автоматизації розкрою прокату.....	205
	ВИСНОВКИ.....	207
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	215
	Додаток А Звіт про патентні дослідження.....	233
	Додаток Б Витяг з протоколу засідання секції науково-технічної ради.....	244
	Додаток В Рецензія на заключний звіт за темою ГП-436	246
	Додаток В Акт впровадження результатів НДР ГП-436	247

ВСТУП

Сортовий прокат є одним з важливих видів продукції металургійного комплексу України. Тільки один з його видів – арматурний прокат, займає перше місце з усіх видів прокатної продукції, що виробляється в Україні, за експортом.

Різноманіття сортаменту і вимог до властивостей товарної продукції, різноманіття типів станів додають суттєвої складності з автоматизації процесів виробництва сортового прокату. Проблема забезпечення потрібних якісних показників товарного прокату у світі вирішується двома напрямками – через удосконалення технологічного обладнання і автоматизацію технологічних процесів. Провідним напрямком у світовій практиці є удосконалення технологічного обладнання, а автоматизація технологічних процесів, як правило, підпорядкована цьому напрямку. Її основними завданнями є управління окремими агрегатами чи групою агрегатів для забезпечення здійснення технологічного процесу в режимі, який встановлений оператором та його регулюванням для отримання необхідної якості товарного прокату.

Сучасні системи технологічної автоматизації широко застосовують обчислювальну техніку і обчислювальні мережі, але переважно вони залишаються функціонально локальними системами. Питання взаємодії систем через їх вплив на технологічний процес на його суміжних ділянках не розглядалося.

Ще складніша проблема стоїть на діючих, збудованих у минулому столітті, сортопрокатних станах. А в Україні знаходяться в експлуатації, здебільш, такі стани. У поточному столітті тільки планується побудувати нові стани на Дніпровському металургійному комбінаті та в складі металургійного міні-заводу, що в перспективі побудують у м. Біла Церква. На старих станах удосконалення технологічної автоматизації це майже єдина можливість забезпечити конкурентоздатність товарного прокату по його показниках призначення без корінної реконструкції обладнання.

Але ж, крім якісних показників на конкурентоспроможність продукції суттєво впливають і економічні показники виробництва продукції. Одним з таких показників є енерговитрати на регулювання. А такі витрати можуть бути достатньо великими. Так, встановлена потужність тільки прокатних двигунів безперервного дрібно сортового чи дротового стану складає більш ніж 15МВт, тому регулювання їх швидкості в процесі прокатки для забезпечення стабільності поперечних розмірів прокату достатньо енергоємне. Скорочення енерговитрат за рахунок компромісу між якістю, в технічному змісті, і енергоємністю регулювання при технологічній якості, що задовольняє вимогам стандартів, є перспективним напрямком розвитку систем управління швидкісним режимом прокатки.

Таким чином, подальший розвиток автоматизації технологічних процесів сортопрокатних станів повинен забезпечувати не тільки якісні показники товарної продукції, а й враховувати енерговитрати на їх регулювання.

Це потребує розробки принципів автоматизації процесів виробництва сортового прокату, що забезпечують скорочення енергетичних витрат на регулювання технологічного процесу, які пов'язані з потребою отримання необхідної якості товарного прокату.

Пропонується перехід від традиційних підходів до технологічної автоматизації сортопрокатних станів, що ґрунтується на регулюванні і стабілізації окремих контрольованих параметрів, до автоматичного вибору режимів технологічного процесу, при яких мінімізується вплив технологічних збурень на якісні показники товарної продукції, мінімізуються технологічні збурення на окремих виробничих ділянках, що виникають внаслідок регулювання технологічних процесів на суміжних ділянках, і забезпечується найбільш раціональний технологічний режим за енерговитратами на його автоматичне регулювання.

Для вирішення проблеми потрібно дослідити взаємозв'язок якості регулювання та стабілізації параметрів технологічного процесу з якістю товарного прокату і впливом технологічних збурень на цей взаємозв'язок та

обґрунтувати принципи автоматизації, взаємопов'язані критерії управління окремими технологічними процесами виробництва, що мінімізують динаміку автоматичного регулювання технологічного процесу в цілому.

Потрібне максимальне використання можливостей саморегулювання технологічного процесу на окремих ділянках для зменшення потреби у його динамічному регулюванні системами автоматизації і, відповідно, енерговитрат, що пов'язані з таким регулюванням, і мінімізації збурень технологічного процесу, що пов'язані з суб'єктивними чинниками вибору його режиму.

В основу енергозаощаджувальної автоматизації покладено пошук таких взаємопов'язаних технологічних режимів на ділянках виробничого процесу, при яких відсутня, або зведена до мінімуму, потреба в динамічному регулюванні агрегатів та обладнання, що забезпечує технологічний процес. Такі режими мінімізують енерговитрати на автоматичне регулювання, а завданням автоматизації стає автоматичне визначення і настроювання таких режимів.

Визначення сталих технологічних режимів, що потребують їх мінімального динамічного регулювання, повинно бути засновано не тільки на технічних критеріях, але ж і на економічних, а скоріше, на техніко-економічних критеріях. Тоді така автоматизація повинна базуватися на підходах, що застосовуються у методах багатокритеріальної оптимізації.

Тобто, для кожної операції, або групи операцій потрібно визначити такі технічні критерії, які пов'язують параметри цих операцій як з показниками якості товарного прокату, так і з показниками, що характеризують економічну ефективність процесу виробництва прокату.

Але ж самі по собі критерії не забезпечують встановлення таких режимів. Тем більш, що можливо очікувати часткове протиріччя критеріїв оцінювання управління різними операціями. Тому, потрібно визначитися з загальними методиками вибору сталих режимів, що мінімізують вплив таких протиріч на якість управління технологічним процесом в цілому.

По стану виконання НДР за 2010р. був підготовлений проміжний звіт, державний обліковий № 0211U000815.

1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ

1.1 Структурний аналіз сортового прокату

Сортовий прокат характеризується двома невід'ємними ознаками: геометричними характеристиками поперечного перерізу і споживчими властивостями, що у сукупності забезпечують широке застосування сортового прокату в різних галузях промисловості і будівництва.

На підставі аналізу різноманітних ознак сортового прокату, що наведені в [5,16,18-20,43,107,108,112,126,128], можна запропонувати наступну структуру його властивостей.

Геометрично профілі прокату розділяють на профілі з простою формою і фасонні.

До простих профілів відносяться круглі, діаметром від 5 до 250мм, квадратні, з розмірами сторін від 5 до 250мм і смуги товщиною більш 4мм.

До фасонних профілів загального призначення відносяться кутові рівнобокі і нерівнобокі профілі від №2 до №25 з товщиною стінок від 3 до 30мм; двотаврові балки від №12 до №40; швелери від №12 до №40; і шестигранна сталь з діаметром уписаного кола від 8 до 100 мм.

До фасонних профілів спеціального (галузевого) призначення відносяться кругла періодична сталь для армування звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій (арматурна сталь) від №6 до №80 з різною геометрією поперечних виступів (ребер); залізничні рейки від Р8 до Р75; шпунтові профілі різної конфігурації – плоскі, коритні, зетові; спеціальні профілі для віконних і ліхтарних сплетінь промислових будинків, для суднобудування, для електровозо- і вагонобудування й ін.

Споживчі властивості сортового прокату визначаються:

- 1) точністю геометричних розмірів продукції, що задаються відповідними стандартами й іншими нормативними документами, а можливість їхнього виконання залежить від технічних і технологічних характеристик устаткування конкретного прокатного стану;

2) маркою (номінальним хімічним складом) сталі, з якої виготовляється даний сортамент прокату;

3) механічними й іншими спеціальними властивостями готового прокату, що також нормуються. Можливість їхнього виконання залежить не тільки від марки сталі, але й від технології виробництва прокату.

По основних властивостях і області застосування марки сталі розділяють на:

- сталь конструкційну;
- сталь інструментальну;
- сталь і сплави зі спеціальними фізичними властивостями;
- сталі для зварювальних і наплавочних матеріалів;
- прецизійні сплави.

У свою чергу, кожна група сталей розділяється на підгрупи.

Конструкційна сталь підрозділяється на сталь:

- звичайної якості загального призначення;
- конструкційну для транспорту;
- конструкційну низьколеговану (для конструкцій, що зварюються, і арматурну);
- конструкційну якісну (ресорно-пружинну, автоматну, теплотривку, підшипникову).

Інструментальна сталь підрозділяється на сталь:

- вуглецеву;
- леговану;
- швидкорізальну.

Сталь і сплави зі спеціальними фізичними властивостями підрозділяються на сталь:

- електротехнічну (з нормованої коерцитивною силою і з нормованими магнітними втратами);
- корозійностійку;

- жаростійку;
- гідроміцну;
- з іншими спеціальними властивостями.

Сталь для зварювальних і наплавочних матеріалів підрозділяється на сталь:

- для наплавочного дроту;
- для наплавочної стрічки.

Прецизійні сплави підрозділяються на сплави:

- с високим електричним опором;
- магнітотверді;
- магнітом'які;
- с заданим коефіцієнтом розширення;
- с заданими властивостями пружності.

По хімічному складу сталь розділяється на вуглецеву (нелеговану) і леговану. У вуглецевій сталі вміст хімічних елементів не повинен перевищувати в %: Si-0,4; Mn-0,8; AC-0,12; Ti-0,15; Cr-0,3; Cu-0,3; N-0,08. У низьколегованій сталі зміст вуглецю не повинний перевищувати 0,25%, у середньовуглецевій – знаходиться в межах від 0,25% до 0,6%, у високовуглецевій – перевищує 0,6%.

У леговану сталь вводиться один або кілька легуючих елементів для додання продукції визначених фізико-механічних властивостей:

- низьколегована сталь легується одним елементом при вмісті його не більш 2% (по верхній межі) або декількома елементами при їхньому сумарному вмісті 3,5% (по верхній межі);
- середньолегована сталь легується одним елементом при вмісті його не більш 8% (по верхній межі) або декількома елементами при їхньому сумарному вмісті, як правило, не більш 12% (по верхній межі);

– високолегована сталь сумарно містить не менш 10% (по нижній межі) легуючих елементів при вмісті одного з елементів не менш 8% (по нижній межі) і при вмісті заліза більш 45%.

Сплави містять, як правило, менш 45% заліза і по основному легуючому елементу – нікелю можуть бути нікелеві, залізонікелеві, безнікелеві або мати інші основи легування.

Крім усього, по вмісту шкідливих домішок – сірки і фосфору, сталь підрозділяється на сталь звичайної якості з роздільним змістом цих домішок не більш 0,05-0,055%, сталь якісну зі вмістом S і P не більш 0,04-0,045% і сталь високої якості зі вмістом S і P не більш 0,03-0,035%.

Технологія виробництва прокату, що обумовлює, крім хімічного складу, його хімічні й інші споживчі властивості, визначаються, в основному, температурними режимами нагрівання, прокатки, охолодження і термообробки.

1.2 Аналіз станів, що виробляють сортовий прокат

Сортові стани спеціалізуються по виду продукції, що випускається, а класифікація по розміру і виду профілів, що прокатуються, у багатьох випадках є також класифікацією по розміру стану. Розмір стану визначається діаметром робочих валків випускаючої (чистої) кліті (мм) [4,28,43,79,86,126,128,140].

На рейкобалкових станах 750-900 прокатують рейки для широкої колії, великі балки висотою від 240 до 600мм і більш і інші важкі профілі.

На великосортних станах 500-750 прокатують великі профілі: сталь круглу і квадратну від 80 до 150мм, балки і швелери висотою від 120 до 240мм, кутову сталь з полками від 150 до 200мм і інші.

На середньосортних станах 350-500 прокатують середні профілі: сталь круглу і квадратну від 40 до 80мм, балки і швелери висотою до 120мм, кутову сталь з полками від 50 до 100мм і інші.

На дрібносортних станах 250-350 прокатують дрібні профілі: сталь круглу і квадратну від 8 до 40мм, кутову сталь з полками від 20 до 50мм, смугу шириною від 12 до 120мм, арматурну сталь від №12 до №32 і інші.

На смугових (штрипсових) станах 300-400 прокатують смуги шириною від 65 до 500мм і товщиною від 1,5 до 10мм.

На дротових станах 150-250 прокатують дріт (катанку) діаметром від 5 до 10мм, арматурну сталь від №8 до №10.

На сортових станах прокатують як вуглецеву, так і леговану сталь.

Більшість марок легової конструкційної сталі мають високі пластичні властивості, і опір деформації в багатьох з них при високих температурах майже такий же, як і у вуглецевій конструкційній сталі.

Тому, сорт з заготовки цієї сталі прокатують у багатьох випадках по тим же калібруванням, по яких прокатують вуглецеві конструкційні сталі.

У той же час, високий вміст спеціальних елементів, додаючи легової сталі високі спеціальні властивості, ускладнюють технологію її обробки.

Так, наприклад, пред'являються жорсткі вимоги до режиму нагрівання заготовок, температурного режиму прокатки і режимам обтиснень. У деяких випадках застосовують проміжних підігрів напіврозкатів. Після прокатки сталь піддають уповільненому контрольованому охолодженню або ізотермічному відпалюванню в термостатах, колодязях або печах.

Основними технологічними операціями при виробництві усіх видів сортового прокату є:

- нагрівання заготовок під прокатку;
- власне прокатка заготовок до кінцевих розмірів готової продукції;
- охолодження (термообробка) готового прокату;
- обробка й упакування продукції.

Ці основні операції, у свою чергу, у залежності від спеціалізації стану і сортаменту прокату, підрозділяються на допоміжні технологічні операції, що у сукупності й у різних сполученнях визначають структуру і склад устаткування стану.

Аналіз літературних джерел [6,7,15,55,79,95,96,118,139] дозволяє представити сукупність можливих технологічних операцій при виробництві сортового прокату у виді багатоваріантної схеми, приведеної на рис.1.1.

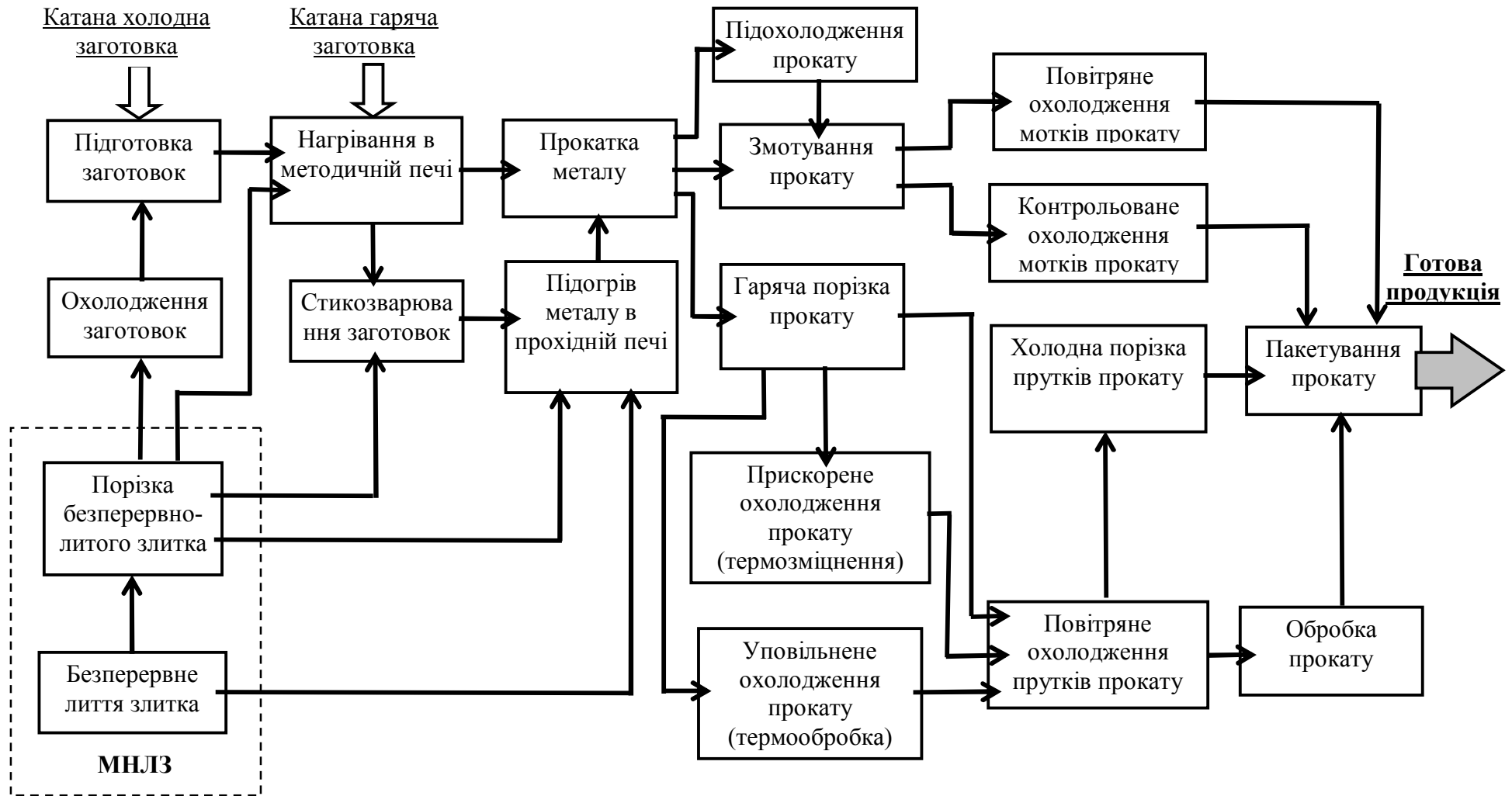


Рисунок 1.1 – Багатоваріантна поточна схема основних технологічних операцій виробництва сортового прокату

Підготовка початкових заготовок під прокатку складається у вилученні з їхньої поверхні різних дефектів, які, як правило, не усуваються в процесі наступної прокатки. Може здійснюватися вибіркове або суцільне зачищення вогневим, абразивним, фрезерним або іншим методами, які залежать від вимог до металопродукції і від властивостей сталі.

Підготовлені заготовки однієї плавки збирають у пакети і розміщують на завантажувальних решітках нагрівальної печі.

Нагрівання заготовок під прокатку повинне забезпечити необхідну пластичність сталі при деформації у валках клітей при оптимальній витраті енергії. Температура нагрівання для різних сталей неоднакова, усе різноманіття режимів нагрівання визначається відповідними технологічними інструкціями. Печі обладнані пристроями для завантаження, вивантаження і переміщення заготовок у печі.

За різними оцінками, витрати енергії на нагрівання заготовок при холодному посаді в піч складає до 70-80% від сумарної енергії на виробництво готового прокату. Тому на сучасних станах при близько розташованих МНЛЗ застосовують гарячий посад заготовок. При температурі посаду вище 650⁰С питома витрата енергії на нагрівання знижується в порівнянні з холодним посадом більш ніж на 50%.

Прокатка здійснюється обтисненням початкової заготовки у валках послідовно розташованих клітей стану у відповідності зі схемою калібрування для даного профілю. Звичайно заготовку прокатують з початковою температурою видачі з печі, однак, для деяких легованих марок сталей потрібен проміжний підігрів. Сортові прокатні стани відрізняються значною різноманітністю по схемах розташування і складу устаткування, що викликано не тільки спеціалізацією по виду продукції, але і наявністю в експлуатації станів декількох (2–3х) поколінь, введених у лад за період більш 60 років.

Гаряче різання здійснюється для поділу прокатої на стані заготовки на прутки визначеної довжини при виробництві довгомірної продукції. При цьому застосовуються як летучі ножиці різних конструкцій для простих і дрібних

профілів (коло, смуга, куточок), так і пили гарячого різання для складних і великих профілів (рейки, балки, швелери).

Повітряне охолодження прутків після гарячого різання, в основному, здійснюється на відкритому повітрі на шлеперах, рейкових холодильниках або в стелажках. Метал, що остигає, переміщують поперек холодильника до наступної технологічної операції – різанню на замовлені довжини.

Уповільнене охолодження прутків застосовують для високолегованих і спеціальних сталей і сплавів для додання їм необхідних властивостей. Це охолодження здійснюють у прохідних печах, опалювальних і неопалюваних колодязях по спеціальних температурно-часових графіках.

Прискорене охолодження розкатів застосовується для термомеханічного зміцнення арматурних профілів з низьколегованих сталей з метою додання їм необхідних міцнісних і пластичних властивостей. Прискорене охолодження здійснюють водою високого тиску в спеціальних прохідних форсунках безупинно в процесі переміщення розкатів.

Холодне різання прутків на стрижні мірної довжини, обумовлені замовленням або стандартом здійснюється на ножицях або пилах холодного різання. Як і при гарячому різанні, застосовуване устаткування залежить від форми і розміру профілів, що розрізаються.

Обробка стрижнів прокату складається в доданні їм зовнішньої форми відповідно до вимог стандарту або замовлення. До обробки відноситься виправлення стрижнів на роликівих машинах або пресах (прутки, рейки, балки, швелери), а також спеціальна обробка кінців рейок (торцівка, свердління кріпильних отворів, загартування) і ін.

Пакування готового прокату складається в наборі, зважуванні, обв'язці й упакуванні стрижнів або мотків прокату в пакети по заданій кількості або по масі для відвантаження споживачеві.

Змотування гарячого прокату з цільної заготовки без поділу застосовується для зменшення габаритів готової продукції. Штрипс, що поставляється у рулонах, змотується (звертається) на зверточних машинах з горизонтальною

або вертикальною віссю. Дрібний сорт, що поставляється в мотках, змотується на моталках з вертикальною віссю типу Гаррета. Катанка або змотується в мотки на моталках з вертикальною віссю типа Еденборна, або за іншою технологією, спочатку розсіюється виткоукладачем на стрічку, що рухається, для охолодження, а потім збирається в мотки й опресовується (технологія Стелмор).

Повітряне охолодження мотків і рулонів здійснюється на конвейєрах різних конструкцій, що відводять – ланцюгових, гачкових, пластинчастих – для природного охолодження прокату на відкритому повітрі.

Підохолодження дрібного сорту і катанки перед змотуванням застосовують для досягнення температури початку розпаду аустеніту і зменшення розмірів зерен макроструктури в сталі. Підохолодження здійснюють у прохідних трубчастих провідках водою високого тиску.

Контрольоване охолодження катанки в розсіяних витках на транспортері, що відводить, (Стелмор-процес) застосовують для додання катанці заданої мікроструктури і пластичних властивостей. Здійснюється в повітряному (або газовому) потоці за допомогою секції вентиляторів з регульованим витрачанням.

Стикозварювання гарячих заготовок звичайної довжини в «безкінцеву» заготовку застосовують як для реалізації процесу «безкінцевої прокатки» при нагріванні заготовок у методичній печі, так і в литейно-прокатних агрегатах (ЛПА) при надходженні гарячих заготовок з МНЛЗ. Відомі конструкції стаціонарних і летучих стикозварювальних машин.

Прохідна піч служить для вирівнювання температури звареної «безкінцевої» заготовки по довжині і перетину при задачі її у вхідну кліть стану.

Підігрів заготовки здійснюється газовими пальниками або електроіндукційними нагрівачами. Передбачаються також печі - накопичувачі для узгодження продуктивності МНЛЗ і стану, а також – на випадок непередбачених затримок.

Застосовують технологію ЛПА з прокаткою безперервнолитих заготовок збільшеної довжини, а також – пряме сполучення МНЛЗ і стану.

1.3 Типи станів і їхня конструкція

Сортові стани класифікують по ряду ознак: діаметру валків чистової кліті, розташуванню клітей, сортаменту профілів, що прокатуються, специфікації стану, принципу ведення технологічного процесу прокатки.

На рис. 1.2 представлені схеми розташування робочих клітей на станах різного типу.

По розташуванню клітей стани розділяють на лінійні, з послідовним розташування клітей на декількох паралельних лініях (рядах), з послідовним розташування клітей на одній лінії.

У станах з вільною прокаткою розкат у процесі прокатки знаходиться тільки в одній кліті. У безперервних станах з послідовним розташування клітей розкат у процесі прокатки може знаходитися в декількох клітях (у двох і більше).

Лінійні стани містять декілька робочих клітей (від двох до п'яти), розташованих в одну лінію, які приводяться в обертання одним двигуном через загальну шестеренну кліть. Недоліком цих станів є неможливість збільшувати швидкість прокатки в міру збільшення довжини розкату і незручності, зв'язані з поперечним переміщенням розкату з однієї кліті в іншу.

Для часткового усунення першого недоліку застосовують кілька ліній (від двох до чотирьох), послідовно (ступінями) розташованих по ходу прокатки .

Стани з послідовним розташування клітей на декількох паралельних лініях (рядах) звичайно застосовують для прокатки великосортної і середньосортної сталі. На цих станах переміщення розкату з лінії в лінію здійснюється послідовно-зворотним способом шлеперами (стани кросс – коунтрі) або косими рольгангами (шахові стани). Число робочих клітей дорівнює числу проходів (по калібруванню), і метал у кожній кліті пропускається тільки один раз (вільна прокатка).

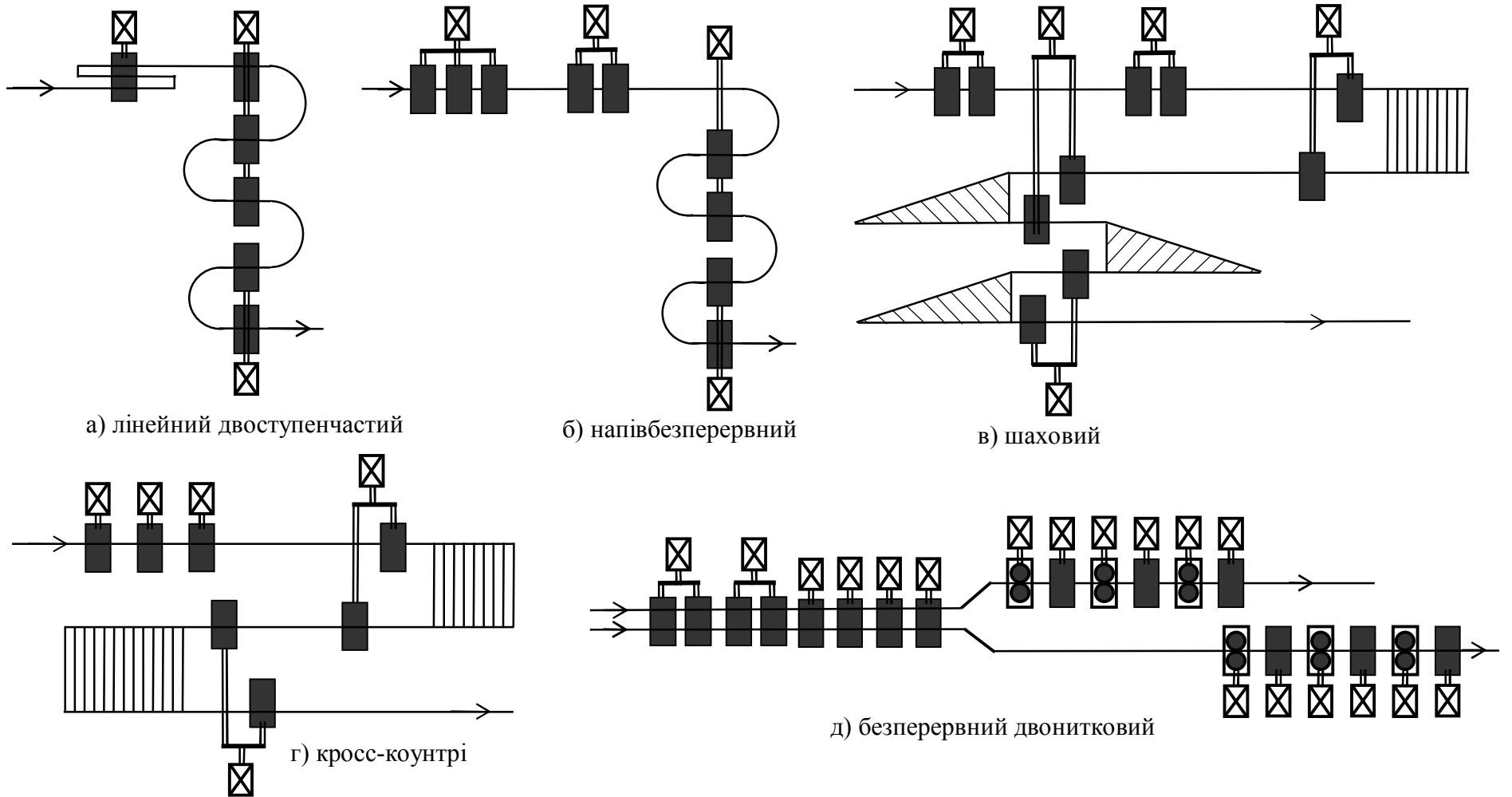


Рисунок 1.2 – Типи сортових прокатних станів по схемах розташування робочих клітей

Швидкість прокатки в клітях послідовно підвищується в міру збільшення довжини розкату, відповідно збільшується і відстань між клітями або довжини розкатних полів.

Стани з послідовним розташування клітей в одній лінії – безперервні стани – мають найбільш високу продуктивність. Число робочих клітей дорівнює числу проходів (по калібруванню), відстань між клітями звичайно значно менше довжини розкату, що одночасно прокатується в декількох клітях. Діаметр і число обертів валків установлюють за умови рівності секундних обсягів металу в кожній кліті. Привод безперервних станів може бути груповим від одного двигуна через загальний редуктор; індивідуальним – від двигуна з регульованою частотою обертання; і - змішаним.

Недоліком безперервного стану є більш важке настроювання і більш складний перехід з прокатки одного типорозміру прокату на іншій, тому вони застосовуються для прокатки щодо відносно вузького сортаменту – сорту і катанки.

Для прокатки більш складних профілів (куточки, швелери й ін.) застосовують напівбезперервні стани. Безперервне розташування клітей застосовують в обтискних і чорнових клітях, а проміжні і чистові кліті розташовуються лінійно або ступінями.

Безперервні стани можуть бути одно- і багатонитковими, коли в чорновій групі одночасно прокатується кілька заготовок (2 або 4 нитки), а потім ці заготовки прокатуються по одній нитці в 2-х або 4-х паралельно розташованих чистових групах клітей.

Останнім часом одержали поширення комбіновані стани, продукція яких містить сортамент декількох типів станів. Вони можуть бути дрібносоротно-дротові, дрібносоротно-полосові, дрібносоротно-дрото-полосові. По розташуванню устаткування комбіновані стани можуть бути цілком безперервними або мати напівбезперервну сортову і безперервну дротову групу. Розташування комбінованих станів таке, що з групи клітей можна видати готову продукцію різного розміру.

Комбіновані стани широкого сортаменту дозволяють перенастроювати одну з груп клітей під час прокатки в інших клітях. Ці стани знаходять застосування при прокатці легованих сталей і профілів підвищеної точності.

Рейкобалкові стани – це стани з вільною прокаткою, кліті яких звичайно розташовані послідовно в 2-х або більш рядах (лініях).

На великосортних станах застосовують розташування клітей двох типів: ступінчасте (2 і більш ліній), послідовне (кросс-коунтрі).

На середньосортних станах застосовують наступне розташування клітей: ступінчасте (2 або 3 лінії), послідовне (кросс-коунтрі, шахове), напівбезперервне, безперервне.

Дротові стани поділяються на три основні групи: ступінчасті, напівбезперервн і безперервні.

1.4 Тенденції розвитку сортопрокатного виробництва

У світовій практиці сортопрокатного виробництва широке поширення одержали безперервні стани, що дозволяють забезпечити високу продуктивність і низькі енерговитрати на прокатку і володіють цілою низкою переваг у порівнянні з іншими типами станів. Це:

- регульований швидкісний режим по клітях окремо і по стану в цілому, що забезпечується індивідуальним приводом клітей, дозволяє істотно збільшити швидкість прокатки, а отже, підвищити продуктивність стану;

- скорочення часу перевалок за рахунок заміни клітей, раніше підготовлених на стенді, дозволяє підвищити використання номінального часу роботи стану;

- нетривалість пауз між суміжними заготовками дозволяє збільшити використання фактичного часу роботи стану;

- розкат одночасно знаходиться в декількох клітях, що дозволяє значно скоротити довжину стану.

Разом з тим, зміна умов роботи в галузі, приватизація металургійних підприємств, значне збільшення обсягу експортованої продукції і підвищення

вимог до її якості, викликали необхідність розробки нової серії сортопрокатних цехів, концепція яких враховує як раніше прийняті і підтверджені практикою технологічні рішення, так і рішення, викликані підвищенням вимог до організації виробництва [17].

До цих вимог необхідно віднести: організацію виробництва продукції, конкурентноздатної на світовому і вітчизняному ринках; високий рівень якості готового прокату по механічних властивостях, точності профілю, стану поверхні, масі мотка, товарному виду; широкий розмірний і марочний сортамент продукції в мотках і прутках для задоволення вимог ринку і забезпечення прибутковості в умовах ринкової кон'юнктури, що змінюється; високий вихід придатного; зниження енерго-, матеріало- і трудомісткості виробництва; маневреність і гнучкість прокатного стану з можливістю випуску малотоннажних партій прокату; скорочення виробничого циклу і витрат на виробництво; можливість поетапного будівництва і введення проектної потужності.

Крім того, однією з основних вимог є забезпечення екологічно чистого виробництва, сприятливі умови праці обслуговуючого персоналу і прийнятний рівень капітальних витрат.

У цьому зв'язку, при проектуванні сортопрокатних цехів, у даний час, дотримують наступної концепції.

1. Поряд з високопродуктивними станами, що продовжують будувати країни, що розвиваються, (Китай, Індія, Таїланд, Південна Корея, Бразилія) і які мають право на існування в умовах великих підприємств, у перспективі інша частка сортопрокатних цехів, що споруджуються, буде мати середній рівень продуктивності навіть в умовах досяжних у даний час максимальних технічних параметрів. Наприклад, цілком можливо побудувати двонитковий дрововий стан з річним обсягом виробництва 1,1-1,2 млн. тонн з урахуванням досягнутої швидкості прокатки 110 м/с. Разом з тим економічно обґрунтованим може бути і дрововий стан продуктивністю 400-600 тис. т., а для деяких умов - і з меншим обсягом виробництва. Дрібносортні і дрібносортно-середньосортні стани в

даний час проектується для рівня виробництва 1-1,2 млн. т/рік. Однак, економічно обґрунтованим може бути і стан того ж призначення, але з технологічними параметрами для обсягу виробництва 300-600 тис. т. і менше. На станах зі зниженою продуктивністю повинне бути забезпечене застосування найбільш передових технологій і устаткування для одержання широкого сортаменту продукції високої якості.

2. У виробництві катанки і дрібного сорту – перехід на стани з одноститковою прокаткою без кантування. Одноститковий стан у порівнянні з двоститковим забезпечує випуск продукції з більш точним профілем і більшою стабільністю механічних властивостей по довжині прокату в мотку або прутку, має більший вихід придатного. У зв'язку з відсутністю кантування – скручування заготовлі між чорновими і проміжними клітьми створюються найкращі умови для одержання високої якості поверхні готового прокату.

3. Низькотемпературне нагрівання початкової заготовки і низькотемпературна прокатка на безперервних дрібносортих, дрібносортно-середньосортих і дротових станах. Зі зменшенням нагрівання заготовки з 1100-1150⁰С до 900⁰С зменшується втрата тепла металом у клітьх чорнової групи, що свідчить про раціональність низькотемпературного нагрівання.

4. Контрольована прокатка конструкційних і високолегованих сталей на дрібносортих і дротових станах.

Звичайна прокатка здійснюється в зоні стабільного аустеніту при температурі 950-1150⁰С з одержанням рекристалізованого металу, а визначений рівень механічних властивостей, при необхідності, досягають у результаті наступної термообробки в спеціальних відділеннях.

Контрольована прокатка, тобто прокатка з регульованою температурою деформації, передбачається для наступних чотирьох випадків:

- прокатка ряду високолегованих сталей і сплавів у визначеному діапазоні припустимих мінімальних і максимальних температур (наприклад, не нижче 850-900⁰С и не вище 1000⁰С). Це досягається регулюванням швидкості прокатки або підохолодженням металу в процесі прокатки;

- прокатка аустенітних корозійностійких сталей із загартуванням аустеніту і використанням тепла прокатного нагрівання – з температури прокатки 1050°C (для запобігання випадання карбїду хрому) до температури нижче 400°C . Це досягається шляхом контролювання температури розкату в лінії стану для запобігання його переохолодження і прискореного охолодження металу після прокатки. При цьому виключається додаткова термообробка з окремого нагрівання для одержання структури загартування;

- прокатка конструкційних сталей з одержанням структури нормалізації з прокатного нагрівання. Чистова прокатка ведеться в зоні стійкого аустеніту, але в області знижених температур – $850-900^{\circ}\text{C}$ (нормалізаційна деформація). Після прокатки метал цілком рекристалізований. Додаткова термообробка не потрібна;

- прокатка конструкційних сталей з поліпшенням механічних властивостей, тобто з одержанням дрібнозернистої структури в сполученні з оптимальними показниками міцності і в'язкості. Це забезпечується шляхом проведення 30%-ої заключної деформації в зоні нестабільного аустеніту при $750-850^{\circ}\text{C}$ (ТМО), а за чистовий кліттю здійснюється прискорене охолодження до 650°C для запобігання рекристалізації в аустенітній області. У результаті виключається наступна термообробка поза потоком стану або скорочується її цикл.

5. Значне підвищення маси початкової заготовки – до 1-1,5 т для високолегованих сталей на дрібносортих і дровових станах, до 2,5-3 т на дровових станах, до 2-4,5 т на дрібносортих і дрібносоротно-середньосортих станах, до 5-6 т на середньосоротно-балочних станах. Це стабілізує процес прокатки і якість продукції, підвищує вихід придатного, особливо при виробництві мотків.

6. Технологічне з'єднання сортопрокатного стану з установкою безперервного розливання сталі і створення сполучених сталеплавильно-прокатних міні-комплексів (модулів). Це забезпечує значне поліпшення

економіки й екології виробництва в результаті зниження енерго-, трудо- і капиталоемності, а також скорочення виробничого циклу.

Крім того, виконані розробки міні-комплексу для рівня продуктивності по готовому прокату 65-550 тис. т/рік. Склад його устаткування включає одну електропіч ємністю 12-100 т, одну МНЛЗ із числом потоків від одного до чотирьох і сортопрокатний стан, що працює на безперервнолитій заготовці одного перетину – від 100x100 до 180x180 мм. Робота прокатного стану передбачається в сполученому режимі з МНЛЗ. Від МНЛЗ заготовка надходить з розрахунковою температурою серцевини 1100⁰С, поверхні – 1000⁰С и кутів – 900⁰С, з перепадом температури на передньому і задньому кінцях 100⁰С. Після стабілізуючого підігріву температура заготовки по перетину і довжині складає 900⁰С, що відповідає низькотемпературній прокатці. Завдяки застосуванню компактної чорнової групи заготовка прокатується на цій ділянці стану практично без зниження температури. Прокатка здійснюється без кантування розкату між проходами в горизонтальних і вертикальних клітках, що чергуються, з регульованим натягом у чорнових і проміжних клітках і з петлеутворенням у чистовій групі. Швидкість прокатки передбачається такою, щоб швидкість входу заготовки в першу кліть була трохи більше, ніж загальна швидкість надходження заготовок від МНЛЗ.

З урахуванням викладеної концепції для різних замовників на різних стадіях проектування розроблена нова серія сортопрокатних станів:

- однопіткові дротові стани продуктивністю 300-600 тис. т/рік для виробництва мотків масою 1,5-3 т;
- двопітковий дротовий стан продуктивністю 1-1,2 млн. т/рік для виробництва мотків масою 2,5-3 т;
- однопіткові дрібносортні і дрібносортно-середньосортні стани широкого розмірного і марочного сортаменту продуктивністю 200-600 тис. т/рік;
- однопітковий дрібносортний стан для виробництва широкого діапазону арматурної сталі в прутках продуктивністю до 1 млн. т/рік;

- полуторанитковий дрібносортно-середньосортний стан сполученої прокатки для конструкційних вуглецевих і легованих сталей у мотках і прутках продуктивністю до 1-1,3 млн. т/рік;

- дрібносортно-дротові стани широкого розмірного і марочного сортаменту продуктивністю 100-300 тис. т/рік;

- сполучений міні-комплекс із дрібносортно-дротовим станом продуктивністю 100 тис. т/рік, спроектований з можливістю поетапного розвитку виробництва, розширення сортаменту і нарощування обсягу випуску прокату в 1,5-2 рази. Сортамент готової продукції включає катанку і круглі профілі діаметром 5,5-20 мм, арматурні профілі класів А-I-A-IV №№6-18, а також широкий діапазон круглих профілів діаметром 10-40 мм з вуглецевих сталей звичайної якості і конструкційних, низьколегованих, легованих конструкційних сталей. Робота комплексу передбачена в сполученому режимі з МНЛЗ з повністю прямою прокаткою, із застосуванням низькотемпературної і контрольованої прокатки, термозміцненням арматурних профілів високих класів;

- сполучений міні-комплекс із дротовим станом продуктивністю 500-600 тис. т/рік з можливістю поетапного розвитку і розширення сортаменту готової продукції. Він призначений для виробництва катанки і круглих профілів діаметром 5,5-25 мм у мотках масою 2,5-3 т.

Також у даний час значно підвищився попит на сортовий прокат простих перетинів [17,55]. У цьому зв'язку були запропоновані технічні рішення, спрямовані на мінімізацію витрат енергоресурсів для його виробництва.

Новим напрямком розвитку виробництва сортового прокату є створення дрібносортнопрокатних передільних заводів у районі дії великих машинобудівних і ряду металургійних заводів.

Економічну основу такого виробництва прокату складає мінімізація паливно-енергетичних витрат і транспортних витрат. При цьому витрати на збір і підготовку відходів для прокатки на відповідних станах істотно нижче у порівнянні з витратами на одержання рідкої сталі і її розливання.

Перший в Об'єднаних Арабських Еміратах (ОАЕ) металургійний комплекс, що складається з міні-заводу й установки прямого відновлення заліза, споруджений фірмою ЕІС (Emirates Iron Industries Co.) – колишньої EISF (Emirates Iron Steel Factory) у промисловій зоні Абу-Дабі [91]. Устаткування нового комплексу поставлено, змонтовано «під ключ» і введено в експлуатацію фірмою «Danieli».

До складу нового заводу входять наступні основні компоненти:

- установка прямого відновлення заліза продуктивністю 1,6 млн. т/рік;
- сталеплавильний цех з відділенням безперервного лиття продуктивністю 1,4 млн. т/рік;
- високопродуктивний сортовий стан з річним обсягом виробництва 620 тис. т;
- високопродуктивний дрібносоротно-дротовий стан з річним обсягом виробництва 480 тис. т.

Новий сталеплавильний цех і відділення безперервного лиття виробляє для сортопрокатних цехів заготовку квадратного перетину зі стороною 130 і 150 мм, довжиною 12 м. Сталеплавильний цех максимально використовує гарячий метал прямого відновлення, одержуваний на установці, що входить до складу комплексу.

На високопродуктивному сортовому стані випускають круглі арматурні профілі діаметром 8-12 мм, довжиною 6-18 м, що поставляються в пакетах. Дрібносоротно-дротовий стан виробляє катанку діаметром 5,5-8 мм і арматурні профілі діаметром 8-16 мм, що поставляються в мотках масою 2т.

Новий високошвидкісний сортовий стан розміщений поруч з дрібносоротно-дротовим станом у паралельному прольоті, що забезпечує найкращі можливості подальшої модернізації і підвищення продуктивності обох станів.

Підігрів заготовок здійснюють у печі з крокуючими балками продуктивністю 120 т/ч.

Основною особливістю нового дрібносортового стану є висока швидкість прокатки профілів малого діаметра (до 38 м/с), що надходять двома нитками на холодильник через здвоєний жолоб.

Дрібносоротно-дротовий стан складається з 16 горизонтальних/вертикальних клітей і десятиклітьового високошвидкісного блоку чистових клітей останнього покоління.

На завершальній стадії виробництва за чистовими блоками розташована лінія водяного охолодження, де прокат прохолоджують до необхідної температури перед входом у виткоутворювач.

Рольганг для охолодження витків катанки обладнаний пристроями примусового й уповільненого охолодження, а також комбінованими швидко розвантажувальними обертовими колодязями для оптимального формування компактних мотків.

Уральська гірничо-збагачувальна компанія (УГМК) вибрала фірму «Danieli» як постачальника устаткування для свого нового міні-заводу, що споруджується в Тюмені [12].

Новий завод, введення в експлуатацію якого запланований на кінець 2008 р., дозволить УГМК переробляти брухт і випускати щорічно 550 тис. т спеціального сортового прокату, з обробкою в холодному стані. У виробничий цикл увійдуть усі переділи – від підготовки брухту до виплавки сталі, позапечної обробки, лиття сортової заготовки, її огляду і зачищення, гарячої прокатки, потокової термообробки й обробки готової продукції в холодному стані поза основною виробничою лінією.

На цьому міні-заводі реалізують усі новітні технології, він буде укомплектований високотехнологічним устаткуванням для виплавки сталі, її розливання, контролю якості, гарячої прокатки й обробки сортового прокату зі спеціальних сталей у холодному стані.

Прокатний стан, розрахований на річне виробництво 550 тис. т прутків зі спеціальних і конструкційних сталей (з розрахунком на майбутнє виробництво катанки і прокату в мотках) має наступні особливості:

- різноманітний розмірний і марочний сортамент;
- максимальну ефективність і експлуатаційну гнучкість;
- високі виробничі показники і продуктивність стану при низьких витратах на переробку;
- високу якість і однорідність кінцевої продукції, що досягаються за рахунок оптимального використання устаткування для потокової термообробки.

До складу прокатного стану входять наступні ділянки:

1. Нагрівальна піч із крокуючим подом фірми «Danieli Centro Combustion» з номінальною продуктивністю 100 т/год. Піч прямо зістикована з МНЛЗ для роботи в режимі гарячого посаду з метою зниження витрати енергії, збільшення виходу придатного, скорочення конверсійних витрат і витрат на транспортування заготовок.

2. Пристрій для збивання окалини з заготовок на виході з печі.

3. Новітня система EWR безкінцевої прокатки зі зварюванням. Експлуатація систем EWR підтвердила її надійність і позитивний вплив на ефективність роботи прокатного стану, виробничу потужність і виробничі витрати.

4. Високошвидкісна чорнова група з чотирма безстаниними клітьями.

5. Чотирнадцятиклітьова проміжна, передчистова і чистова групи з безстаниними клітьями і чергувальним горизонтальним і вертикальним розташуванням валків обладнана механізмами для швидкої перевалки.

6. Трьохвалковий редуційно-калібровочний чотирьохклітьовий блок в якості оздоблювальної групи для прутків дозволяє забезпечити високу якість продукції, високу ефективність роботи стану в цілому і зниження виробничих витрат.

7. Лінія загартування і самовідпуску на виході з кліті №18 призначена для потокового загартування і самовідпуску періодичних профілів з високоміцних і високопластичних сталей. У порівнянні з виробництвом прокату з мікролегованих або низьколегованих сталей процес загартування з

самовідпуском дає істотну економію витрат по переробці і призначений для виробництва прокату з низьковуглецевої сталі.

8. Камери водяного охолодження, розташовані до - і після редуційно-калібровочного блоку, призначені для завдання і контролю необхідної температури прокату перед останніми проходами, створюючи тим самим умови для потокової термообробки широкого марочного сортаменту (наприклад, контрольованої або низькотемпературної прокатки).

Процес низькотемпературної прокатки, що полягає в деформації при низькій температурі, дозволяє оперативно контролювати розмір зерна і технологічні властивості прутків з якісної сталі, що в підсумку дає більш високу якість готової продукції.

До фінішних агрегатів, розташованих на виході, відносяться багатопотокова правильна машина, стаціонарні ножиці, абразивна дискова пила для потокової обробки й остаточного різання продукції, а також дільниця підрахунку й обв'язки прутків і магнітний укладальник.

Міні-завод компанії УГМК - типовий приклад сучасного виробництва сортового прокату зі спеціальних сталей, що характеризується високою ефективністю і якістю готової продукції.

Необхідно відзначити, що за кордоном будівництво багатониткових сортопрокатних станів з великою кількістю робочих клітей, що вимагає значних капіталовкладень, практично припинилося в зв'язку з обмеженим обсягом продажу металопродукції [146]. В основному, використовують відносно невеликі стани і стани широкого сортаменту, що мають високу пристосовність до вимог ринку, мають низькі експлуатаційні витрати і забезпечують високу якість прокату.

Продуктивність станів підтримується на високому рівні, завдяки використанню заготівель збільшеного перетину, збільшенню швидкості прокатки, скороченню витрат часу на перевалку і налаштування.

Фірма SMS за участю фірм BSW і ABB поставила чотирьохнитковий стан, призначений для застосування прокатки-поділу, на завод «Inchon Iron and Steel

Co. Ltd» (Південна Корея) для прокатки арматурного прокату діаметром 9,5-19,1 мм із безперервнолитої заготовки квадратного перетину 120x120 мм, довжиною 10,4-11,2 м. Продуктивність стану досягає 700 тис. т/рік.

У сортамент стану для прокатки високоміцних якісних і спеціальних сталей входять круглий прокат діаметром 16-80 мм у прутках і мотках (прокат діаметром до 55 мм) і смуговий прокат розмірами 50-100x6-15 мм. У майбутньому на цьому стані також передбачається виробництво катанки. При використанні квадратної заготовки зі стороною 155 мм і швидкості прокатки до 15 м/с продуктивність стану складає 100 т/год. В обтискній групі використовують компактні кліті, інші – закритого типу з багатонитковими валками, причому вертикальні кліті мають нижній привод валків. Обтискна група працює незалежно, завдяки наявності проміжного рольганга достатньої довжини. Чистова група обладнана луперами для прокатки без натягу.

Засоби для проміжного охолодження забезпечують необхідний температурний режим на стані і за ним. Здійснюються контрольована прокатка, термомеханічна обробка, нормалізація і загартування аустенітних сталей для одержання необхідних механічних властивостей.

Фірма SMS поставила технічне устаткування високошвидкісного (120 м/с) двониткового дрібносортно-дротового стана для фірм «Maanshan Iron and Steel Co.» і одноститкового стана для «Kunming Iron and Steel» (обидва стани в Китаї).

Чорнова група першого стану включає чотири кліті 560 і три кліті 475, перша проміжна кліть 475 і три кліті 410 (усі кліті горизонтальні). Кожна з двох других проміжних груп складається з чотирьох компактних клітей 285.

Чистові групи являють собою десятиклітьові блоки Morgan, за кожною з яких розташовуються лінії охолодження Stelmor, монорельсовий конвеєр, преси для мотків, ваги і посади відвантаження.

Початкова заготовка має перетин 130x130 мм і довжину 16 м. Готова продукція: катанка діаметром 5,5-16 мм; арматурний прокат у мотках №6, №8, №10 і №12; внутрішній діаметр мотка дорівнює 850 мм, зовнішній – 1250 мм,

маса – 2000 кг. Швидкість прокатки складає 120 м/с, продуктивність стану – до 480 тис. т/рік.

Однонитковий стан спроектований на випуск 350 тис. т/рік при фонді часу 7200 годин. При випуску катанки діаметром 5,5; 6,0 і 6,5 мм продуктивність складає 220 тис. т/рік. Безперервнолита заготовка для прокатки має перетин 150x150 мм, довжину 9 і 12 м. Маса мотка катанки діаметром 5,5-20 мм дорівнює 2000 кг.

Робочі валки чистових клітей діаметром 210 і 170 мм виготовляють з карбіду вольфраму у вигляді кілець, насаджених на робочі вали.

Валки такої конструкції вперше були використані в 1989 році на заводі фірми BSW, де вони, з великим успіхом, застосовуються дотепер, особливо на дрібносортному стані при використанні процесу прокатки-поділу. Складені валки мають менший прогин і дозволяють зменшити відхилення розмірів перетину розкату від заданих.

На сучасних дрібносортних і дрових станах проводяться роботи з модернізації устаткування і застосуванню автоматичних систем управління процесом прокатки сортових профілів і катанки, що дозволяють істотно знизити допуски на розміри поперечного перерізу прокату при збереженні високої продуктивності і забезпеченні гнучкості виробництва.

Замість чистових груп на таких станах застосовують високошвидкісні (до 110-140 м/с) блоки двох-, трьох- і чотирьохвалкових клітей, що легко вбудовуються в лінії. Трьох- і чотирьохвалкові передчистові і чистові кліті не тільки підвищують точність розмірів прокату, але й дозволяють шляхом настроювання змінювати діаметр прокату в досить широких межах при мінімальних парку валків і витратах часу на настроювання клітей.

Окремо слід зазначити процес виробництва сортопрокатної продукції в умовах литтєво-прокатних агрегатів (ЛПА). Такий спосіб виробництва дозволяє кардинально вирішити питання економії енергоресурсів.

Основні труднощі сполучення МНЛЗ і сортопрокатного стану були зв'язані з тим, що стани, як правило, мають широкий розмірний і марочний сортамент

продукції, що прокатується. Це обумовлює різну продуктивність сортопрокатного стану, у той час як МНЛЗ має порівняно постійну продуктивність [95].

На рис. 1.3 представлені чотири варіанти сполучення МНЛЗ з дрібносортним (дротовим) станом.

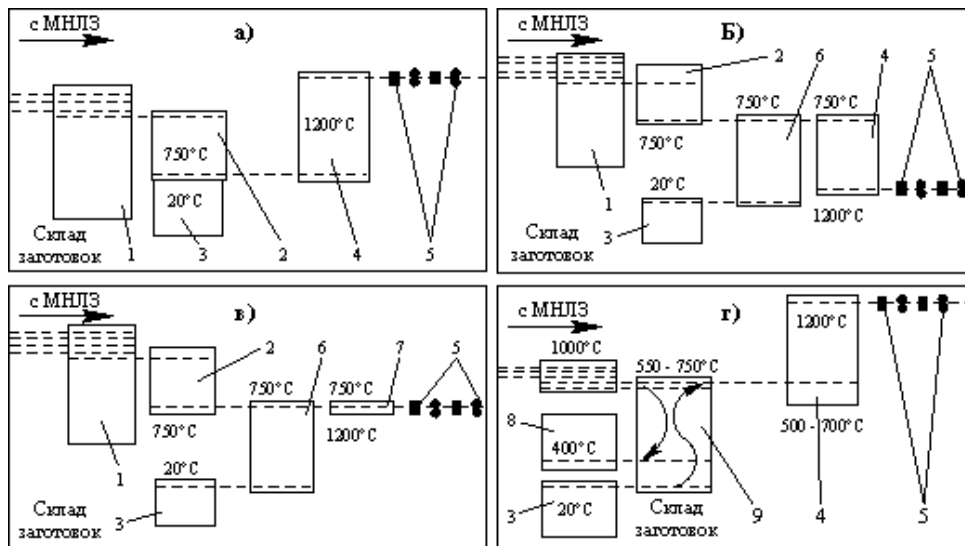


Рисунок 1.3 – Варіанти сполучення МНЛЗ з сортопрокатним станом:

а - гарячий посад заготовок з використанням накопичувача-термостата; б - гарячий посад заготовок з використанням накопичувача-термостата і підігрівальної печі; в - гарячий посад заготовок з використанням індукційної установки; г - гарячий посад заготовок із застосуванням теплонакопичувача 1 - холодильники для безперервнолитих заготовок; 2 - накопичувачі-термостати; 3 - завантажувальні решітки; 4 - нагрівальні печі; 5 - прокатні кліті; 6 - печі для підігріву заготовок; 7 - установки індукційного нагрівання; 8 - прийомні решітки; 9 - двоповерхові накопичувачі

Характерним є те, що у всіх схемах присутні нагрівальна піч, накопичувальні термостати і передбачена посадка холодних заготовок. Це дозволяє максимально зберегти тепло металу і створити часовий буфер при невідповідності продуктивності МНЛЗ і прокатного стану, у тому числі шляхом посадки холодних заготовок.

Основною ідеологією всіх схем сполучення МНЛЗ з прокатним станом є те, що безперервнолита заготовка одночасно в МНЛЗ і прокатному стані не знаходиться.

Схема сортового ЛПА для виробництва прутків діаметром 13-17 мм у пакетах, у мотках діаметром 13-40 мм, катанки діаметром 5,5-18 мм з вуглецевої і легованих сталей представлена на рис. 1.4 [89]. Особливостями цього литтєво-прокатного агрегату є застосування горизонтальної МНЛЗ і машини інтенсивного обтиснення.

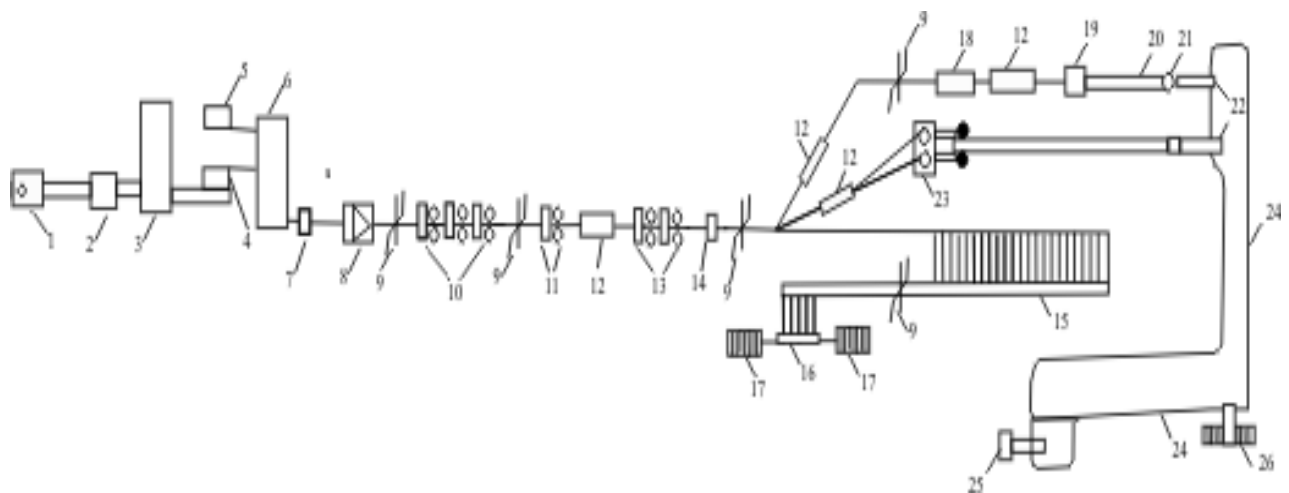


Рисунок 1.4 – Схема сортового ЛПА:

1 - горизонтальна МНЛЗ; 2 - машина газоповного різання; 3 - холодильник; 4, 5 - завантажувальні решітки гарячої і холодної заготовки; 6 - методична піч з крокуючими балками; 7 - гідрозбив; 8 - машина інтенсивного обтиснення; 9 - ножиці; 10 - перша проміжна група клітей; 11 - друга проміжна група клітей; 12 - установки водяного охолодження; 13 - чистова група клітей; 14 - калібровочний блок; 15 - холодильник для прутків, що поставляються в пакетах; 16 - пакетувальник; 17 - кармани; 18 - чистовий блок клітей; 19 - виткоутворювач; 20 - транспортер з повітряним охолодженням; 21 - виткозбірник; 22 - пристрій навішення мотків на гачковий конвейєр; 23 - моталки Гаррета; 24 - гачковий конвейєр; 25 - пристрій для підпресовки мотків; 26 - пристрій для знімання мотків

Творці ЛПА вважають, що горизонтальна МНЛЗ має ряд достоїнств:

- круглі заготовки охолоджуються рівномірніше квадратних і прямокутних, що сприяє одержанню безперервнолитої заготовки з якісною поверхнею;

- можливість розливання як низьковуглецевих, так і легованих сталей;
- круглі заготовки придатні для використання в машині інтенсивного обтиснення, а отже, мається можливість лиття заготовок більшого перетину.

На МНЛЗ відливають заготовки з вуглецевої сталі діаметром 140-160 мм, а легованої - 110-125 мм. Безперервнолиту заготовку ріжуть на частини довжиною 6 м.

Застосування машини інтенсивного обтиснення заміняє чорнову групу із шести клітей. Причому, при зносі кристалізатора, коли діаметр заготовки, що відливається, збільшується (аж до 20 мм), валкова система машини інтенсивного обтиснення не вимагає заміни.

Маються й інші достоїнства машини інтенсивного обтиснення:

- утворюється сприятливий температурний профіль по довжині заготовки;
- забезпечується безударне захоплення заготовки;
- не потрібна проводкова арматура;
- більш швидка перевалка валків;
- зниження на 50% чисельності обслуговуючого персоналу;
- зниження на 25% капітальних витрат при виготовленні машини інтенсивного обтиснення;
- зниження на 20% поточних витрат.

Нагрівальна піч - методична з можливістю гарячого і холодного посаду заготовок.

Прокатні кліті першої і другий проміжної груп - дуо з чергуванням вертикальних і горизонтальних валків, безстанінні. Калібруючий блок за чистовою групою клітей дозволяє одержувати прутки високої точності. У датовій лінії передбачена швидкість прокатки до 120 м/с, прокатні кільця (диски з карбиду вольфраму) розташовані під кутом 15 і 75⁰ до горизонталі. Установки водяного охолодження дозволяють підтримувати необхідну температуру прокатки по всій технологічній лінії, а також здійснювати

термомеханічну обробку металу. На транспортері з повітряним охолодженням можливо прискорене, уповільнене і повільне охолодження витків катанки.

Фахівцями ВНИИМЕТМАШ розроблений ЛПА (рис. 1.5) з криволінійною МНЛЗ і прокатним станом, що має у своєму складі кліть поперечно-гвинтової прокатки (ПГП) [93–96].

Кліть ПГП відіграє роль першої чорнової групи клітей прокатного стану, замінюючи собою 6 - 8 звичайних клітей. Коефіцієнт витяжки в кліті ПГП досягає значення 7. За рахунок додаткових зсувних деформацій при прокатці в кліті ПГП відбувається більш глибоке пророблення металу, що позитивно позначається на структурі безперервнолитого металу і поліпшує температурний режим прокатки. Ще одною важливою перевагою кліті ПГП є її компактність.

За кліттю поперечно-гвинтової прокатки встановлюють з мінімальною міжклітьовою відстанню 6–10 горизонтальних робочих клітей для подовжньої прокатки металу по системі "овал-коло", з незначним натягом і кантуванням розкатів овального перетину на 90^0 .

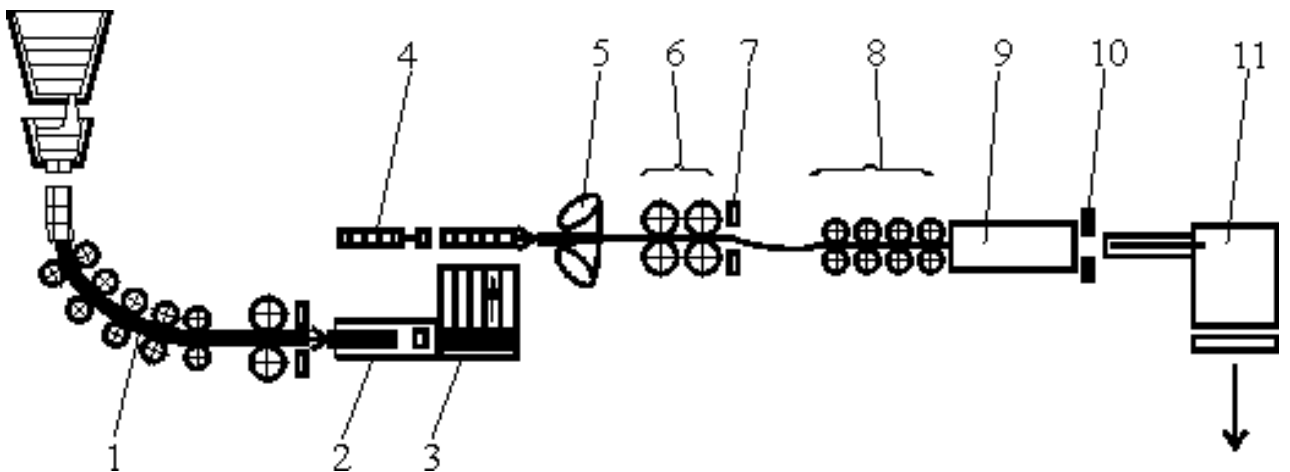


Рисунок 1.5 – ЛПА зі сполученням гвинтової і подовжньої прокатки конструкції ВНИИМЕТМАШ: 1 - МНЛЗ; 2 - індукційний підігрівник; 3 - завантажувальні решітки; 4 - штовхальник; 5 - кліть гвинтової прокатки; 6 - чорнова група клітей подовжньої прокатки; 7 - аварійні летучі ножиці; 8 - чистова група клітей; 9 - термозміцнювальний пристрій; 10 - летучі ножиці; 11 - холодильник

На ЛПА виробляють арматурні профілі №12–20 і круглі профілі діаметром 14–20 мм, що поставляються в прутках довжиною 6–12 м при масі пакета до 5 тонн.

1.5 Актуальні технічні і технологічні напрямки виробництва сортового прокату

Найбільш актуальними технічними і технологічними виробничими задачами є:

- підвищення точності розмірів і якості готового прокату;
- збільшення виходу придатного;
- підвищення продуктивності станів;
- підвищення коефіцієнта використання календарного часу стану.

Нижче розглянуті різні способи рішення відзначених задач в умовах металургійних підприємств.

Підвищення точності і якості готового прокату. Збільшення виходу придатного. Фірма «Cascade Steel Rolling Mills» (США) для виміру розмірів перетинів готового прокату (діаметр 5-70 мм) почала використовувати безконтактні лазерні датчики Zumbach ODAC. Вимірювальна система не чуттєва до складу матеріалу, стану поверхні, світінню, коливанням, швидкості, наявності диму і пилу. Погрішність виміру $\pm 2,5$ мкм [150].

Фірма «Mizushima» (Японія) застосовує лазерні датчики для виміру розмірів перетинів балок у лінії стану. Тривалість виміру розмірів з погрішністю менш 0,5 мм складає 18 с [144].

Фірма «SMS Demag» (Німеччина) використовує систему автоматичного контролю розмірів на сортовому стані фірми «China Steel» (Тайвань). Гідронатискні пристрої здатні устанавлювати валки, як у паузах, так і під навантаженням. Одночасно система підтримує задані міжквіттьові зусилля. Результати вимірів візуалізуються на дисплеї оператора, сигналізуючи про осьові зсуви, знос валків і проводок. Система управління одержує значення висоти і ширини профілю кожні 2,5 мс [142].

На безперервному стані заводу «Mizushima» у квітні 1994 року чистові кліті №17 і №18 замінили блоком, що складається з двох чотирьохвалкових клітей з відстанню між осями 650 мм із використанням контрольно-регулюючої системи для виміру розмірів перетинів прокату, з автоматичним коректуванням настроювання валків. Кліть №17 із двигуном потужністю 1200 кВт має приводні горизонтальні і холості вертикальні валки. У кліті №18 (потужність двигуна 450 кВт) осі приводних і холостих валків розташовуються під кутом 45° . Діаметри валків по дну калібру дорівнюють 400 мм, максимальна окружна швидкість - 16,5 м/с, точність автоматичної установки валків за допомогою ексцентрикового механізму - $\pm 0,02$ мм. Подушки валків притискаються до центральної втулки за допомогою тяг з гідроприводом. На стані з заготовок перетином 150x150 мм прокатують круглі профілі діаметром 16-85 мм з вузькими допусками (овальність $\leq 0,1$ мм).

У чотирьохвалковій кліті два протилежно розташованих валки не мають силового привода, однак, щоб уникнути налипання металу, холості валки в паузах приводяться в обертання струменями охолоджувальної води, що подають на наявні у бочках закрилки.

Вимірювальна система визначає в чотирьох напрямках через кожні 45° діаметр прутка, що виходить із кліті №18, і передає одержувані дані для автоматичного регулювання установки валків.

Застосування такого блоку дозволяє одержувати круглий прокат будь-якого проміжного діаметра з підвищеною точністю розмірів перетину. При цьому продуктивність стану зросла на 20%, а продуктивність праці – у 1,5 рази, що зв'язано зі зменшенням частоти перевалок, значно знизилася витрати на виробництво. Чотирьохвалкові кліті рекомендуються для застосування не тільки в якості чистових, але й у якості передчистових для безперервної прокатки сорту і катанки.

В останні роки на всіх сучасних станах за кордоном установлюють комп'ютерні системи управління режимами прокатки, застосування яких на діючих станах не вимагає заміни робочих клітей, зміни технології прокатки,

калібрування валків і спеціального навчання персоналу. Вони успішно працюють як при великих, так і при малих партіях замовлень.

Сучасна система управління RMC (Rolling Mill Control), розроблена фірмою ABB і використовується, зокрема, на сортовому стані фірми «SKF Ovako», Haldex (Швеція), передбачає безперервний вимір розмірів розкату і підтримка заданих величин натягу [145,153].

Для управління структурою і досягнення необхідних механічних властивостей прокату необхідні жорсткі робочі кліті, які управляються за допомогою математичних моделей. При цьому визначаються параметри прокатки і калібрування валків; здійснюється математичне моделювання процесу і фізичне моделювання при розрахункових деформаційних параметрах, різних деформаційно-термічних режимах обробки і швидкостях охолодження; вибираються оптимальні температурно-швидкісні режими.

Фірмою «SMS Demag» (Німеччина) розроблена нова система управління прокаткою й охолодженням CRCT (Controlled Rolling and Cooling Technology), яка застосовується при прокатці високоміцних і легованих сталей на заводі Siegen фірми «Krupp Edelstahlprofile» (Німеччина). Аналогічні принципи управління застосовані при проектуванні технології й устаткування сортопрокатного стану із широким марочним сортаментом фірмою «Dalian Iron and Steel Group» у Китаї [152].

Для управління структурою і механічними властивостями прокату застосовують різні види термомеханічної обробки (TMCP – Termo Mechanical Control Processes) [147]. Поліпшення мікроструктури і механічних властивостей готового прокату, у ряді випадків, досягають при зниженій температурі нагрівання заготовок (до 900⁰C). Зростає при цьому навантаження в жодній кліті не повинне перевищувати припустиме. Збільшення витрати енергії на прокатку значно перекривається економією при нагріванні і зменшенням втрат при випромінюванні і теплопередачі в процесі обробки заготовки на стані при загальній економії більше 15%. За рахунок зменшення вигару в 4-5 разів вихід придатного підвищується на 1%. Виключається зуглецювання поверхні і

необхідність обдирання прокату з високовуглецевих сталей. Зменшується термічна втома прокатних валків. Новий режим дозволяє одержати значно більш дрібнозернисту структуру прокату і підвищити ударну в'язкість на 25%, при цьому механічні властивості розподілені по перетині прокату більш рівномірно. Отриманий прокат (коло, діаметром 80 мм) зі сталі, що містить 0,48%С, 0,25%Si, 0,75%Mn, мікролегованої ванадієм, не вимагає термообробки і не уступає по механічних властивостях термообробленим легуваним сталі (1,1%Cr+0.2%Mo), відрізняючись більшою рівномірністю властивостей. При прокатці конструкційних сталей заключна деформація (близько 30%) виробляється в зоні нестабільного аустеніту (750-850⁰С). Після чистової кліті розкат прискорено прохолоджують до 650⁰С [143].

Використання контролю і управління мікроструктурою дозволяє одержувати високоміцний прокат, що не вимагає термообробки. Контрольована прокатка застосовується для високолегованих, у тому числі, корозійностійких сталей. При прокатці конструкційних сталей використовують нормалізацію з прокатного нагрівання (температура кінця прокатки близько 850-900⁰С).

На стані німецької фірми «Badisch Stahlwerke» (BSW) у шостиклітьовій обтискній групі кожна пара горизонтальних і вертикальних валків має єдиний калібр, нарізаний у змінних бандажах. Кліті жорсткі, компактні, легко настроюванні. Установлені на подвійних підшипниках валки мають мінімальний прогин. У восьмиклітьовій чистовій групі використовують жорсткі кліті закритого типу, що забезпечують дотримання вузьких допусків. Перевалку роблять клітями.

З метою виконання жорстких умов ринку фірма «Georgsmariehutte Gmb» (Німеччина) провела модернізацію свого сортопрокатного стану [154]. Модернізація включала додавання в стан чистового редуційно-калібровочного трьохвалкового блока RSB, нового стелажу для охолодження з відповідною чистовою оздоблювальною лінією, а також спеціального устаткування для виконання прокатки з контрольованою температурою розкату.

Ці удосконалення вплинули на якість готового прокату і сприяли підвищенню гнучкості стану до зміни ринкового попиту, максимально збільшуючи загальну економічність виробництва.

Розширення технологічних можливостей управління структурою і властивостями катанки реалізовано фірмою SKET (Німеччина) на дротовому стані 150 Макіївського металургійного комбінату, що включає дев'ятиклітьову чорнову групу, проміжні чотирьохклітьові групи, десятиклітьові чистові блоки, лінії водяного охолодження, двоклітьові низькотемпературні блоки, лінії повітряного охолодження, ділянки формування, обробки і збирання мотків [12].

У чорновій і першій проміжній групах катають у дві нитки, у наступних групах – в одну нитку. Максимальна швидкість прокатки катанки – 120 м/с, маса мотків – до 2000 кг. Роликовий транспортер для переміщення витків катанки обладнаний теплоізоляційними кришками, що дозволяє в широких межах регулювати швидкість охолодження [69].

На стані застосовують режими низькотемпературного нагрівання заготовок і низькотемпературної прокатки в чистових блоках. Зі зменшенням температури нагрівання заготовок зменшуються втрати тепла в чорновій групі, причому збільшення витрати енергії на прокатку перекривається зменшенням витрати палива на нагрівання з загальною економією близько 15%, знижується вигар металу, завдяки чому вихід придатного підвищується на 1%, зменшуються термоциклічні впливи на валки [37]. Розкат перед низькотемпературним блоком охолоджують таким чином, щоб температура кінця прокатки вуглецевої сталі була 850-880⁰С при швидкості прокатки 90 м/с і 750-770⁰С – при швидкості прокатки 95 м/с. Зниження температури кінця прокатки поліпшує якість катанки і підвищує пластичність.

На Белорезьком металургійному комбінаті здійснена реконструкція дротового стану 150, введеного в експлуатацію в 1980 році [115]. Були встановлені нові блоки фірми SKET шостого покоління, модернізовані лінії двостадійного охолодження, формування, обробки і збирання мотків [66].

Підвищення продуктивності станів і коефіцієнта використання календарного часу стану. На підвищення продуктивності і якості прокату в мотках спрямовані роботи фірми «Danieli» (Італія) [149]. Відповідно до нових проектних рішень розкат, перш ніж надійти в безперервну групу для прокатки катанки, проходить передчистовий і чистовий блоки клітей (8-10 проходів у кожному) типу Delta при швидкості 61,5 м/с (діаметр розкату 8,3 мм) з контрольованою температурою. Завдяки ряду технічних рішень, зокрема нової конструкції виткоукладача, швидкість прокатки катанки підвищена до 140 м/с. Зниження температури кінця прокатки до 750⁰С дозволяє управляти розміром зерна і технологічних властивостей катанки.

Безперервний сортопрокатний стан південнокорейської фірми «Posco», що працює з 1984 року, реконструйований по проекту F. Kocks з установкою в чистовій групі на місці клітей №16 і №17 з використанням їхніх двигунів чотирьохклітьового блоку трьохвалкових клітей, у яких кожний з валків приводиться від свого вала через груповий редуктор. У 1998 році було прокатано 450 тис. т. прокату (продуктивність стану до реконструкції складала 350 тис. т/рік). Стан прокатує катанку діаметром 5-13 мм і сортовий прокат діаметром 14-42 мм у мотках з вуглецевих, підшипникових, корозійностійких і інших високолегованих сталей, включаючи швидкорізальні.

У 1999 році проведена реконструкція стану фірми «SMI Steel», South Carolina (США). У рамках реконструкції була модернізована чотирьохпотокова МНЛЗ, установлені нагрівальна піч продуктивністю 155 т/ч і безперервний стан, що включає 17 безстанинних клітей з двигунами перемінного струму для прокатки без скручування. Кліть №15 пристосована для поділу розкату на чотири нитки для одержання дрібного арматурного прокату. Розміри перетину розкату безупинно контролюються лазерними датчиками Danieli Hiprofile, чотири голівки виконують до 30 вимірів у секунду, на підставі яких автоматично коректується настроювання валків. У червні 2000 року зроблено 54 тис. т. профілів і арматури при проектній продуктивності 720 тис. т/рік [151].

Аргентинська фірма «Acindar» займає в Південній Америці провідне положення в сортопрокатному виробництві завдяки виконанню ряду програм по модернізації устаткування. На заводі Villa Construction працює агрегат прямого відновлення заліза (Midrex process) потужністю 1 млн. т/рік, сталеплавильний цех із трьома дуговими печами, двома агрегатами ківш-піч і двома МНЛЗ продуктивністю 1,3 млн. т/рік, відділення зачищення заготовок, сорто-штрипсовий стан, продуктивністю 380 тис. т/рік, дрібносоротно-дротовий стан (600 тис. т/рік), дротовий стан (150 тис. т./рік), трубозварювальний агрегат – процес EWR (130 тис. т/рік).

На сорто-штрипсовому стані встановлені два трьохвалкових блока F. Kocks, що включають 8 редуційних клітей і чотирьохклітьовий калібруючий блок типу RSB (Reducing and Sizing Blocks).

Реконструкція двониткового дрібносоротно-дротового стану, що був розрахований на прокатку катанки і сортового прокату діаметром 5,5-16 мм, завершена в березні 1997 року, включала установку нових ліній охолодження і розширення сортаменту до діаметра 25 мм. До реконструкції стан не забезпечував відсутність натягу і скручування, поперечний переріз розкату мінявся по довжині. Для усунення цих недоліків були встановлені два передчистових блока трьохвалкових клітей 215 замість двох двониткових двохвалкових клітей.

Трьохвалкові кліті сорто-штрипсового стану виконані з єдиним ведучим валом і внутрішніми зубчастими зачепленнями. Вони встановлені на рухливих опорах, що прискорюють перевалку блоками.

Трьохвалкові кліті дрібносоротно-дротового стану мають по три ведучих вала з ексцентриковими втулками для радіального настроювання валків. Калібри виконані на робочих кільцях, затиснутих двома фланцями, стягнутими шпильками. Калібри настроюють у радіальних і вісьових напрямках за допомогою оптичної системи. На перевалку і настроювання потрібно 30 хвилин.

Нові блоки клітей поставлялися з Німеччини в зібраному вигляді (з редукторами).

Реконструкція потребувала зупинки стану на 12 днів. Підготовка і монтаж виконувалися при роботі стану в одну нитку. Наприкінці березня 1997 року стан працював уже по двом ниток зі швидкістю прокатки до 80 м/с. Після установки в 1998 році чистового блоку швидкість прокатки досягла 95 м/с, що відповідає продуктивності 645 тис. т/рік.

При модернізації дрібносортних і дротових станів часто використовують трьохвалкові кліті, зокрема блоки фірми «Koks». По конструкції вони нагадують кліті трубних редукційних станів і можуть виконуватися з одним або трьома ведучими валами.

Впровадження трьохвалкових клітей почалося з 1962 року. В даний час побудовано вже 77 блоків, у яких використовують 1100 трьохвалкових клітей. У них часто прокатують різні сплави, прокат різних розмірів і одержують продукцію високої якості.

У 1992 році кліті з трьома приводними валками застосували в чорнових блоках двониткового дротового стану фірми «Джорджтаун Стил Корп.» (Південна Кароліна, США) і домоглися підвищення точності розмірів катанки і зменшення довжин стовщених кінців.

Блоки трьохвалкових клітей дозволяють по єдиному калібруванню валків у чорновій і проміжній групах прокатувати розкат будь-якого перетину при малих витратах часу на перевалку [101].

1.6 Системний аналіз виробництва сортового прокату на безперервних станах

Основний обсяг виробництва сортового прокату приходить на прокат, вироблений на безперервних дрібносортних станах (НМС). Основний обсяг дрібносортного прокату поставляється в стрижнях. Незважаючи на розходження в структурах НМС, технологічний процес виробництва прокату

має чітке технологічне поопераційний поділ, погоджений у часі і скоординований в просторі.

Устаткування НМС і технологія виробництва дрібносортового прокату, зокрема мірної довжини, досить повно освітлені в роботах [1,55,56,67,68,86].

Підготовлені до прокатки заготовки однієї плавки поштучно завантажуються в нагрівальну піч. Між заготовками різних плавків у печі робиться розрив, а першу заготовку плавки позначають. У печі здійснюють нагрівання заготовок до температури, яка установлена технологічною інструкцією для відповідної марки сталі.

Нагріту заготовку видають з печі в прокатну нитку, де здійснюється її прокатка до необхідного профилеразміру в послідовно розташованих клітках. Прокатні клітки розташовуються групами по 6-8 клітей у групі. Між групами передбачається обрізка переднього кінця прокату на летучих ножицях.

Після завершення обробки металу тиском прокат можуть додатково охолоджувати для одержання необхідних механічних властивостей. Арматурний прокат на вітчизняних станах термозміцнюють.

Після завершення термомеханічної обробки, у технологічному процесі передбачаються операції, що забезпечують форму постачання товарної продукції.

Якщо умовами замовлення передбачається постачання прокату в мотках, то роблять змотування прокату на моталках або формують мотки після обробки прокату на лінії «Стелмор». Однак обсяги замовлень на постачання дрібносортового прокату в мотках досить малі в порівнянні з замовленнями на постачання в стрижнях.

Для одержання прокату в стрижнях безперервні прокатні стани обладнуються холодильниками, на яких здійснюється охолодження прутків довжиною до ста метрів і більше. Тому перед холодильником розміщують летучі ножиці, що послідовно відокремлюють від прокату прутки відповідної

довжини. Прутки укладаються на настил холодильника піднімальними клапанами.

Після охолодження прутків на холодильнику, їх збирають у пакети по 10-75 шт. у пакеті в залежності від поперечного перерізу прокату і зусиль різання стаціонарних ножиць, установлених в лінії рольгангу холодильника, що відводить.

На стаціонарних ножицях здійснюють розрізання пакета прутків на пачки стрижнів під піднімальний упор, торець якого встановлюють на відстані мірної довжини від площини різання ножиць. Мірна довжина прокату визначається умовами замовлення. Проте, практично 100% замовлень приходиться на стрижні довжиною 12м – максимальна довжина стрижня завантажується в стандартний залізничний піввагон.

Пачки стрижнів направляються по відповідному рольгангу холодильника до карманів, де накопичуються. Більшість карманів обладнані вагами. Після накопичення в карманах стрижнів мірної довжини загальною масою, що відповідає масі товарної пачки, вони надходять на ув'язування. Якщо в кармані знаходяться стрижні різної довжини, то вони надходять на ділянку сортування.

Системний аналіз [2,13] будь-якого технологічного процесу припускає дослідження матеріальних потоків при перетворенні початкового матеріалу в кінцевий товарний продукт, у нашому випадку – заготовки в товарні пачки стрижнів. Аналіз матеріального потоку виробництва дрібносортного прокату в стрижнях дозволяє представити технологічний процес як сукупність операцій, яким піддається метал початкової заготовки в процесі його перетворення в товарну продукцію, у вигляді лінійного потокового технологічного процесу з технологічної спеціалізації як його стадій, так і окремих операцій (рис.1.6.)

На рис. 1.6 виділено основні стадії виробництва дрібносортного прокату, що забезпечують формування необхідних властивостей готової продукції. Як впливає з вищенаведеного графа, постадійно технологічний процес виробництва дрібносортного прокату є однолінійним. Більш того, поопераційно

на перших двох стадіях технологічний процес також носить виражений однолінійний потоковий характер. На стадії термомеханічної обробки прокату формуються поперечні геометричні розміри прокату і його механічні властивості, стадія охолодження (на спокійному повітрі) і розрізання прокату забезпечує одержання прутків (стрижнів) прокату, а на стадії збирання й обробки остаточно формуються пачки товарної продукції.

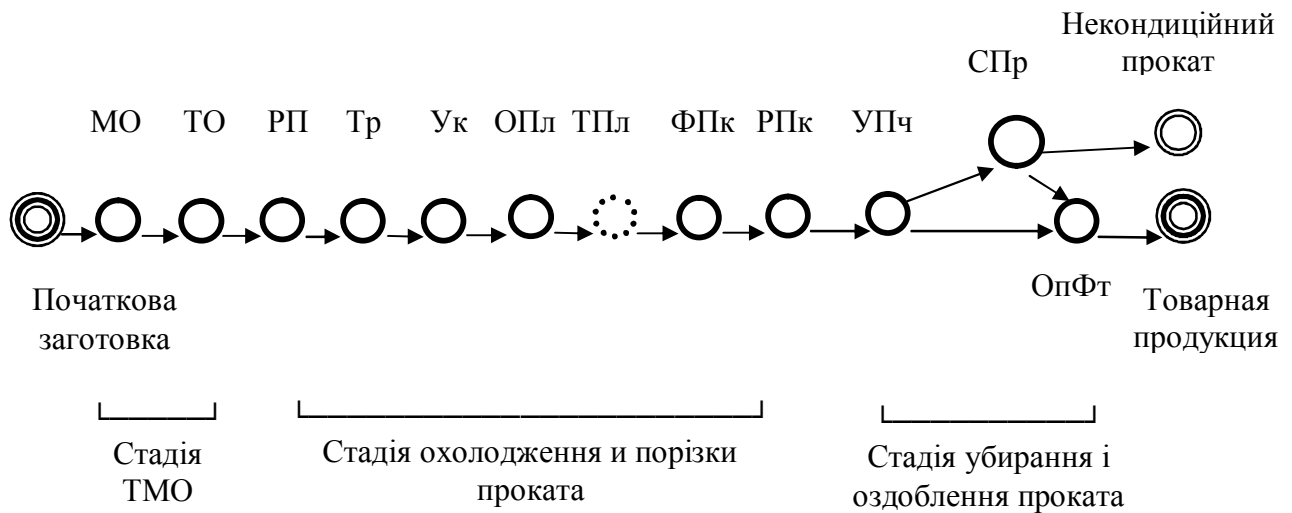


Рисунок 1.6 – Поопераційна структура виробництва арматурного прокату:

МО – операція обробки металу тисненням; ТО – операція термообробки прокату; РП – операція розкроювання прокату на прутки; Тр – транспортування прокату до холодильника; Ук – укладка прутків на холодильник; ОПл – охолодження прутків на холодильнику; ТПл – операція вирівнювання торців прутків на холодильнику; ФПк – операція формування пакета прутків; РПк – розкроювання пакета прутків на пачки стрижнів; УПч – убирання готового прокату; СПр – сортування стрижнів; ОпФт – обв'язка пачок стрижнів і формування партії товарної продукції

Дана особливість технологічного процесу виробництва прокату в стрижнях дозволяє робити постадійний, а на перших двох стадіях – поопераційний аналіз операцій обробки прокату.

Основним призначенням операції обробки металу тиском є одержання заданих поперечних геометричних розмірів готового прокату. І хоча відомо, що температурно-швидкісний режим і ступінь деформації безперервної прокатки впливає через структуру і розмір зерна деформованої сталі на

механічні властивості прокату і температуру прокату на виході з останньої кліті [10,16,113], цей аспект при аналізі можливих методів управління механічними властивостями прокату можна не розглядати. По-перше, найкращі механічні властивості досягаються при мінімально можливій температурі кінця прокатки. Температура кінця прокатки істотно залежить від температури нагрівання заготовок, можливості зниження якої обмежені можливостями устаткування, зокрема, механічними навантаженнями на прокатні кліті. По-друге, механічні властивості прокату або визначаються маркою стали початкової заготовки, або, як це має місце при виробництві арматурного прокату, активно формуються в процесі його термозміцнення з прокатного нагрівання після завершення обробки металу тиском [16,113]. За своїм впливом на механічні властивості арматурного прокату, операція термообробки (термозміцнення) прокату має визначальне значення [10,16,104,113].

Це дозволяє при розгляді проблем управління процесом безперервної прокатки при виробництві прокату обмежитися проблемою забезпечення точності поперечних геометричних розмірів готового прокату, а при розгляді проблем забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату – операцією термообробки.

У той же час, на процес термозміцнення впливає зміна швидкості руху примусово охолоджуваного прокату, приводячи до зміни механічних властивостей по довжині готового прокату [16,119]. Причому, зміна швидкості прокату, що знаходиться в установці примусового охолодження, може бути викликана як зміною частоти обертання валків останньої (випускної) кліті, так і прискоренням прокату в трасі термозміцнення силами гідротранспортування і рольгангами холодильника, що підводять. Перша причина зв'язана з процесом управління швидкісним режимом прокатки, а друга – з умовами укладання прутків прокату на настил холодильника і роботою відповідної системи локальної автоматизації.

Незважаючи на те, що діючі стандарти допускають досить широкий діапазон розкиду механічних властивостей прокату в кожному класі міцності

(табл.3.1.), критерій мінімізації коливань швидкості прокату, що знаходиться в установці примусового охолодження, повинен прийматися як додатковий при аналізі і синтезі систем управління швидкісним режимом прокатки і систем управління укладанням прутків на настил холодильника.

Таким чином, через швидкість прокату здійснюється взаємозв'язок операцій, яким піддається метал початкової заготовки в процесі його перетворення в товарну продукцію, як на стадії термомеханічної обробки металу, так і між стадією термомеханічної обробки металу і стадією розрізання й остаточного охолодження прокату на спокійному повітрі.

Основною задачею стадії розрізання й охолодження прокату є одержання прутків прокату необхідної (мірної) довжини.

Устаткування і технологія обробки прокату на цій стадії досить докладно описана в [86].

Необхідно відзначити, що остаточне охолодження арматурного прокату на спокійному повітрі на даній стадії технологічного процесу є пасивним і не впливає ні на які споживчі властивості готового прокату. Тоді як операції розкрою прокату на прутки, укладання прутків прокату на холодильник, вирівнювання торців прутків на холодильнику, розрізання пакета смуг на пачки стрижнів впливають на вихід мірної продукції, а отже, і на техніко-економічні показники роботи прокатного стану.

Докладний аналіз операцій, що забезпечують одержання мірної продукції, приведений у [1,55,56]. У роботі [31] розглядаються питання оптимізації технологічних операцій на безперервних дрібносортних станах для переходу до масового виробництва мірного прокату.

У той же час, у цих роботах не виділяється границя якісного переходу від поопераційної обробки в потоці стану прокату однієї заготовки до поопераційної обробки прокату декількох заготовок – пакета прутків прокату, сформованого на виході холодильника. Наявність же такого якісного переходу є істотними для оптимізації управління цими операціями, оскільки результати операції розрізання пакета прутків залежать від результатів операцій обробки

декількох заготовок, прокат яких входить у пакет. Тоді й оптимальна стратегія обробки окремих заготовок повинна, у загальному випадку, будуватися з урахуванням результатів обробки як попередніх, так і наступних заготовок.

Отже, при рішенні задач управління операціями обробки металу на стадії охолодження і розрізання прокату лежить необхідність враховувати наявність якісних переходів в обробці прокату на завершальних операціях його виробництва на безперервних дрібносортних станах.

У цьому відношенні завершальна стадія виробництва прокату в стрижнях – стадія збирання й обробки прокату, не є виключенням, тому що

на сучасних прокатних станах на цій стадії відбувається перехід від обробки пакета стрижнів до обробки з відсортованих по довжинах стрижнів.

Вітчизняні НМС не мають у складі ад'юстажа устаткування, що дозволяє масово, у потоці виробництва, сортувати всі стрижні. Тому важливо забезпечити максимальне надходження на цю стадію обробки прокату пачок стрижнів, що мають однакову сортність по довжині стрижнів, зокрема мірну довжину. Ця особливість не може не накладати відбиток на вимоги до стратегій управління попередніми операціями.

Таким чином, на основі проведеного системного аналізу процесу виробництва прокату на безперервних дрібносортних станах, можна зробити висновок як про відносну операційну локальність задач одержання необхідних геометричних розмірів готового прокату і його механічних властивостей, так і про потоковий взаємозв'язок задач управління операціями на стадіях охолодження і розрізання, збирання й обробки прокату, що забезпечують одержання прокату мірної довжини.

2 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ

2.1 Аналіз вимог стандартів до різних видів сортового прокату

Готовий сортовий прокат по своїй якості повинен цілком задовольняти усім вимогам стандартів і спеціальних технологічних умов на прокат даного виду [5,16,18-20,108].

Звичайно ці вимоги пред'являються до визначеного хімічного складу сталі, розмірам, механічним і службовим властивостям, стану поверхні, мікро – і макроструктурі. Прокат будь-якого виду піддають обов'язковому контролю по зовнішньому вигляду і розмірам, які не повинні виходити за межі відповідних допусків.

Прокат зі сталі звичайної якості повинен мати нормовані механічні властивості і мати відповідний до марки сталі хімічний склад. До прокату зі сталей більш відповідального призначення пред'являють значно більші вимоги.

Прокат з вуглецевої сталі звичайної якості поділяють на підгрупи:

- I – для застосування без обробки поверхні;
- II – для холодної механічної обробки різанням;
- III – для гарячої обробки тиском.

У залежності від підгрупи регламентується наявність, величина і глибина залягання поверхневих дефектів прокату – розкатаних тріщин, прокатних плівок, розкатаних забруднень та ін.

У залежності від призначення прокат зі сталі звичайної якості підрозділяють на 3 групи:

- A – поставляється по механічних властивостях;
- B – поставляється по хімічному складу;
- B – поставляється по механічних властивостях і хімічному складу.

Групи B и B припускають можливість зварювання.

Прокат зі сталі кожної групи в залежності від сполучення нормованих показників підрозділяють на категорії – група А містить 3 категорії, група Б – 2 категорії і група В – 6 категорій.

Кожна категорія групи А містить сполучення марки сталі; величин тимчасового опору розриву σ_b , границі текучості σ_T і відносного подовження δ_5 в залежності від розмірів прокату; діаметра оправки для іспитів вигином у холодному стані.

Кожна категорії групи Б містить сполучення марки сталі і граничний вміст хімічних елементів у сталі (С, Мп, Si, Р, S, Cr, Ni, Cu, As) з відхиленнями, що допускаються.

Кожна категорія групи В містить сполучення марки сталі з її хімічним складом (як у групі Б); до механічних властивостей (σ_b , σ_T , δ_5 , холодний вигин), як у групі А, додаються показники іспитів на ударну в'язкість при температурах $+20^0\text{C}$ и -20^0C після природного і механічного старіння в залежності від розмірів прокату.

Прокат з низьколегованої сталі за формою, розмірам і граничним відхиленням на прокат звичайної, підвищеної і високої точності регламентується показниками відповідних стандартів. У залежності від нормованих механічних і службових властивостей прокат підрозділяється на 15 категорій. Кожна категорія містить сполучення: марки стали (хімічний склад); механічних властивостей (σ_b , σ_T , δ_5 і вигин у холодному стані), ударної в'язкості при звичайній і низькій температурах (до -70^0C) після природного і механічного старіння у функції розміру прокату.

Прокат гарячекатаний для армування залізобетонних конструкцій поставляється в стрижнях і мотках.

У залежності від механічних властивостей арматурна сталь підрозділяється на 6 класів – від А-I до А-VI. Сталь А-I виготовляють гладкою, інші класи мають періодичний профіль.

Для кожного номера профілю (від №6 до №80) нормується номінальний діаметр; площа поперечного перерізу; маса 1м довжини і граничні відхилення

по масі для першої і вищої категорії якості; величини і граничні відхилення розмірів елементів поперечного перерізу профілю.

У мотках поставляється арматура класів А-I і А-II до №12, класу А-III – до №10 включно в мотках або стрижнях, великих розмірів у стрижнях.

Стрижні поставляються довжиною від 6 до 12м:

- мірної довжини;
- мірної довжини з немірними відрізками довжиною не менш 2м (не більш 15%);
- немірної довжини, допускається наявність стрижнів довжиною від 3 до 6м не більш 7% від маси партії.

Нормуються граничні відхилення по довжині стрижнів звичайної і підвищеної точності розрізання.

Кривизна стрижнів не повинна перевищувати 0,6% вимірюваної довжини.

Арматурну сталь виготовляють з вуглецевих і низьколегованих марок, які вибирають в залежності від класу за механічними властивостями, особливостями технології (гарячекатана чи термозміцнена) і номера профілю. Нормується величина і відхилення вмісту хімічних елементів у сталі.

У залежності від класу арматурної сталі регламентуються механічні характеристики: σ_b , σ_T , δ_5 , δ_p (рівномірне подовження), ударна в'язкість при -60°C , діаметр оправки і кут вигину в холодному стані, а також – статистичні характеристики σ_T і σ_b при іспитах партій, що поставляються, арматурної сталі.

Прокат термомеханічно і термічно зміцнений періодичного профілю поставляють у стрижнях від №10 до №40 і підрозділяють по механічних властивостях на 5 класів – від $A_T - III$ до $A_T - VII$. Номінальні діаметри, площі поперечного перерізу, маса 1м довжини, граничні відхилення по розмірах і масі, кривизна стрижнів такі ж, як і для гарячекатаної арматури.

Арматурні стрижні виготовляють довжиною від 5,3 до 13,5м за вимогою споживача.

Стрижні зі сталі, що зварюється, допускається виготовляти немірної (не менш 3м) довжини в межах мірної в кількості не більш 7% від маси партії, а також – мірної довжини з немірними відрізками (не менш 2м) у кількості не більш 15% від маси партії.

Стрижні виготовляються з вуглецевих і низьколегованих марок сталей, перелік яких регламентований. Зварюваність сталі і стійкість проти корозійного розтріскування нормуються хімічним складом і технологією виготовлення.

Механічні властивості арматурних стрижнів (σ_b , σ_t , δ_5 , δ_p , холодний вигин) до і після електронагріву регламентується в залежності від класу і номера профілю. Статистичні характеристики σ_b і σ_t при іспитах партій, що поставляються, залежать від номера профілю.

Рейки різних типів – залізничні вузької і широкої колії, кранові, трамвайні й ін. – виготовляють з мартенівської, конвертерної й електросталі, що пройшла протифлокенну обробку.

Розміри рейок визначаються масою погонного метра, що складає від 8 до 140 кг/м.

Стандартами регламентуються марки сталей і їх хімічний склад, механічні характеристики металу рейок: σ_b , σ_t , δ_5 , твердість по Брінеллю (НВ). Поверхневі дефекти не допускаються. Регламентуються геометричні розміри елементів і площі поперечного перерізу, координати центра ваги, моменти інерції і моменти опору щодо осей.

Відхилення від прямолінійності не повинні перевищувати: у горизонтальній площині 0,8% вимірюваної довжини, а у вертикальній площині 0,6%, скручування не допускається. Рейки можуть поставлятися з болтовими отворами і без них, з термозміцненням поверхні і без термозміцнення.

Прокат для будівельних сталевих конструкцій – куточки, швелери, двотаври призначені для конструкцій зі звареними й іншими з'єднаннями і виготовляються з вуглецевої і низьколегованої гарячекатаної сталі регламентованих марок і хімічного складу.

Для кожної марки сталі і профілів з різними товщинами полок регламентуються: механічні характеристики прокату – σ_B , σ_T , δ_5 , ударна в'язкість при температурах від -20°C до -70°C після природного і механічного старіння, діаметр оправок для вигину.

Стандартами для кожного типорозміру профілю визначаються величини і відхилення геометричних розмірів перетину, величини площ, координати центра ваги, моменти інерції і моменти опору щодо осей.

Розшарування прокату не допускається. Зварюваність контролюють по вуглецевому еквіваленту сталі $C_3, \%$:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2},$$

який не повинен перевищувати 0,49-0,51%.

2.2 Аналіз техніко-економічних показників виробництва сортового прокату

Основними техніко-економічними показниками роботи прокатного стану є його продуктивність, собівартість, прибуток і рентабельність виробництва готового прокату [35,72,81].

2.2.1 Продуктивність стану

Продуктивність стану визначається пропускною здатністю «вузького місця» у лінії стану, тобто:

$$\Pi_i = \min \max \{ \Pi_{ji} \}, \quad (2.1)$$

$$j = 1 \dots n, \quad i = 1 \dots m,$$

де Π_i – пропускна здатність стану при прокатці i -го профілерозміру з кількості m , що прокатуються на стані, т/година; Π_{ji} – пропускна здатність j -ої ділянки стану (печі, прокатної ділянки, холодильника, ділянки розрізання) з n ділянок при прокатці i -го профілерозміру, т/година.

Пропускна здатність має розмірність т/година і відповідає максимально можливому по технологічних і технічних параметрах потокові прокату через дану ділянку.

Для ділянки прокатки $\Pi_{\text{пр}i}$:

$$\Pi_{\text{пр}i} = \frac{3600 \cdot G_i}{t_{Mi}^{\min} + t_{\Pi i}^{\min}}, \quad (2.2)$$

де: G_i – маса заготовки, т; t_{Mi}^{\min} – мінімальний машинний час прокатки розкату в останній кліті стану, с; $t_{\Pi i}^{\min}$ – мінімальна пауза між розкатами в останній кліті, с.

У свою чергу:

$$t_{Mi}^{\min} = \frac{L_{pi}}{V_{\text{пр}i}^{\max}}, \quad (2.3)$$

де: L_{pi} – довжина розкату в останній кліті, м; $V_{\text{пр}i}^{\max}$ – максимальна вихідна швидкість прокатки i -го профілерозміру, обумовлена калібруванням і параметрами електроприводу клітей стану, м/с.

У випадку, коли пропускна здатність стану визначається не ділянкою прокатки, максимальна швидкість прокатки може бути розрахована, виходячи з виражень (2.1,2.2,2.3):

$$V_{\text{пр}i}^{\max} = \frac{L_{pi}}{3600G_i} \cdot \Pi_i. \quad (2.4)$$

Таким чином, максимальна годинна продуктивність стану при виробництві i -го профілерозміру:

$$q_i^{\max} = \Pi_i. \quad (2.5)$$

Фактична годинна продуктивність зазвичай нижче максимальної за рахунок непередбачених втрат часу (схованих простоїв), що спричиняються порушенням ритму прокатки ($t_{Mi} + t_{\Pi i}$) через різні затримки, аварії і т.п. причини. Ці втрати часу враховуються коефіцієнтом схованих простоїв $K_{\text{сп}i}$,

усередненим за фактичний час (t_{ϕ}) декількох кампаній прокатки i -го сортаменту:

$$K_{cni} = \frac{\sum \Delta t}{t_{\phi}},$$

де $\sum \Delta t$ - сума втрат часу (схованих простоїв) за час t_{ϕ} .

Для розрахунку продуктивності більш зручно користуватися коефіцієнтом використання робочого часу стану K_{ni} :

$$K_{ni} = 1 - K_{cni}.$$

Величина K_{ni} при виробництві різних профілерозмірів на станах різних типів складає $0,8 \div 0,95$.

У процесі переділу заготовки в готовий прокат, крім того, виникають неминучі за технологією виробництва втрати металу: вигар і окалиноутворення, обрізки при зачищенні початкових ділянок, обрізки при розкроюванні прутків на товарні (замовлені) довжини, а також втрати металу при аваріях. Ці втрати враховуються видатковим коефіцієнтом K_p , що показує відношення маси (витрати) заготовки на виробництво 1т готового прокату, звичайно величина $K_p \approx 1,03 - 1,1$.

Таким чином, фактична годинна продуктивність стану по придатному прокату при виробництві i -го сортаменту:

$$q_i = \frac{K_{ni}}{K_p} \cdot q_i^{\max}. \quad (2.6)$$

Середньозважена фактична годинна продуктивність стану – q_{cp} , при виробництві що n профілерозмірів:

$$q_{cp} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{q_i}}, \quad (2.7)$$

де: a_i – планована або фактична масова частка i -го профілерозміру в загальному обсязі виробництва за обліковий період (у відносних одиницях); q_i – фактична годинна продуктивність i -го профілерозміру, т/година.

Продуктивність стану встановлюють окремо для кожного профілерозміру і марки сталі. Для аналізу роботи станів, а також для планування завантаження й оплати праці робітників, продукція виражається в натуральних одиницях (тоннах) і в основному («умовному» або «приведеному») сорті.

Перерахування продукції в основний сорт здійснюється за допомогою перекладних коефіцієнтів (коефіцієнтів труднощі) – $K_{\text{прв}}$, що представляють собою відношення годинної продуктивності при прокатці основного виду продукції $q_{\text{ос}}$ до годинної продуктивності при прокатці кожного виду прокату q_i :

$$K_{\text{прв}} = \frac{q_{\text{ос}}}{q_i} . \quad (2.8)$$

За основний сорт приймається один з видів прокату:

- найбільш простий у технологічному відношенні, при прокатці якого досягається найвища продуктивність;
- с переважною часткою в сортаменті стану;
- відповідної середньої продуктивності.

Тоді для середньої продуктивності можна записати:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{ос}}}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot K_{\text{прв}i}} . \quad (2.9)$$

Річну продуктивність стану визначають по фактичній кількості робочих годин у році $T_{\text{ф}}$:

$$T_{\text{ф}} = T_{\text{н}} - T_{\text{п}} , \quad (2.10)$$

де: $T_{\text{н}}$ – номінальний (календарний) час, година/рік; $T_{\text{п}}$ – плановані простой:– ремонти, перевалки, профілактики, година/рік.

Остаточно, річна продуктивність стану по додатному (товарному) прокату розраховується по вираженню:

$$Q = q_{\text{ср}} \cdot T_{\text{ф}} \text{ (т/рік)} . \quad (2.11)$$

2.2.2 Собівартість виробництва прокату

Собівартість виробництва прокату визначається сумою витрат, віднесеної на 1т готовій продукції.

При обліку і плануванні собівартості прокату розрізняють цехову, виробничу (заводську) і повну собівартість.

Цехова собівартість визначається витратами тільки даного цеху на виробництва продукції. У виробничу собівартість включають додатково загальнозаводські витрати – утримання апарату заводоуправління, загальнозаводських будинків і споруджень, витрати на підготовку й освоєння виробництва, та інші витрати. У повну собівартість включається виробнича собівартість і позавиробничі витрати, до яких відносяться транспортні витрати, відрахування збутовим організаціям і ін.

У середині цехової собівартості виділяють сортovu собівартість, що визначає собівартість продукції даного виду.

Розрахунок витрат на виготовлення одиниці продукції називається калькуляцією собівартості і містить типову структуру статей витрат, що укрупнено групуються в такий спосіб:

- початкові заготовки;
- відходи і брак;
- витрати по переділу;
- загальноцехові і загальнозаводські витрати;
- побічна продукція.

Вартість відходів і браку виключаються з вартості початкових заготовок, а вартість побічної продукції виключається із суми витрат.

У витрати по переділу входять наступні статті:

- технологічне паливо;

- енергетичні витрати;
- зарплата і відрахування;
- зношення основного інструмента (валків);
- ремонт і утримання основних засобів;
- внутрішньозаводський транспорт продукції;
- амортизація основних засобів і ін.

По характеру участі у виробничому процесі витрати поділяються на основні і накладні. До основних відносяться витрати, безпосередньо зв'язані з процесом виробництва (засоби виробництва, заробітна плата, ремонт і утримання основних засобів і ін.) До накладних відносяться витрати, зв'язані з управлінням і обслуговуванням виробництва (інші загальноцехові і загальнозаводські витрати).

По способу включення в собівартість окремих видів продукції витрати поділяються на прямі і непрямі. До прямих відносяться витрати, безпосередньо зв'язані з даною продукцією – заготовка, відходи і брак і ін. До непрямих відносяться витрати по переділу, зарплата й ін.

По ступені залежності від збільшення обсягу виробництва витрати поділяються на відносно перемінні і відносно постійні. Відносно перемінні витрати змінюються при зміні обсягу виробництва, причому, вони можуть змінюватися пропорційно (заготовка, енергоносії й ін.), прогресивно, тобто в більшому ступені, ніж обсяг продукції, що випускається, (прогресивна система оплати, премії й ін.) і депресивно, тобто в меншому ступені, ніж, обсяг продукції, що випускається, (частково ремонти, інші витрати цеху).

Відносно постійні витрати не залежать (або мало залежать) від зміни обсягу виробництва, до них відносяться амортизація і утримання основних засобів, частково ремонти, загальнозаводські витрати й ін. При рості випуску продукції постійні витрати на одиницю продукції знижуються.

Розподіл витрат на перемінні і постійні дозволяє визначити вплив зміни обсягу виробництва на собівартість продукції.

Таким чином, витрати на виробництво i -го профілерозміру можна приблизно записати як:

$$Z_{m,\tau}^i = K_{m_i} \cdot m_i + k_\tau \cdot \tau_i, \quad (2.12)$$

де: $Z_{m,\tau}^i$ – сумарні витрати на виробництво i -го профілерозміру масою m_i за час τ_i у грошових одиницях (г.о.); K_{m_i} – коефіцієнт перемінних витрат при виробництві i -го профілерозміру, г.о./т; k_τ – коефіцієнт постійних витрат, який можна установити за досить тривалий період експлуатації як відношення постійних витрат до величини цього періоду, г.о./т.

По визначенню, собівартість S_i виробництва i -го профілерозміру:

$$S_i = \frac{Z_{m,\tau}^i}{m_i}. \quad (2.13)$$

З обліком (2.12) і $m_i = q_i \cdot \tau_i$:

$$S_i = K_{m_i} + \frac{k_\tau}{q_i}. \quad (2.14)$$

Середня собівартість при виробництві n профілерозмірів (сортова собівартість)

$$S_{cp} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot K_{m_i} + \frac{k_\tau}{q_{cp}}. \quad (2.15)$$

2.2.3 Прибуток при виробництві прокату

Прибуток при виробництві прокату визначається як різниця між ціною реалізації продукції і її собівартістю. Для виробництва i -го профілерозміру:

$$P_i = C_{p_i} - S_i, \quad (2.16)$$

де: P_i – прибуток, г.о./т; C_{p_i} – ціна реалізації i -го профілерозміру, г.о./т:

У свою чергу:

$$C_{p_i} = [C_\Gamma \cdot (1 - \epsilon_{бз} - \epsilon_{бр}) + \epsilon_{бз} \cdot C_{бз} + \epsilon_{бр} \cdot C_{бр}], \quad (2.17)$$

де: C_Γ , $C_{бз}$, $C_{бр}$ – ціни готової продукції, беззамовної (побічної) продукції і браку, відповідно, г.о./т; $\epsilon_{бз}$, $\epsilon_{бр}$ – відносні частки беззамовної

продукції (зниженої категорії якості, немірної довжини, II сорту, браку (відходів, обрізків), відповідно, у загальному обсязі зробленої продукції, г.о./т.

Середній прибуток P_{cp} стану (цеху) при виробництві n профілерозмірів (сортовий прибуток):

$$P_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \Pi_{\text{pi}} - S_{\text{cp}}. \quad (2.18)$$

2.2.4 Рентабельність виробництва прокату

Рентабельність виробництва прокату визначається як відношення чистого прибутку до собівартості продукції. Чистий прибуток утвориться з загального прибутку за винятком частки обов'язкових податків і платежів підприємства в цілому:

Для i -го профілерозміру:

$$R_i = \frac{P_i - \alpha_i \cdot H}{S_i}, \quad (2.19)$$

де: R_i – рентабельність виробництва i -го профілерозміру (у відносних одиницях); H – сума податків, і обов'язкових платежів підприємства, віднесена до загального обсягу виробництва підприємства, г.о./т; α_i – частка i -го профілерозміру в загальному обсязі виробництва підприємства (у відносних одиницях).

Середня рентабельність R_{cp} стану (цеху) при виробництві n профілерозмірів (сортова рентабельність):

$$R_{\text{cp}} = \frac{P_{\text{cp}} - \alpha_n \cdot H}{S_{\text{cp}}}, \quad (2.20)$$

де α_n – сумарна частка обсягу виробництва n профілерозмірів у загальному обсязі виробництва підприємства:

$$\alpha_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i.$$

2.3 Аналіз процесів формування споживчих властивостей сортового прокату

Хімічний склад сортового прокату формується на стадії виробництва сталі для виготовлення заготовок, що надходять на стан.

Необхідна марка сталі для виготовлення того або іншого сортаменту прокату виплавляється за заданою технологією в мартенівських печах, конвертерах або електropечax і, у деяких випадках, для поліпшення якості сталь піддається позапечній обробці (розкисленню, десульфурації, рафінуванню, вакуумуванню ін.).

Рівномірність хімічного складу по довжині заготовок прагнуть забезпечити технологічно при розливанні сталі у початкові злитки – застосуванням утеплюючих надставок для виливниць або більш сучасним способом – безперервним розливанням заготовок на МНЛЗ із застосуванням електромагнітного перемішування.

Безпосередньо на прокатному стані виключена можливість впливу на хімічний склад заготовок, призначених на прокатку заданого профілерозміру. Необхідно лише контролювати правильну посадку в нагрівальну піч заготовок необхідної марки сталі.

Поверхневі дефекти готового прокату, в основному, викликаються дефектами поверхні заготовок. Для усунення можливості утворення з цієї причини дефектів у процесі прокатки застосовують вибіркове або суцільне зачищення поверхні заготовок механічним або вогневим способом. Технологія і глибина зачищення визначається призначення прокату.

Дефекти поверхні, що виникають у процесі прокатки, можуть бути також викликані неправильним режимом обтиснень і нерівномірним нагріванням, перегрівом і зневуглецюванням поверхні заготовок у нагрівальній печі. Варто дотримувати і контролювати технологічні режими нагрівання заготовок різних марок сталей різного призначення і коректувати їх у випадку зміни ритму прокатки (швидкості прокатки різних профілерозмірів) а також при перервах прокатки (затримках, планових і позапланових простоях, перевалках і ін.)

Точність розмірів поперечного перетину готового прокату при вільній прокатці визначається розробленою системою калібрування, точністю початкового настроювання калібрів клітей і коректуванням настроювання в міру вироблення (зносу) калібрів, аж до їхньої зміни або перевалки валків [66,67,86,105,131].

При безперервній прокатці виникає додатковий фактор – міжклітьові зусилля в прокаті, що викликають при підпорі переповнення, а при натягу – утяжку горизонтальних розмірів профілю в калібрах валків. Це приводить до різноширинності розкату по довжині – збільшенню ширини його початкових і кінцевих ділянок. Для зменшення різноширинності необхідно вести прокатку з мінімально можливими міжклітьовими зусиллями. Для зменшення довжини розширених ділянок останнім часом застосовують проміжні і чистові блоки клітей зі скороченими відстанями між клітьями.

Для підвищення точності вертикального розміру розкату застосовують кліті підвищеної жорсткості, попередньо напружені кліті (ПНК), підшипники рідинного тертя (ПЖТ). Для остаточного формування точного розміру на виході стану застосовують калібруючі кліті [139].

Точності розмірів перетину проміжних розкатів і готового прокату контролюють шляхом узяття проб і їхнім обмірюванням. Відомі приклади безперервного контролю розмірів у потоці прокатки.

Точність розмірів довжин прокату визначаються точністю настроювання стаціонарних різальних засобів (пил гарячого і холодного різання, ножиць) або точністю спрацьовування летучих ножиць, обумовленою їхньою конструкцією (однобарабанні, двобарабанні, диференціальні) і режимом їх управління (з безперервним обертанням, у режимі запусків).

Прямизна готового прокату визначається точністю настроювання режимів правильних машин (безперервних роликових правильних машин), пресів. у яких прокат правиться в потоці або поза потоком стану.

Механічні й інші спеціальні властивості готового прокату визначаються, крім хімічного складу сталі, режимами охолодження і термообробки розкатів

на різних ділянках стану, що забезпечує необхідну мікроструктуру і комплекс механічних і фізичних властивостей. До таких режимів відноситься: підохолодження сортового прокату і катанки перед змотуванням, термомеханічне зміцнення арматурної сталі в потоці, контрольоване охолодження катанки на транспортері, що відводить, за технологією Стелмор, спеціальна термообробка готового прокату з легованої сталі і сплавів, загартування рейок і ін.

Технологічні параметри на всіх стадіях прокатки контролюють або прямим способом (температури по зонах нагрівальної печі, на видачі з печі і по ділянках стану; швидкість прокатки по частоті обертів клітей; тиск і витрата охолоджувальної води або повітря, струми навантаження двигунів клітей; установка упорів ножиців і ін.) або побічно (міжклітьовий натяг при безперервній прокатці по струму навантаження суміжних клітей або по прогину прокату; термічне зміцнення – по температурно-часових режимах, термомеханічне зміцнення арматурної сталі – по швидкості прокатки, витраті охолоджувальної води і магнітній фазі в перетині прокату на виході охолоджувального пристрою й ін.)

Готовий прокат піддається обов'язковому вибірковому контролю по розмірах, хімічному складу, міцнісним і іншим властивостям.

2.4 Розробка критеріїв для оцінювання результатів виробництва сортового прокату

Результати виробництва сортового прокату можна оцінити на підставі трьох узагальнених критеріїв.

2.4.1 Узагальнений критерій виконання замовлення

Тотожна відповідність технічних і службових ознак виробленої продукції ознакам замовленої продукції має вигляд:

$$U_{\Gamma} \{a_j\} \subset U_3 \{A_j\}, \quad j = 1 \dots s, \quad (2.21)$$

де: U_Γ, U_3 - відповідно, множини ознак готової і замовленої продукції; a_j – елемент множини ознак (іменована або числова ознака готової продукції); A_j – те ж, для замовленої продукції; s – кількість ознак.

Ознаками продукції a_j, A_j є: вид профілю, його номінальний розмір і довжина, марка сталі, клас точності, клас міцності, категорія якості, категорія службових властивостей, згідно зі стандартом або технічними умовами й іншими ознаками, що обумовлюються в замовленні. Кожна з ознак a_j множини U_Γ повинна бути тотожна ознаці A_j множини U_3 :

$$(a_j \in U_\Gamma) \subset (A_j \in U_3) \quad j=1\dots s . \quad (2.22)$$

Умова виконання обсягу постачання готової продукції m_Γ щодо обсягу замовленої продукції M_3 :

$$m_\Gamma \geq M_3 . \quad (2.23)$$

Умова упакування і виду постачання готової продукції в пакетах (мотках) масою δm_Γ щодо необхідної за замовленням δM_3 :

$$\delta m_\Gamma \geq \delta M_3 . \quad (2.24)$$

Умова виконання терміну постачання готової продукції:

$$\theta_\Gamma \leq \theta_3 , \quad (2.25)$$

де: θ_Γ, θ_3 – відповідно, термін (дата) виготовлення продукції і термін (дата) її постачання (відвантаження), обговорений у замовленні.

Таким чином, сукупність критеріїв по вираженнях (2.22-2.25) представляє узагальнений критерій виконання замовлення.

2.4.2 Узагальнений технічний критерій відповідності параметрів прокату стандартам і технічним умовам.

Вимоги до виконання геометричного розміру поперечного перетину прокату мають вигляд двосторонніх обмежень:

$$X_i - \delta X_i \leq x_i \leq X_i + \delta X_i \quad i=1\dots n , \quad (2.26)$$

де: x_i – фактичний геометричний розмір з n розмірів, що характеризують даний профіль; X_i – відповідний номінальний геометричний розмір за замовленням; δX_i – допуски на номінальний розмір по стандарту для прокату заданого класу точності, можуть бути несиметричними.

При виробництві круглого прокату до вимог виду (2.26) пред'являються ще і вимоги до овальності прокату виду:

$$1 - \delta_{\text{овл}} \leq \frac{x_h}{x_b} \leq 1 + \delta_{\text{овл}}, \quad (2.27)$$

де x_h , x_b – висота і ширина поперечного перетину круглого прокату (геометричні поперечні розміри перетину прокату в перпендикулярних напрямках); $\delta_{\text{овл}}$ – допуск на овальність.

Вимоги до механічних властивостей готового прокату мають, в основному, вид односторонніх обмежень:

$$Y_i \leq y_i \text{ або } Y_i \geq y_i \quad i = 1 \dots n, \quad (2.28)$$

де: y_i – фактична величина механічного параметру з n параметрів, що характеризують даний вид продукції; Y_i – нормована величина відповідного механічного параметру по стандарту або по технічних умовах.

Вимоги до довжин прокату, що поставляється, мають вигляд двосторонніх обмежень:

$$L_i - \delta L_i^- \leq l_i \leq L_i + \delta L_i^+ \quad i = 1 \dots n, \quad (2.29)$$

де: l_i – фактична довжина прокату в i -му замовленні, n – загальне число замовлень; L_i – номінальна довжина прокату, обговорена i -м замовленням; δL_i^- , δL_i^+ – допуски на точність розрізання в мінусову і плюсову сторону щодо номінальної замовленої довжини.

Вимоги до хімічного складу сталі можуть мати вигляд як одно - так і двосторонніх обмежень:

$$Z_i^{\min} \leq Z_i \leq Z_i^{\max} \quad i = 1 \dots n, \quad (2.30)$$

де: Z_i – фактичний зміст i -го хімічного елементу в сталі з кількості n елементів; Z_i^{\min} , Z_i^{\max} – мінімальний і максимальний марочний зміст i -го елемента по стандарту для даної марки сталі;

Таким чином, сукупність критеріїв по вираженнях (2.26-2.30) представляє узагальнений технічний критерій якості. У випадку невиконання цих умов, у залежності від результатів іспитів, партія продукції може бути знижена в категорії якості або переведена в беззамовну.

2.4.3 Узагальнений економічний критерій

Основним економічним критерієм виробництва прокату є прагнення до максимальної його рентабельності, для цеху (див. (2.20))

$$R_n \leq R_{cp} \rightarrow \max, \quad (2.31)$$

де: R_n – нормативна середня рентабельність по цеху.

Очевидно, що R_{cp} адитивно залежить від складових R_i (див. (2.19), тому складовими критеріями є прагнення до максимуму рентабельності виробництва кожного профілерозміру:

$$R_{ni} \leq R_i \rightarrow \max, \quad (2.32)$$

де: R_{ni} – нормативна величина рентабельності для i -го профілерозміру.

Проводячи декомпозицію складових R_i (2.19), одержимо для виконання критерію (2.32) підлеглі критерії:

$$P_{ni} \leq P_i \rightarrow P_{i\max}, \quad (2.33)$$

$$S_{ni} \geq S_i \rightarrow S_{\min i}, \quad (2.34)$$

де: P_{ni} , S_{ni} – нормативні величини прибутку і собівартості продукції i -го профілерозміру; $P_{i\max}$ – максимальна величина прибутку від реалізації продукції i -го профілерозміру; $S_{\min i}$ – мінімальна величина собівартості продукції i -го профілерозміру.

Подальша декомпозиція величини P_i (2.16) дає для виконання критерію (2.33) підлеглі критерії:

$$e_{\text{бз}} \rightarrow \min, e_{\text{бр}} \rightarrow \min, \quad (2.35)$$

а декомпозиція величини S_i (2.14) дає для виконання критерію (2.34) підлеглі критерії:

$$K_{mi} \rightarrow \min; k_r \rightarrow \min; q_i \rightarrow \max. \quad (2.36)$$

І далі, для $q_i \rightarrow \max$ з формул (2.4-2.6) впливають підлеглі критерії:

$$V_{\text{пр}i} \rightarrow \max, k_{ni} \rightarrow \max, K_{pi} \rightarrow \min, t_{ni} \rightarrow \min. \quad (2.37)$$

Виконання підлеглих критеріїв (2.35-2.37) забезпечить виконання й узагальненого економічного критерію(2.31).

Розглянемо технічні шляхи реалізації підлеглих критеріїв.

$K_{mi} \rightarrow \min$ – мінімізація умовно перемінних витрат у сумарних витратах на виробництво i -го профілерозміру за рахунок:

- зменшення вартості прокатної заготовки шляхом використання безперервнолитої заготовки;
- зниження витрати палива на нагрівання металу шляхом удосконалювання технології нагрівання й автоматизації роботи нагрівальних печей, а також застосуванням, де це можливо, гарячого посаду заготовок;
- зниження витрат електроенергії шляхом скорочення втрат на холостий хід електроприводів стану за рахунок скорочення часу настроювання на новий профілерозмір;
- зниження витрат електроенергії за рахунок автоматизації й оптимізації технологічного процесу;
- зниження витрат на ремонт устаткування.

$k_r \rightarrow \min$ – мінімізація умовно постійних витрат у сумарних витратах на виробництво i -го профілерозміру:

- економія загальноцехових витрат при освітленні, опаленні, вентиляції, утриманні будинків і споруджень;
- мінімізація технологічного й обслуговуючого персоналу;
- економія валків і інструмента;

– скорочення часу на ремонт устаткування й ін.

$V_{\text{при}} \rightarrow \max$ – максимізація швидкості прокатки до обмежень, що накладаються технологією й устаткуванням.

$k_{\text{нi}} \rightarrow \max$ – максимізація коефіцієнта використання робочого часу за рахунок підвищення технологічної дисципліни і ритмічності виробництва, скорочення часу на настроювання і контроль процесу прокатки, на ліквідацію аварійних ситуацій і т.п.

$K_{\text{pi}} \rightarrow \min$ – мінімізація видаткового коефіцієнта за рахунок скорочення:

- вигару й окалиноутворення металу в нагрівальній печі;
- технологічних обрізків та обрізків при розкрююванні прокату на замовлені довжини;
- втрат готового прокату при аваріях.

$t_{\text{нi}} \rightarrow \min$ – мінімізація величини технологічної паузи до границь, що забезпечують надійне спрацьовування допоміжних механізмів стану (ножиць, стрілок, клапанів, шлеперів і ін.).

В економічних умовах виробництва може виявитися, що середня величина рентабельності нижче нормативної (2.31). У цьому випадку варто прагнути до одержання і виконання замовлень на більш рентабельні типорозміри прокату або піти на тимчасове зниження рентабельності (аж до збитків), щоб зберегти перспективного замовника або перечекати тимчасове зниження кон'юнктури ринку прокату.

Такі рішення, як і зміну ціни продукції при конкуренції, приймає керівництво підприємства, а завданням керівництва цеху, в будь-якому випадку, є зниження собівартості прокату за рахунок технічних і організаційних заходів.

3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНИХ СИСТЕМ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ОКРЕМИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ

3.1 Аналіз узагальнених критеріїв по пріоритетності їхнього виконання для оцінки результатів виробництва сортового прокату

По пріоритетності виконання узагальнені критерії розташовуються в такій лексикографічній послідовності:

- 1) узагальнений критерій виконання замовлення;
- 2) узагальнений технічний критерій;
- 3) узагальнений економічний критерій.

Перший – узагальнений критерій виконання замовлення вимагає безумовної відповідності готового прокату умовам замовлення по сортаменту, обсягам і термінам постачання, способам упакування і відвантаження.

В даний час істотним фактором стає виконання вигідних термінових малотоннажних партій прокату різноманітного сортаменту. Це вимагає удосконалення технології й устаткування станів для швидкого і гнучкого реагування на вимоги ринку.

Другий – узагальнений технічний критерій підлеглий першому критерію, вимагає одночасного і безумовного виконання багатопараметричного комплексу технічних вимог до характеристик готового прокату, що поставляється за замовленням. Ці вимоги приведені у вітчизняних і міжнародних стандартах на прокатну продукцію, у технічних вимогах і в іншій нормативно-технічній документації, а також можуть бути додатково обговорені в умовах замовлення і постачання.

Відповідно до цих вимог визначаються: марка і хімічний склад стали, комплекс механічних і службових властивостей готового прокату, геометричні розміри поперечного перетину з допусками відповідно до необхідного класу точності, маса погонного метра прокату й ін. Окремо обумовлюються такі параметри виготовлення і постачання готового прокату, як: мірна довжина

стрижнів, маса пакетів стрижнів, маса і розміри мотків сортового прокату або катанки.

Третій – узагальнений економічний критерій є внутрішнім для постачальника прокатної продукції і визначає економічну ефективність виробництва. Цей критерій спрямований на підвищення рентабельності і зниження собівартості виробництва прокату за рахунок економії витрат і підвищення продуктивності стану.

Додатковою складовою зниження собівартості може бути реалізація побіжної продукції меншої вартості, що утворюється внаслідок особливостей технології виробництва основної замовленої продукції. До такої побіжної продукції можна віднести, наприклад, стрижні некротної довжини, що утворюються при розкрююванні прокату на замовлену довжину; мотки прокату або катанки з розмірами або масою, що не відповідають замовленню, недокати після аварійної порізки й ін.

Крім того, варто прагнути до одержання вигідних замовлень на прокат більш високої вартості, що має підвищені точнісні і службові характеристики, за умови, якщо виконання цих замовлень забезпечено технологією, устаткуванням і автоматизацією стану.

Виходячи з узагальненої системи критеріїв для оцінки результатів виробництва сортового прокату, системи критеріїв для оцінки якості управління окремими процесами виробництва сортового прокату розподіляються на основні і допоміжні, а кожний з цих критеріїв являє собою відображення відповідного критерію оцінки результатів виробництва сортового прокату.

У відповідності зі структурою виробництва сортового прокату, виділені три системи критеріїв:

- система критеріїв для оцінки якості управління швидкісним режимом прокатки;
- система критеріїв для управління прискореним охолодженням (термозміцненням) прокату;

– система критеріїв для управління виробництвом прокату в стрижнях.

3.2 Система критеріїв для оцінки якості управління швидкісним режимом прокатки

Аналізу впливу швидкісного режиму безперервної прокатки на якість готового прокату присвячене значне число робіт, зокрема [1,15,66,86]. В усіх цих роботах відзначається вплив швидкісного режиму прокатки на поперечні розміри готового прокату.

Тому, для управління швидкісним режимом прокатки основним критерієм є забезпечення стабільності поперечних розмірів прокату по його довжині – розмах перемінної складової кожного з нормованих розмірів повинен розташовуватися в межах розмаху відповідного поля допуску, що забезпечує виконання поточного замовлення по необхідному класу точності.

Таким чином, основною задачею управління швидкісним режимом прокатки є забезпечення вимог по поперечних розмірах товарного прокату – тобто необхідно забезпечити виконання умов виду (2.26,2.27).

Типовий графік зміни товщини і ширини дрібносортового прокату по його довжині приведений на рис.3.1.

Складові Δh_3 і Δb_3 зв'язані, в основному, з точністю проточки калібрів валків і точністю механічного устаткування випускаючої кліті. Їх можна усунути тільки удосконалюванням конструкції випускаючої кліті і підвищенням точності виготовлення її деталей, насамперед валків. При прокатці через чистовий блок дана складова практично відсутня.

Частково, дані складові пов'язані з нерівномірністю нагрівання заготовки в печі по довжині і нерівномірністю її охолодження на рольгангу перед першою кліттю при задачі заготовки в стан.

Складові Δb_3 і Δb_4 пов'язані з утяжкою профілю в калібрах, викликаної міжклітьовими зусиллями. Вони можуть бути усунуті за рахунок управління швидкісним режимом прокатки.

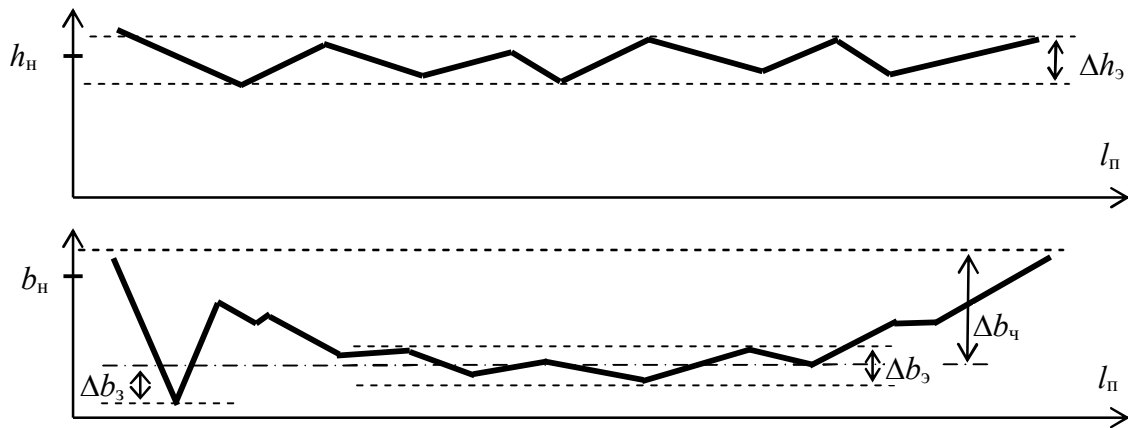


Рисунок 3.1 – Типовий графік зміни товщини (h) і ширини (b) дрібносортового прокату по його довжині (l_n):

h_n , b_n – номінальна товщина і ширина дрібносортового прокату, відповідно; Δh_s , Δb_s – відповідно, складові відхилень товщини і ширини прокату, викликані ексцентриситетом валків; Δb_3 – складова відхилення ширини передньої ділянки прокату, викликані його утяжкою після захвату; Δb_4 – складова відхилення ширини прокату, викликана його прокаткою в групі клітей з натягом

При штучній прокатці, коли передній і задній натяги у кліті відсутні, стабільність поперечних розмірів прокату по довжині не визначається швидкісним режимом прокатки, а залежить від нерівномірності перетину і температури по довжині підкату, сумарної жорсткості кліті і валкової системи і зношенню калібрів. Підвищення стабільності поперечних розмірів у цьому випадку можна досягти регульованим нагріванням по довжині заготовок у печі, застосуванням клітей підвищеної жорсткості (попередньо напружених – ПНК і з підшипниками рідинного тертя ПЖТ), а також регулярним контролем зношення калібрів і їх вчасною зміною.

Таким чином, коли заготовка в кожен момент часу прокатується тільки в одній кліті, швидкісний режим не впливає на геометричні розміри товарного прокату.

При безперервній прокатці істотним фактором, що впливає на стабільність поперечних розмірів прокату по довжині, є міжклітьовий натяг у безперервній чистовій групі клітей. При цьому, вплив натягу на вільний горизонтальних розмір прокату – ширину через розширення виявляється на порядок більшим,

ніж вплив на вертикальний розмір через зниження зусилля прокатки і деформацію кліті і валків. Тому впливом натягу на вертикальний розмір звичайно зневажають, і розглядають його вплив тільки на подовжню різноширинність.

Таким чином, швидкісний режим прокатки впливає на геометричні розміри готового прокату по ланцюжку: швидкісний режим > міжклітьові зусилля > зміна розширення. Тобто, швидкісний режим безперервної прокатки визначає не стільки абсолютні значення поперечних розмірів, а їхнє відхилення від величини, обумовленою настроюванням калібрів.

Тому, на практиці, для безперервної прокатки критерії (2.26) приймають вигляд однопараметричного критерію:

$$\Delta b \leq \delta b_{\Sigma} , \quad (3.1)$$

де δb_{Σ} – максимально припустима різноширинність прокату:

$$\delta b_{\Sigma} < \delta b^{-} + \delta b^{+} , \quad (3.2)$$

а δb^{-} , δb^{+} – мінусові і плюсові поля допусків на ширину прокату.

Більш строго варто записати:

$$\delta b_{\Sigma} \leq \delta b^{-} + \delta b^{+} - \Delta b_{\text{настр}}^{\max} , \quad (3.3)$$

де $\Delta b_{\text{настр}}^{\max}$ – максимальна погрішність по ширині, зв'язана з настроюванням калібрів.

Отже, значенням δb_{Σ} необхідно задаватися в кожному конкретному випадку, не тільки виходячи з вимог стандарту на даний вид продукції, але і виходячи зі стану устаткування клітей (стану натискних механізмів валків, підшипників і т.д.) і інших факторів, що визначають $\Delta b_{\text{настр}}^{\max}$.

Додатковим критерієм управління швидкісним режимом прокатки, зв'язаним з точністю поперечних розмірів, є мінімум розкиду поперечних розмірів прокату по його довжині, точніше мінімум різноширинності прокату:

$$\Delta b \Rightarrow \min . \quad (3.4)$$

Очевидно, що даний критерій зв'язаний з необхідністю звести до мінімуму вплив $\Delta b_{\text{настр}}^{\text{max}}$ у (3.3), оскільки точне визначення даної величини важко, і вона має властивість змінюватися в процесі експлуатації устаткування.

Підвищення точності прокату важливо не тільки для задоволення вимог стандартів, найбільш жорстких по даному параметру, але й економічно вигідно при виконанні замовлень, що обумовлюють відвантаження продукції по кількості прутків мірної довжини в партії, а не по їхній масі.

Економічні аспекти виробництва прокату підвищеної точності розглянуті в роботах [22,134].

При відвантаженні партії по масі виробникові вигідніше вести прокатку в плюсовому полі допуску і за рахунок цього трохи підвищити продуктивність прокатного стану, знижуючи собівартість прокату за рахунок умовно перемінних витрат. Однак, при постачанні прокату в стрижнях по теоретичній масі (по кількості стрижнів у партії, а не по її масі) стає вигідним вести прокатку в мінусовому полі допуску, тому що при цьому зменшується питома витрата заготовки – основної складової собівартості прокату (рис.3.2.) на виконання замовлення.

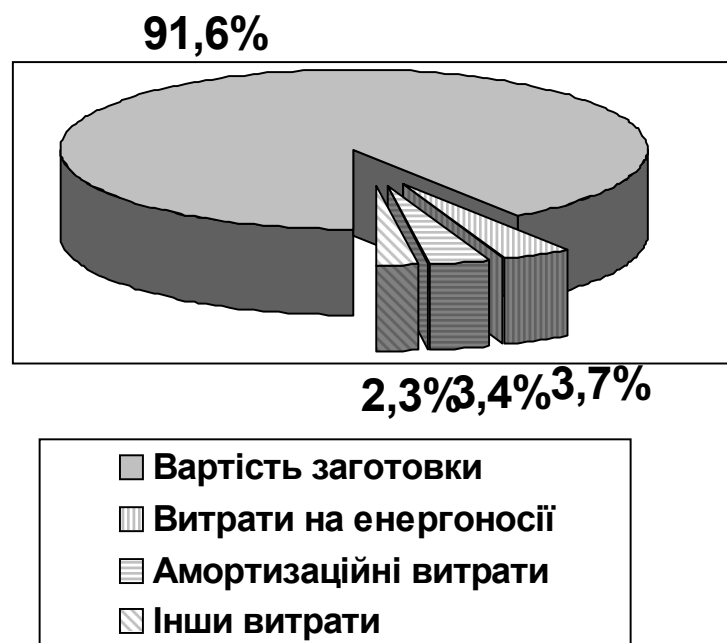


Рисунок 3.2 – Структура собівартості арматурного прокату, виробляемого на безперервних дрібносортих станах сортопрокатного цеху 1 ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Зокрема, економія при прокатці в мінусовому полі допуску арматурного прокату, за звичайною технологією може перевищити економію від використання технології прокатки з поділом. Так, виходячи з даних на допуски розмірів арматурного прокату [5], зниження собівартості профілів №10÷14 при прокатці в мінусовому полі допуску можна оцінити величиною до 2%, а зіставивши дані робіт [26,27] зі структурою собівартості, представлені на рис.3.2, зниження собівартості при прокатці цих же профілів з поділом складе 1,0÷1,5%.

В обох випадках, зниження собівартості прокату буде тим більше, чим менше значення Δb можна гарантовано забезпечити.

Іншим додатковим критерієм, зв'язаним із собівартістю прокату, є мінімізація часу настроювання режиму безперервної прокатки.

Дійсно, загальні витрати часу при виробництві прокату під замовлення включають три складові – час підготовки стану до прокатки замовленого профілерозміру (перевалка клетій, вихід пічі на необхідний температурний режим і т.п.), час настроювання технологічного режиму, що задовольняє технічним критеріям виробництва продукції під замовлення (див. п.2.4.2.) і власне час виробництва (прокатки):

$$\tau_{вз} = \tau_{пд} + \tau_{н} + \tau_{пр} , \quad (3.5)$$

де $\tau_{вз}$ – час виконання замовлення; $\tau_{пд}$ – час підготовки стану до виконання замовлення; $\tau_{н}$ – час настроювання технологічного режиму виробництва прокату; $\tau_{пр}$ – власне час виробництва (прокатки) замовленої продукції.

Процес настроювання технологічного режиму виробництва прокату полягає в поштучній прокатці заготовок з наступною перевіркою параметрів прокату на відповідність умовам замовлення – технічним критеріям його виробництва. За результатами прокатки приймається рішення про корекцію режиму виконання тієї або іншої операції. Для часу настроювання технологічного режиму виробництва прокату може бути записано:

$$\tau_n \geq \sup\{\tau_{nc}, \tau_{no}, \tau_{nr}, \dots\}, \quad (3.6)$$

де τ_{nc} – час настроювання швидкісного режиму прокатки; τ_{no} – час настроювання режиму охолодження прокату; τ_{nr} – час настроювання режиму розкрою і т.п.

Слід зазначити, що настроювання швидкісного режиму прокатки на безперервних прокатних станах займає особливе місце в настроюванні технологічного режиму виробництва необхідного профілерозміру. До настроювання режимів охолодження, розкроювання й інших операцій приступають після попереднього настроювання швидкісного режиму прокатки, тобто після того як забезпечене проходження прокатом лінії клітей.

Очевидно, що забезпечуючи

$$\tau_{nc} \Rightarrow \min, \quad (3.7)$$

ми досягаємо зменшення τ_n і, отже, $\tau_{вз}$.

Тоді безпосередньо з (2.12) випливає, що зменшується і частка умовно постійних витрат у собівартості продукції, тобто знижується собівартість прокату.

Управління швидкісним режимом безперервної прокатки за основним критерієм – (3.1), вимагає коректування частот обертання електроприводів клітей безперервної групи, спочатку заданих відповідно до калібрування профілерозміру, для забезпечення міжклітьових натягів, при яких поперечний розмір прокату не виходить з поля допусків.

Управління по першому додатковому критерію – (3.4) вимагає більш точного настроювання швидкісного режиму клітей з урахуванням можливої зміни поперечного перетину підкату після чорнової групи і/або зміни температури підкату. У цьому випадку необхідне коректування швидкісного режиму прокатки в залежності від поточних технологічних збурювань для підтримки мінімального рівня міжклітьових натягів (не більш 5–10 Н/мм²).

Управління по другому додатковому критерію – (3.7), вимагає швидкого перерахунку і переустановлення швидкісного режиму клітей при зміні

профілерозміру, перевалках валків або зміні калібру, а також – швидку установку швидкісного режиму, що забезпечує виконання критерію (3.1). Мінімально можливий час настроювання швидкісного режиму прокатки – час прокатки частини першої заготовки.

3.3 Система критеріїв для управління прискореним охолодженням прокату

Система критеріїв для управління прискореним охолодженням залежить від задач, розв'язуваних даною операцією.

При виробництві прокату для машинобудування і метизної промисловості прискорене охолодження прокату здійснюється з метою запобігання зростанню зерна прокату і для зменшення окалиноутворення.

При виробництві прокату для армування залізобетонних конструкцій – арматурного прокату, прискорене охолодження прокату вирішує задачу одержання необхідного комплексу механічних властивостей. Прискореним охолодженням здійснюється загартування прокату з прокатного нагрівання – його термозміцнення.

Кожній із задач, розв'язуваних операцією прискореного охолодження, відповідає своя система критеріїв.

Оскільки швидкість росту зерна аустеніту після обробки металу тиском тим вище, чим вище температура металу, то технологічний критерій управління при виробництві прокату для машинобудування і метизної промисловості має вигляд:

$$t_{\text{см_охл}}^0 \Rightarrow \min, \quad (3.8)$$

де $t_{\text{см_охл}}^0$ – середньомасова температура охолодженого прокату (температура прокату на виході установки примусового охолодження).

Однак, поряд із запобіганням (мінімізацією) росту зерна аустеніту в прокаті не можна допустити його зміцнення, оскільки таке зміцнення приводить до погіршення його оброблюваності, тобто до росту енерговитрат на обробку прокату в наступних переділах.

Тому, критерій (3.8) повинен використовуватися разом із критеріальними обмеженнями:

$$t_{\text{см_охл}}^0 > t_{\text{Ac3}}^0, \quad (3.9)$$

$$t_{\text{пвр_охл}}^0 > t_{\text{Ms}}^0, \quad (3.10)$$

де t_{Ac3}^0 – температура критичної точки A_3 (температура початку ферітних перетворень – перетворення γ -заліза в α -залізо), $t_{\text{пвр_охл}}^0$ – температура поверхні прокату в процесі охолодження, t_{Ms}^0 – температура початку мартенситних перетворень.

Додатковий технічний критерій впливає з подзадачі забезпечення стабільних властивостей прокату по його довжині:

$$\Delta t_{\text{см_охл}}^0 \Rightarrow \min \quad (3.11)$$

При виробництві арматурного прокату, а це найбільш масовий вид сортового прокату [64], основною задачею прискореного охолодження – термозміцнення є формування високих міцнісних властивостей сталі.

Основні вимоги до механічних властивостей арматурного прокату приведені в табл.3.1.

В області ресурсозберігаючих технологій, що забезпечують необхідні механічні властивості арматурного прокату Україна займає одне з провідних місць у світі завдяки роботам К.Ф. Стародубова, І.Г. Узлова, В.Я. Савенкова, Ю.З. Борковського, В.В. Калмикова, В.В. Парусова [16,113,118,120] і ін. і широкому впровадженню даних технологій на сортопрокатних станах ВАТ «Криворіжсталь» [38].

При виробництві арматурного прокату класу A500C, що має найбільш масове застосування в промисловості, у нових вітчизняному (ДСТУ 3760–98), російському (СТО АСЧМ 7-93) і загальноєвропейському (ENV 10080) стандартах [5,29,64], уже відсутні посилання на спосіб виробництва прокату, як це було в колишніх стандартах [19,20].

Таблиця 3.1 – Зведена таблиця основних вимог до механічних характеристик арматурного прокату

Найменування показників		Країна і стандарти, рік введення					
		Україна ДСТУ 3760– 98:1998	ДСТ 10884– 94:1994, ДСТ 5781–	ЄС ENV 10080:1995	Великобританія BS 4449:1988	Міжнародний стандарт ISO 6935– 2:1991	Ізраїль SI 739:1993
1		2	3	4	5	6	7
Клас арматурної сталі ($\sigma_T, \text{H/mm}^2$; $\sigma_y, \text{H/mm}^2$; $\delta_5(\delta_{10}), \%$; $A_{gt}(\delta_p), \%$)	240 (250)	240;290; 25;—	×		— ; — ; — 22	×	
	300	90;490; 19;—		×		300;330; 16;—	×
	400	400;500; 16; —	;550; 16 ;—		×	400;440; 14; 2,5	00;520; 1 2;—
	500 (460)	600; —	500; 14;	500;54 0; — ;2,5	460;506; 12;—	500;550; 14; 2,5	×
	600	600; 800; 12; 4		×4			
	800	800; 1000; 8; 2					
	1000	1000; 1250; 7; 2					
	1200	×	1200;1450 6; 2				

Примітка: для арматурної сталі виробленої за ДСТ 10884–94:1994 і ДСТУ 3760-98 тимчасовий опір розриву не повинен перевищувати значень, приведених у таблиці більш ніж на 200 H/mm^2 , по стандарту Великобританії BS 4449 150 H/mm^2 .

Використанням технології термічного зміцнення арматурного прокату досягається зниження витрати легуючих елементів від 21,4 до 17,5 кг на одну тону сталі [16,104]. Українські вчені (Інститут чорної металургії) у співдружності з виробниками (ВАТ «Криворіжсталь») розробили марки і технології виробництва низьковуглецевих низьколегованих сталей, орієнтованих на легування феросплавами, виробництво яких базується на матеріально-сировинних ресурсах промисловості України. Ціна вітчизняних

феросплавів у 3 - 4 рази нижче, ніж у феросплавів, що включають легуючі елементи (ніобій, ванадій і ін.), використуваних для цих же цілей за кордоном [65,75].

Усе це забезпечує істотну оптимізацію технології виробництва арматурного прокату за економічним критерієм (див. п.2.4.3). Тому формулювання критеріїв управління прискореним охолодженням арматурного прокату повинне проводитися стосовно технології його термозміцнення з прокатного нагрівання.

Однак, розкид механічних властивостей термозміцненого арматурного прокату в 2–3 рази вищий, ніж у гарячекатаного, що зв'язано з нерівномірністю цих властивостей по довжині розкату внаслідок нерівномірної швидкості руху прутка арматури через охолоджувальний пристрій [64].

Зміна швидкості руху прутка через охолоджувальний пристрій викликається трьома факторами: у процесі прокатки – зміною швидкості останньої (випускний) кліті, а після виходу прокату з цієї кліті – його прискоренням гідротранспортуючою силою установки примусового охолодження і транспортуючою силою підводячих рольгангів холодильника.

Другим фактором, що істотно впливає на стабільність властивостей арматурного прокату, є стабільність вмісту вуглецю в сталі [64]. Так, збільшення його вмісту на 0,01% у термомеханічно зміцненої сталі Ст5 підвищує тимчасовий опір розриву σ_b на $10 \div 15 \text{ Н/мм}^2$ і границю текучості $\sigma_T (\sigma_{0,2})$ на $15 \div 20 \text{ Н/мм}^2$ при зниженні відносного подовження δ_5 на $0,3 \div 0,5\%$ (абсолютних) [16,113].

Аналізуючи вплив даного фактора на стабільність механічних властивостей арматурного прокату, необхідно враховувати той факт, що зміна масової частки вуглецю в заготовці зв'язано, насамперед, зі зміною хімічного складу сталі в плавці, що відомий ще до початку прокатки. При прокатці заготовки, отриманої методом безперервного розливання, це є практично єдиною причиною зміни масової частки вуглецю.

Якщо ж ведуть прокатку заготовок, отриманих зі сталі, розлитої у виливниці, то на нестабільність механічних властивостей прокату додатковий вплив робить нерівномірність вмісту хімічних елементів по висоті зливка, що носять випадковий характер. Так, за даними робіт [65,87,111], для різних злитків граничні відхилення вмісту вуглецю складають від 0,02% до 0,11%.

Тому в арматурному прокаті, виробленому зі сталі, розлитої у виливниці, що характерно для вітчизняної технології, підвищено розкид механічних властивостей у порівнянні із сучасними виробництвами, що використовують для одержання заготовки машини безперервного розливання сталі.

Так, абсолютна величина розкиду тимчасового опору розриву σ_b при виробництві прокату зі сталі з однаковим вмістом вуглецю складає 110÷120 Н/м² [141], тоді як припустиме перевищення нормованої величини за ДСТУ 3760–98 складає 300 Н/мм² [29], а за ГОСТ 10884-94 – 200 Н/мм² [19].

Таке співвідношення середньоплавочного розкиду механічних властивостей арматурного прокату із шириною припустимого інтервалу їхніх варіацій висуває підвищені вимоги до точності настроювання режиму термічного зміцнення для гарантування одержання необхідних механічних властивостей готового прокату.

При формулюванні критеріїв управління процесом термозміцнення необхідно враховувати, що формування структури прокату починається вже в процесі прискореного охолодження, і механічні властивості навіть при відомому хімічному складу сталі не можна однозначно зв'язати зі середньомасовою температурою прокату на виході установки прискореного охолодження. Тому основним критерієм управління режимом прискореного охолодження (термозміцнення) є забезпечення механічних властивостей готового прокату відповідно до вимог замовлення по класу міцності в межах граничних значень, установлених даними вимогами відповідно до (2.28), зокрема:

$$\sigma_T \geq \sigma_{T_c}, \quad (3.12)$$

$$\sigma_{B_c} \leq \sigma_B \leq \sigma_{B_c} + \Delta\sigma_{B_c}, \quad (3.13)$$

$$\delta_5 \geq \delta_{5_c}, \quad (\delta_{10} \geq \delta_{10_c}), \quad (3.14)$$

$$\delta_p \geq \delta_{p_c}, \quad (3.15)$$

де σ_T , σ_{T_c} – фактична границя текучості і нижня границя границі текучості відповідно до стандарту; σ_B , σ_{B_c} , $\Delta\sigma_{B_c}$ – фактичний тимчасовий опір розриву, нижня границя тимчасового опору розриву відповідно до стандарту і максимальне припустиме перевищення тимчасового опору розриву щодо нижній границі відповідно до стандарту; δ_5 (δ_{10}), δ_{5_c} (δ_{10_c}) – фактичне відносне подовження прокату після розриву і його нижня границя відповідно до стандарту; δ_p , δ_{p_c} – фактичне відносне рівномірне подовження прокату після розриву і його нижня границя відповідно до стандарту.

Для зниження розмірності системи критеріїв (3.12-3.15) можна скористатися наступною властивістю термозміцненого прокату: для одного класу міцності і групи марок сталі, для якої відпрацьована технологія термозміцнення, відношення тимчасового опору розриву до границі текучості є практично постійною величиною [16,64,113]:

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_T} = k_{\sigma_B/\sigma_T} \approx const, \quad (3.16)$$

Тоді критерії (3.12,3.15) можуть бути згорнуті в наступний критерій:

$$\sup \{ \sigma_{B_c}, \sigma_{B_T} \} \leq \sigma_B \leq \sigma_{B_c} + \Delta\sigma_{B_c}. \quad (3.17)$$

Очевидно, що чим стабільніші властивості, які можуть бути забезпечені при виробництві арматурного прокату, тим більш широке коло замовлень може бути виконане прокатним станом. При існуючому становищі ринку металу це дає більш повне завантаження устаткування, а, отже, і скорочення умовно постійної складової в собівартості продукції. Другою економічно вигідною

можливістю досягнення більш високої стабільності властивостей прокату на стані є скорочення часу настроювання режиму термозміцнення, що також приводить до зниження умовно постійної складової в собівартості продукції.

Тому додатковим критерієм управління доцільно прийняти

$$\Delta\sigma_B \Rightarrow \min, \quad (3.18)$$

$$\Delta\delta_5(\Delta\delta_{10}) \Rightarrow \max. \quad (3.19)$$

Як уже відзначалося вище в цьому параграфі, природа розкиду механічних властивостей термозміцненого прокату має три основні складові:

– нерівномірність по довжині прокату, зв'язана з нерівномірним його охолодженням по довжині внаслідок нерівномірної швидкості руху прутка арматури через охолоджувальний пристрій;

– нерівномірність механічних властивостей прокату усередині плавки, зв'язана з неоднорідністю хімічного складу заготовок однієї плавки внаслідок лікваций хімічних елементів у злитку при його остиганні, або, у значно меншому ступені, внаслідок лікваци хімічних елементів усередині ковша при безперервному розливанні в сталі;

– нерівномірність механічних властивостей прокату, зв'язана з неоднорідністю хімічного складу заготовок різних плавок.

Тому, доцільно провести декомпозицію критеріїв (3.18,3.19), розділивши кожний на три складових:

$$\Delta\sigma_{B_{ДЗ}} \Rightarrow \min, \quad (3.20)$$

$$\Delta\sigma_{B_{ВП}} \Rightarrow \min, \quad (3.21)$$

$$\Delta\sigma_{B_{МП}} \Rightarrow \min, \quad (3.22)$$

$$\Delta\delta_{5_Д}(\Delta\delta_{10_Д}) \Rightarrow \max, \quad (3.23)$$

$$\Delta\delta_{5_В}(\Delta\delta_{10_В}) \Rightarrow \max, \quad (3.24)$$

$$\Delta\delta_{5_m}(\Delta\delta_{5_m}) \Rightarrow \max, \quad (3.25)$$

де $\Delta\sigma_{в_дз}$, $\Delta\delta_{5_д}(\Delta\delta_{10_д})$ – розкид тимчасового опору розриву і відносному подовженню при розриві по довжині прокату однієї заготовки; $\Delta\sigma_{в_вп}$, $\Delta\delta_{5_в}(\Delta\delta_{10_в})$ – розкид середніх значень тимчасового опору розриву і відносному подовженню при розриві прокату однієї плавки; $\Delta\sigma_{в_мп}$, $\Delta\delta_{5_м}(\Delta\delta_{5_м})$ – розкид середніх значень тимчасового опору розриву і відносному подовженню при розриві між прокатами з різних плавки.

Іншим додатковим критерієм є мінімізація часу настроювання режиму прискореного охолодження, задовольняючому основному критерію:

$$\tau_{но} \Rightarrow \min. \quad (3.26)$$

Оскільки $\tau_{но}$ є однією зі складових τ_n (див.(3.6)), то її мінімізацією досягається зменшення τ_n і, отже, загального часу виконання замовлення $\tau_{вз}$.

Тим самим знижується умовно постійна складових загальних витрат.

Оскільки критерії (3.12-3.15) задають область припустимих значень вхідних у них величин, а критерії (3.18,3.19) вимагають, щоб фактична величина розкиду цих значень була мінімальна, те необхідно визначитися з критерієм, що визначає розташування області фактичних значень усередині області припустимих значень даних величин.

За такий критерій може бути прийнятий критерій мінімуму енерго- і ресурсовитрат на термозміцнення прокату. Оскільки основним ресурсом, що витрачається при термозміцненні, є охолоджувальна вода, а основні витрати енергії зв'язані з її подачею в охолоджувальні пристрої, то в якості третього додаткового критерію – енергозберігаючого критерію - варто прийняти:

$$P_{т_охл} \cdot Q_{т_охл} \Rightarrow \min, \quad (3.27)$$

де $P_{т_охл}$, $Q_{т_охл}$ – тиск і витрата води в трасі охолодження.

Якщо апіорі прийняти, що збільшення потужності потоку охолоджувальної води приводить до більш інтенсивного охолодження прокату і, внаслідок, до росту його міцнісних властивостей і зниженню пластичних, то одним з похідних критерію (3.27) є критерій:

$$\sigma_b \Rightarrow \min, \quad (3.28)$$

або

$$\delta_5(\Delta\delta_{10}) \Rightarrow \max. \quad (3.29)$$

Надалі будемо розглядати (3.28), припускаючи, що при його мінімізації забезпечується і максимум (3.29).

Необхідно відзначити, що, по-перше, мінімізація за критерієм (3.27) приводить до мінімізації (3.28), але не навпаки – мінімум (3.28) не гарантує мінімуму (3.27). По-друге, мінімізація (3.28) припускає, природно, що виконуються критерії-обмеження (3.12-3.15).

Управління за основним критерієм (3.12-3.15) потребує розрахунку й установки режиму прискореного охолодження (кількості секцій охолодження і витрати охолоджувальної води) в залежності від розміру профілю, марки сталі, необхідного класу міцності, швидкості прокатки, температури прокату й охолоджувальної води.

Управління за додатковим критерієм (3.20,3.23) вимагає оперативного коректування встановленого режиму охолодження по довжині кожної заготовки у залежності від її прискорення гідравлічним (тягнучим) зусиллям охолоджувальних секцій і тягнучим зусиллям рольганга, а також такого настроювання режимів термозміцнення і транспортування прутка рольгангом, при яких його пришвидшення у трасі прискореного охолодження було би мінімальним.

Управління за додатковим критерієм (3.21,3.24), вимагає коректування встановленого режиму охолодження від заготовки до заготовки в залежності від фактичного хімічного складу сталі поточної заготовки.

Управління за додатковим критерієм (3.22,3.25), вимагає коректування встановленого режиму охолодження, в залежності від хімічного складу виробленої марки сталі кожної нової плавки.

Управління за додатковим критерієм (3.27) вимагає оптимізації режиму термозміцнення і регулювання витрати охолодної води, виходячи з поточних умов охолодження.

3.4 Система критеріїв для управління виробництвом прокату в стрижнях

Основним технічним критерієм виробництва прокату в стрижнях є критерій (2.29). Оскільки при масовому виробництві прокату в стрижнях замовленнями задаються їхня мірна довжина, то фактична довжина прокату в i -ому замовленні – l_i , у (2.29) є мірною довжиною.

В основу додаткової системи критеріїв виробництва прокату в стрижнях доцільно покласти такий економічний критерій як прибуток (2.16).

Це зв'язано, з однієї сторони, жорсткою прив'язкою ціноутворення на прокат у стрижнях з довжинами стрижнів у пачках, а, з іншого боку, одночасного виробництва прокату в стрижнях різної довжини.

Перепишемо його у виді:

$$Q = C - M - Z \Rightarrow \max, \quad (3.30)$$

де C – ціна продукції; M – питомі витрати на початкову сировину (на одиницю продукції), Z – питомі витрати на виробництво готової продукції (без витрат на вихідну сировину).

Стандартами [5] передбачаються три різновиди товарного прокату в залежності від довжин стрижнів у партії постачання: мірний прокат – прокат з довжиною стрижнів, строго (у межах допуску) обговореною замовленням (відповідає критерію (2.29)), немірний прокат – з довжинами стрижнів в обговорених стандартом або замовленням границях, і мірний прокат із залишком – мірний прокат, який допускає незначну (до 15%) кількість скорочених стрижнів у партії постачання.

В практиці металургійних комбінатів України і держав СНД за базову ціну прийнята ціна немірного прокату. При постачанні прокату мірної довжини його ціна визначається як сума ціни немірного прокату і приплати за мірність продукції. Аналогічно формується і ціна на мірний прокат з залишком, але величина приплати для нього менше, ніж для мірного прокату.

Якщо проаналізувати стандарти, то видно, що мірний прокат як товарний вид продукції присутній у всіх стандартах, тоді як немірний прокат і мірний із залишком – у деяких (України і СНД). Це зв'язано з тим, що масовий збут має саме мірний прокат, на нього приходиться 100% великих замовлень. Оскільки ж виробництво прокату визначеного виду організується відповідно до наявного портфелю замовлень, то виробництво немірного прокату і мірного прокату з залишком може розглядатися як виробництво побіжного продукту з відкладеним терміном реалізації (по ISO-9000 – «невідповідний продукт»). Тому ціна немірного прокату і мірного прокату з залишком, яка використована в критерії, повинна враховувати дисконтні втрати до товарної ціни продукції. А це вже має на увазі пріоритетність задачі забезпечення максимально можливого виходу мірного прокату при виробництві прокату в стрижнях.

Розглянемо тепер таку складову критерію (3.30), як витрати на початкову сировину. Оскільки питомі витрати на початкову сировину цілком інваріантні такій характеристиці товарного прокату як довжини стрижнів, то в критерії (3.30) при рішенні задачі управління операціями, що забезпечують одержання прокату в стрижнях, вони можуть бути прийняті постійними.

Досить близька картина – і з витратами на виробництво готової продукції. Так, витрати на енергоносії, що є другою по значущості складовою собівартості прокату, приходяться на нагрівання заготовок під прокатку, привід клітей, що здійснюють обтиснення заготовки, і на привід інших механізмів стану, що забезпечують його функціонування. Тому зв'язати цю складову, як і інші складові собівартості, безпосередньо з довжинами стрижнів у товарній продукції досить важко, а якщо вона і є, то є величиною досить малою і зв'язаною з додатковими витратами на обробку стрижнів прокату. Стрижні

отримують в результаті останньої операції на стадії розрізання й охолодження прокату – розкрою пакета прутків на пачки стрижнів. Отже, при аналізі цієї і всіх наступних операцій витрати на кожну з операцій при рішенні оптимізаційної задачі можуть не розглядатися, оскільки вони інваріантні до довжин стрижнів.

На останній стадії – стадії збирання й обробки, має місце розгалуження технологічного процесу. Після розрізання прокату на стрижні вони направляються або безпосередньо на пакування (у випадку, якщо відрізана пачка стрижнів містить стрижні однієї сортності по довжині), або на сортування. Операція сортування вимагає додаткових витрат, що впливають на собівартість продукції.

Тому товарна вартість прокату заданого профілерозміру, зробленого за кампанію його прокатки C_{Σ} , може бути представлена у виді [45]:

$$C_{\Sigma} = (C_{\text{н}} + P_{\text{м}}) \cdot G_{\text{м}} + (C_{\text{н}} + P_{\text{мо}}) \cdot G_{\text{мо}} + C_{\text{н}} \cdot G_{\text{н}} + C_{\text{к}} \cdot G_{\text{к}}, \quad (3.31)$$

де $C_{\text{н}}$ – ціна немірного прокату заданого профілерозміру і класу по механічних властивостях; $C_{\text{к}}$ – ціна коротких стрижнів прокату, що не відповідають вимогам стандартів; $P_{\text{м}}$ і $P_{\text{мо}}$ – приплати за міру і міру з залишком, відповідно; $G_{\text{м}}, G_{\text{мо}}, G_{\text{н}}, G_{\text{к}}$ – сумарні маси пачок міри, міри з залишком, немірного прокату і коротких стрижнів, відповідно, зроблених за кампанію.

Розділивши ліву і праву частину (3.31) на загальний обсяг прокату, зробленого за кампанію, можна одержати середню ціну тонни прокату:

$$C_{\text{ср}} = (C_{\text{н}} + P_{\text{м}}) \cdot g_{\text{м}} + (C_{\text{н}} + P_{\text{мо}}) \cdot g_{\text{мо}} + C_{\text{н}} \cdot g_{\text{н}} + C_{\text{к}} \cdot g_{\text{к}}, \quad (3.32)$$

де $g_{\text{м}}, g_{\text{мо}}, g_{\text{н}}, g_{\text{к}}$ – питомі частки мірного, мірного з залишком, немірного прокату і коротких стрижнів, отримані за кампанію прокатки необхідного профілерозміру з заданим комплексом механічних властивостей.

Оскільки для загального обсягу прокату, зробленого за кампанію, справедливо:

$$G_{\Pi} = G_M + G_{MO} + G_H + G_K ,$$

де G_{Π} – сумарна маса прокату даного профілерозміру з необхідним комплексом механічних властивостей, зробленого за кампанію прокатки,

то для питомих часток прокату маємо:

$$g_M + g_{MO} + g_H + g_K = 1 . \quad (3.33)$$

Однак, вираження (3.32) не враховує дисконтні втрати в ціні на продукцію D , що виникають через затримки з реалізацією продукції, що залежать від часу затримки на реалізацію продукції і коефіцієнта дисконтування [2,45,46].

Дисконтні втрати виникають тільки при реалізації міри з залишком і немірної продукції, оскільки прокатна кампанія профілерозміру організується під великі замовлення, 100% яких приходиться на мірний прокат, а короткі стрижні прокату відразу йдуть на переробку. Тому, з урахуванням дисконтних втрат, (2.16) переписеться у виді:

$$C_{cp} = (C_H + P_M) \cdot g_M + (C_H + P_{MO} - D_{MO}) \cdot g_{MO} + \\ + (C_H - D_H) \cdot g_H + C_K \cdot g_K . \quad (3.34)$$

Другим наслідком роботи «під замовлення» є використання, для прокатки визначеного профілерозміру з необхідним комплексом механічних властивостей заготовок зі строго визначених марок сталі, тобто довжини стрижнів ніяк не пов'язані з вартістю заготовки, і остання може бути виключена з критерію оптимізації виробництва сортового прокату.

Третя складова критерію (3.30) – витрати на виробництво прокату, складаються з витрат на кожній зі стадій:

$$Z = Z_{TMO} + Z_{\Pi IO} + Z_{Y IO} ,$$

де $Z_{TMO}, Z_{\Pi IO}, Z_{Y IO}$ – питомі витрати на стадіях ТМО, розрізання і охолодження, збирання й обробки прокату, відповідно.

Стрижні прокату формуються останньою операцією стадії розрізання і охолодження. Отже, витрати на стадіях термомеханічної обробки, розрізання і охолодження інваріантні довжинам стрижнів. Витрати ж на стадії збирання й обробки прокату залежать від шляху обробки пачок стрижнів, що надходять на

ад'юстаж стану. Пачка стрижнів спрямовується на обв'язку як товарна продукція, або направляється попередньо на сортування для поділу стрижнів по довжинах для відокремлення коротких стрижнів прокату і формування пачок мірного, мірного з залишком і немірного прокату. Питомі витрати на стадії збирання й обробки прокату залежать також від того, яка частина продукції спрямована на сортування:

$$Z_{\text{уио}} = Z_y + Z_c \cdot g_c + Z_{\text{офт}} ; \quad (3.35)$$

де: Z_y , Z_c , – питомі витрати на операції збирання, сортування стрижнів
 $Z_{\text{офт}}$ – питомі витрати на обв'язку пачок і формування товарної продукції обв'язки; g_c – частка (по масі) прокату, спрямованого на сортування.

Тоді критерій (3.30) для випадку виробництва арматурного прокату в стрижнях приймає вид:

$$Q = (C_n + P_m) \cdot g_m + (C_n + P_{\text{мо}} - D_{\text{мо}}) \cdot g_{\text{мо}} + (C_n - D_n) \cdot g_n + \\ + C_k \cdot g_k - Z_{\text{ТМО}} - Z_{\text{Пио}} - Z_y - Z_c \cdot g_c - Z_{\text{офт}} , \quad (3.36)$$

у якому в якості керованих перемінних виступають $g_m, g_{\text{мо}}, g_n, g_k$ і g_c .

Доцільно спростити критерій (3.36) шляхом виключення з правої частини постійної величини $(C_n - Z_{\text{ТМО}} - Z_{\text{Пио}} - Z_y - Z_{\text{офт}})$ з наступним її поділом на постійну величину P_m . Тоді, з огляду на (3.34), одержуємо:

$$Q = g_m + \frac{(P_{\text{мо}} - D_{\text{мо}})}{P_m} \cdot g_{\text{мо}} - \frac{D_n}{P_m} \cdot g_n - \frac{(C_n - C_k)}{P_m} \cdot g_k - \frac{Z_c}{P_m} \cdot g_c . \quad (3.37)$$

Критерій (3.37) є глобальним техніко-економічним критерієм виробництва прокату в стрижнях.

Необхідно відзначити, що перемінна g_m в критерії (3.37) є ні чим іншим, як коефіцієнтом виходу мірної продукції – одним з основних техніко-економічних показників, які використовують на практиці для оцінки ефективності роботи НМС при виробництві прокату в стрижнях. Однак очевидно, що більш повна оцінка ефективності виробництва прокату в стрижнях вимагає обліку всіх складових кінцевої продукції – і немірного

прокату, і мірного прокату з залишком, і коротких стрижнів, а також додаткових витрат, зв'язаних з необхідністю сортування пачок стрижнів, що містять стрижні різної довжини. У цьому змісті критерій (3.31) є згорткою усіх цих показників, причому коефіцієнти при керованих перемінних через співвідношення цін, приплат, дисконтних втрат і додаткових витрат приводять них до коефіцієнта виходу мірної продукції.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВХОДЯТЬ В УЗАГАЛЬНЕНІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ОКРЕМИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ

4.1 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління швидкісним режимом прокатки

4.1.1 Вплив натягу на розширення прокату в калібрах

Подовжня різноширинність прокату по його довжині при безперервній прокатці викликається впливом переднього і заднього натягів на розширення прокату в калібрах валків.

У теорії прокатки запропоновано ряд теоретичних і емпіричних формул для розрахунку величини розширення, в які входять параметри осередка деформації, розміри прутка, коефіцієнт тертя і різні поправочні коефіцієнти. Більшість формул отримана для відносно простого випадку прокатки прямокутних прутків на гладкій бочці.

Розглянемо формулу для розрахунку розширення Целікова-Гришкова [125], що враховує вплив натягу за допомогою поправкового коефіцієнта й адаптовану до випадку прокатки в калібрах:

$$\Delta b = 0,5 \cdot C_{\phi} \cdot C_b \cdot C_{\sigma} \cdot \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2 \cdot f} \right) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (4.1)$$

де: Δb – розширення; C_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує особливості деформації в калібрах; за даними В.И. Зюзіна ця величина складає для систем ромб-квадрат, ромб-ромб, овал-коло, овал-овал – 0,8–0,85; для системи квадрат-овал – 0,7–0,74; для системи овал-плоский овал – 1,2; C_b – коефіцієнт, що враховує ширину прокату, визначається по спеціальних графіках у функції ширини прокату і його відносного обтиснення; R – радіус валка; Δh – абсолютне обтиснення; f – коефіцієнт тертя при сталій прокатці; h_0 , h_1 –

товщини що входу і виходу прокату, відповідно; C_σ – коефіцієнт, що враховує вплив натягу; приблизно визначається по формулі:

$$C_\sigma = 1 - 2 \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_T}, \quad (4.2)$$

де: σ_3 – задній питомий натяг; σ_T – границя текучості металу в осередку деформації [112]:

де: σ_T – базова величина опору деформації для марки сталі, що прокатується, k – поправочний температурний коефіцієнт; k_ϵ – поправочний коефіцієнт по степені деформації; k_U – поправочний коефіцієнт по швидкості деформації.

Оскільки нас цікавить вплив на розширення тільки натягу, представимо формулу (4.1) у виді:

$$\Delta b = C_\sigma \cdot \Delta b_p, \quad (4.4)$$

де: Δb_p – розрахункове значення розширення без обліку натягу.

З формул (4.2) і (4.4) одержуємо вираження для збільшення розширення під дією натягу:

$$\delta b = -2 \cdot \frac{\Delta b_p}{\sigma_T} \cdot \sigma_3. \quad (4.5)$$

Як впливає з цієї формули, коефіцієнт впливу заднього натягу на розширення

$$k_{\lambda_3} = 2 \cdot \frac{\Delta b_p}{\sigma_T}$$

пропорційний величині розрахункового значення розширення Δb_p .

Оцінка чисельного значення k_{λ_3} для умов прокатки, наприклад, круглого профілю діаметром 20мм у чистовій групі безперервного стану 250 при $\Delta b_p = 3 \div 6$ мм (по калібруванню) і $\sigma_T \approx 100$ Н/мм² (сталь Ст3) дає значення $k_{\lambda_3} \approx 0,06 - 0,12$ мм/(Н/мм²).

Поправковий коефіцієнт C_σ не враховує вплив переднього натягу, тому що при висновку рівняння (4.1) для випадку прокатки на гладкій бочці розвитком розширення в зоні випередження зневажають.

У той же час, експериментальні дослідження впливу переднього і заднього натягів на розширення при безперервній сортовій прокатці показують, що впливом переднього натягу зневажати не можна. По експериментальним даним робіт [129–133] можна усереднено прийняти значення коефіцієнтів впливу на розширення:

- заднього натягу $k_{\lambda_z} \approx 0,04$ мм/(Н/мм²);
- переднього натягу $k_{\lambda_n} \approx 0,01$ мм/(Н/мм²).

Відхилення діаметру і сторони квадрата для прутків гарячекатаної сталі складають:

при звичайній точності прокатки, мм:

розмір	відхилення	розмах
10 – 19	+ 0,3.....- 0,5	0,8
20 – 25	+ 0,4.....- 0,5	0,9
26 – 48	+ 0,4.....- 0,7	1,1

при високій точності прокатки, мм:

розмір	відхилення	розмах
10 – 19	+ 0,1.....- 0,3	0,4
20 – 25	+ 0,2.....- 0,3	0,5
26 – 48	+ 0,2.....- 0,5	0,7

Виходячи з величин розмахів коливань для прокату звичайної і високої точності і величини коефіцієнта $k_{\lambda_z} \approx 0.04$ мм/(Н/мм²), варто обмежити величини міжклітьових натягів при безперервній прокатці рівнем 5÷10 Н/мм².

По теоретичних і експериментальних дослідженнях різних авторів коефіцієнт залежності натягу від неузгодженості швидкостей суміжних клітей складає $k_\sigma^\varepsilon \approx 6 \div 10$ Н/мм²/(% неузгодженості) [132].

Отже, величині натягу $5 \div 10$ Н/мм² повинна відповідати неузгодженість $0,5 \div 1,6$ %. Для виключення погрішності оцінного розрахунку k_{σ}^{ε} і неточності експериментальних даних варто зменшити припустиму неузгодженість швидкостей, принаймні, у два рази, щоб розмах різноширинності гарантовано потрапив у розмах поля допуску.

Остаточо одержимо, що для виконання основного критерію якості управління швидкісним режимом безперервної прокатки – стабільності поперечних розмірів прокату по його довжині в полі допуску – неузгодженість швидкостей суміжних клітей повинна складати $0,3 - 0,8$ % і підтримуватися з точністю $0,02 - 0,1$ % (тобто на порядок точніше).

Для виконання додаткового критерію якості управління швидкісним режимом прокатки – мінімізації розкиду поперечних розмірів прокату по його довжині – зажадаємо зменшення міжклітьових натягів, принаймні, ще в два рази, тобто до рівня $2-5$ Н/мм². Цьому рівневі натягу буде відповідати неузгодженість швидкостей клітей порядку $0,15-0,4$ %, яку необхідно підтримувати, наприклад, за допомогою системи автоматичної стабілізації натягу по прогину прокату (системи АСРП) [50,82,100].

4.1.2 Дослідження взаємозв'язку подовжніх зусиль і прогину прокату в чистовій і проміжній групах клітей

Методика розрахунку залежності прогину прокату від подовжніх зусиль розроблена раніше [136]. Дослідження підтвердили досить гарний збіг розрахункових і експериментально отриманих залежностей.

Установлено, що обмеженням застосовності способу автоматичної стабілізації режиму прокатки (способу АСРП) є вимога утворення прогину прокату зі стрілою не менш 20 мм при подовжніх зусиллях не більш 10 Н/мм². Тому в кожному конкретному випадку необхідно визначити ефективність оцінки подовжніх зусиль по прогину і вирішити питання про доцільність застосування способу АСРП у цих умовах.

У системі АСРП в якості критерію для оцінки подовжніх зусиль у прокаті використовується його вертикальний прогин між суміжними клітями. При розрахунках прокат розглядається як пружна двоопорна балка при температурі прокатки. Балка навантажена подовжнім зусиллям розтягання або стиску (натяг або підпір у прокаті), поперечним розподіленням навантаженням сил тяжіння і поперечним розподіленням навантаженням сил інерції, викликаних рухом маси прокату уздовж її скривленої вісі [9].

Розрахунок проведений для умов прокатки різних профілерозмірів у проміжній і чистовій групах клітей стану 250-5. Стріла прогину прокату h у середині міжклітьового проміжку визначається по формулі:

$$h = \frac{h_0}{1 + \frac{\sigma - \rho \cdot V^2}{\sigma_k}}, \quad (4.6)$$

де h_0 – стріла прогину прокату при нульових подовжніх зусиллях у прокаті, м; σ – величина питомих подовжніх зусиль, при $\sigma > 0$ – натяг, при $\sigma < 0$ – підпір, Н/мм²; $\sigma_{до}$ – критична питома Ейлерова сила для прокату як балки, Н/мм²; ρ – щільність прокату, $\rho = 7,85 \cdot 10^3$, кг/м³; V – лінійна швидкість переміщення прокату в міжклітьовому проміжку, м/с.

Для швидкостей прокатки менше 15 м/с впливом інерційного навантаження на прогин можна зневажити [136]. Відповідно до калібрувань стану 250 швидкість прокату в проміжній і чистовій групах практично не перевершують 15 м/с для всього сортаменту стану, тому розрахунок проведено без обліку впливу інерційного навантаження.

Вираження для h_0 і $\sigma_{до}$ залежать від виду закріплення балки – прокату в опорах (валках, провідках). В умовах пластичної деформації по всьому обсязі осередку деформації умови закріплення балки-прокату найбільш близькі до шарнірних опор:

Тоді:

$$h_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot l_6^4}{E} \cdot \frac{1}{i_x^2}, \quad (4.7)$$

$$\sigma_{\kappa} = \frac{\pi^2 \cdot E}{l_6^2} \cdot i_x^2, \quad (4.8)$$

де g – прискорення сили тяжіння; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; l_6 – базова відстань між опорами з урахуванням відстані між осями суміжних клітей і розмірів проводкової арматури - для чистової групи прийняте $l_6 = 3,5 \text{ м}$, для проміжної групи прийняте $l_6 = 2,5 \text{ м}$, а для проміжку між чорною і проміжною групами $l_6 = 6,0 \text{ м}$; E – модуль Юнга прокату, у діапазоні температур $1000-1050 \text{ }^\circ\text{C}$ $E = 1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$; i_x – радіус інерції поперечного перетину прокату в міжклітьовому проміжку, м.

При визначенні радіусів інерції прокату для всіх конфігурацій перетину в міжклітьових проміжках були використані калібрування круглої й арматурної сталі всього асортименту.

Вираження для визначення i_x має вигляд:

– круглий перетин діаметром d :

$$i_x = 0,25 d; \quad (4.9)$$

– овал висотою H :

$$i_x = 0,25 H; \quad (4.10)$$

На графіку рис.4.1 показані діапазони розрахованих по приведеним вище формулах значень i_x для всього асортименту у всіх міжклітьових проміжках проміжної і чистової груп стану. Як видно, абсолютний діапазон значень i_x по проміжній групі (кліті 8,9) складає $12 \div 15 \text{ мм}$ ($8 \div 11 \text{ мм}$ перед проміжною групою), а по чистовій групі (кліті 12÷17)– $5 \div 11,5 \text{ мм}$.

На рис. 4.2 приведені графіки, розраховані по формулах (4.6-4.8) залежності $h = f(\sigma)$, що охоплюють весь асортимент стану 250.

Для оцінки застосовності способу АСРП в умовах прокатки проміжної і чистової груп варто визначити границі, за межами яких застосування способу АСРП недоцільне.

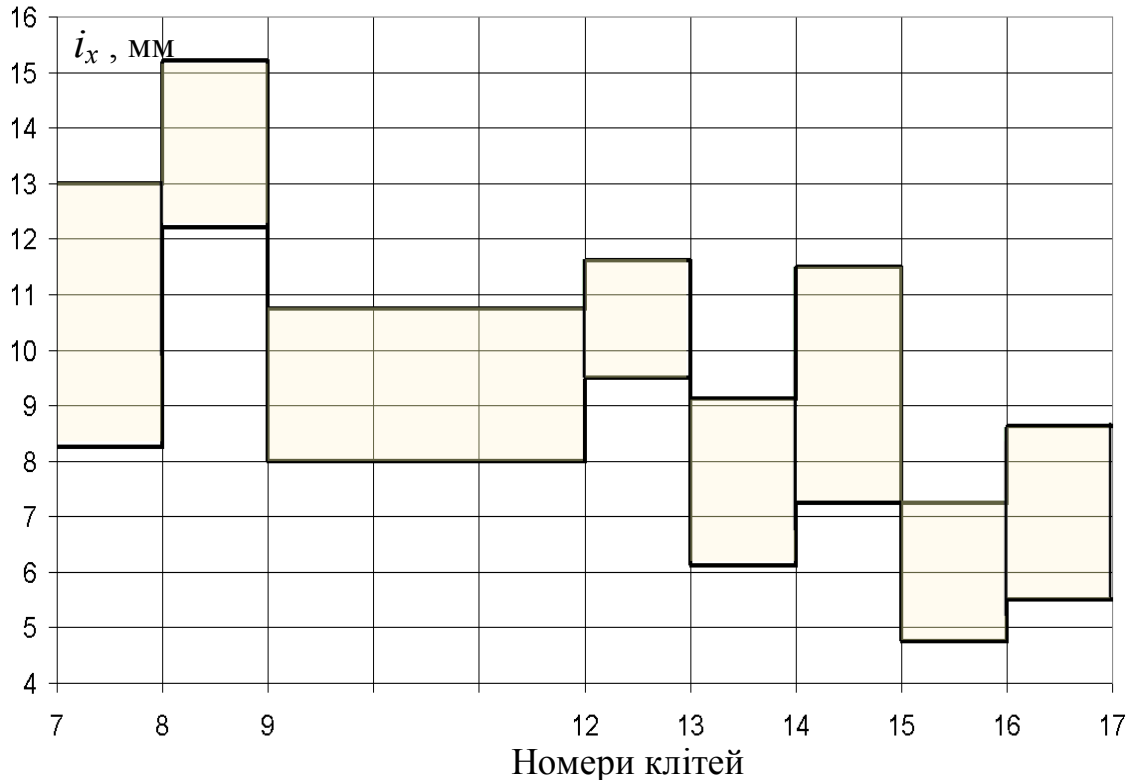


Рисунок 4.1 – Радіуси інерції перетинів прокату відносно горизонтальної осі в проміжній и чистовій групах клітей стана 250

По-перше, задамося граничними значеннями міжклітьових зусиль. Величину $\sigma_{\max} = +10 \text{ Н/мм}^2$ призначимо, виходячи з необхідної точності прокатки, а режим з підпором ($\sigma < 0$) виключимо, тому що цей режим може привести до втрати подовжньої стійкості прокату і до аварії, або обмежимо величину підпору так, щоб $\sigma - \sigma_{\text{до}} > 1 \div 2 \text{ Н/мм}^2$, тобто більше необхідної точності стабілізації натягу.

Рекомендується встановлювати таку величину прогину, щоб натяг у прокаті було в межах $0 \leq \sigma \leq 5 \text{ Н/мм}^2$.

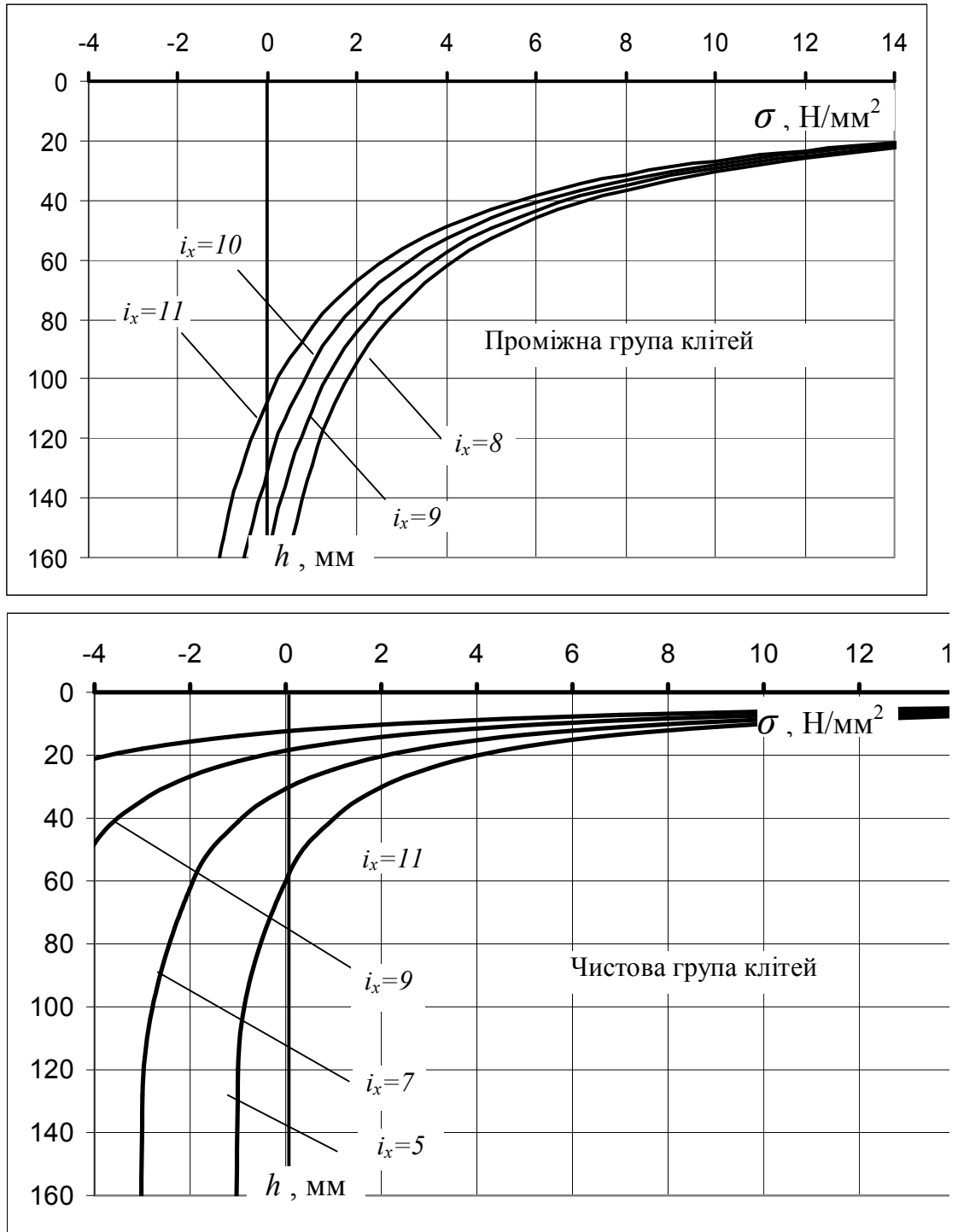


Рисунок 4.2 – Графіки залежності величини прогину прокату від питомих зусиль («+» натяг, «-» підпор) в ньому

По – друге, обмежимо максимальну стрілу прогину прокату. Ця величина визначається конфігурацією похилого передатного столу, який повинен забезпечити безаварійний напрямок початку прокату у валки наступної кліті, у

той же час, допустити вільне утворення прогину прокату. З досвіду роботи системи АСРП на дрібносортних станах приймемо $h_{\max} \approx 70 \div 100$ мм.

Третім обмежуючим фактором є гранична «чутливість» μ прогину до приросту міжклітьових сил, яку можна оцінити по точності виміру величини прогину δh_{\min} і по бажаній точності стабілізації натягу $\delta \sigma h_{\max}$:

$$\mu = \frac{\delta h_{\min}}{\delta \sigma_{\max}} . \quad (4.11)$$

Для встановлення границі, визначеної фактором μ , в області $[h, \sigma]$ візьмемо частинну похідну h по σ . З (4.6) без обліку знака маємо:

$$\frac{\partial h}{\partial \sigma} = \frac{h^2}{\sigma_k \cdot h_0} . \quad (4.12)$$

Після підстановки значень з (4.7) і (4.8) одержуємо:

$$\frac{\partial h}{\partial \sigma} \approx \frac{h^2}{10 \cdot l^2} \left[\frac{\text{мм}}{\text{Н/мм}^2} \right] \quad (4.13)$$

при $h[\text{мм}]$, $l[\text{м}]$.

Як видно, величина похідної не залежить від радіусу інерції перетину і при даній величині l визначається тільки величиною прогину. Іншими словами, заданій величині h відповідає однакова величина «чутливості» $\partial h / \partial \sigma$ для всіх кривих з різними i_x (і навпаки). З вираження (2.29) випливає:

$$h \approx l \cdot \sqrt{10 \cdot \frac{\partial h}{\partial \sigma}} . \quad (4.14)$$

Підставляючи замість $\partial h / \partial \sigma$ граничну чутливість μ , одержимо мінімальне значення прогину, що визначає границю по фактору μ в області $[h, \sigma]$:

$$h_{\min}(l) \approx l \cdot \sqrt{10 \cdot \mu} . \quad (4.15)$$

Точність визначення величини прогину фотодатчиком системи АСРП складає $\partial h_{\min} \approx 1$ мм. Необхідну точність стабілізації прогину задамо як $\delta \sigma_{\max} = 0,1 \cdot \sigma_{\max}$, тобто 1 Н/мм^2 , тоді $\mu = 1 \text{ мм}/(\text{Н/мм}^2)$. Для прийнятих значень $l = 3,5$ м, маємо $h_{\min}(3,5) = 11$ мм, для $l = 2,5$ м, маємо: $h_{\min}(2,5) = 7,9$ мм, а для $l = 6$ м, маємо: $h_{\min}(6) = 19$ мм.

Таким чином, робоча область оцінки міжклітьових зусиль по прогину прокату лежить у прямокутнику, обмеженому прямими $\sigma_{m/n}$, σ_{max} , h_{min} , h_{max} .

Для виконання другого додаткового критерію якості управління швидкісним режимом прокатки – мінімізації часу настроювання режиму – потрібний автоматичний перерахунок по калібруванню і/або діаметру валків нового швидкісного режиму і завдання його в електропривод з наступною автоматичною корекцією для забезпечення зазначеної величини мінімального натягу за час прокатки не більш третини першої нової заготовки, тобто за 10 – 15 с.

4.2 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління режимом охолодження (термозміщення) прокату

Оскільки для практичних розрахунків охолодження арматурного прокату приймається, що на виході установки термозміщення має місце регулярний режим [92,119], то залежність середньомасової температури (температури самовідпуску) на виході установки термозміщення від температури кінця прокатки (середньомасової температури на вході в установку термозміщення) описується рівнянням [109]:

$$t_{cm_vix} = t_{vd} + (t_{cm_vx} - t_{vd}) \cdot M_{cm} \cdot \exp\{-m_{pr} \cdot \tau_{охл}\}, \quad (4.16)$$

де t_{cm_vx} , t_{cm_vix} – середньомасові температури прокату на вході і виході установки термозміщення; t_{vd} – температура охолоджувальної води; $\tau_{охл}$ – тривалість охолодження перетину прокату; M_{cm} – коефіцієнти пропорційності; m_{pr} – темп охолодження прокату, у регулярному режимі розраховується по формулі:

$$m_{pr} = \mu_1^2 \cdot \frac{4 \cdot a_{pr}}{D_{pr}^2},$$

у якій $a_{\text{пр}}$ – температуропроводність прокату (в аустенітному стані низьковуглецева низьколегована сталь має $a_{\text{пр}} \cong 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [23,109], а μ_1 – коефіцієнт, що залежить, як і коефіцієнт пропорційності $M_{\text{см}}$, від критерію Bi .

З (4.16) випливає, що тривалість охолодження прокату до необхідної температури самовідпуску можна визначити по формулі:

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{1}{m_{\text{пр}}} \cdot \ln \frac{M_{\text{см}} \cdot (t_{\text{см_вх}} - t_{\text{вд}})}{(t_{\text{см_вых}} - t_{\text{вд}})}, \quad (4.17)$$

а необхідну довжину траси активного охолодження $L_{\text{охл}}$ при швидкості прокатки $V_{\text{п}}$ – з вираження:

$$L_{\text{охл}} = V_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{охл}}. \quad (4.18)$$

Збільшення швидкості прокату на 10% приводить до зниження тимчасового опору розриву на 94÷90 Н/мм². Отримане розрахункове значення гарно погоджується з результатами експериментальних досліджень, приведених у [63].

Для безаварійного скидання прутків на холодильник необхідна наявність паузи між суміжними прутками, що створюється шляхом прискорення руху прутків на 5 – 10% після їх відділення від розкату летучими ножицями, або після виходу кінця розкату з кліті. Прискорення викликається сумарним впливом на прокат тягнучого зусилля відводячого рольганга і гідродинамічного зусилля потоку води в охолоджувальних трубах.

Неоднакова швидкість переміщення початкових і кінцевих ділянок прутків і, отже, час їхнього активного охолодження в установці приводить до нерівномірності охолодження і, отже, до нерівномірності механічних властивостей по довжині прутків.

Дослідженнями на різних дрібносортних станах [38,40,119] встановлено, що при термомеханічному зміцненні арматурної сталі швидкість при русі кінцевих ділянок прутків може зростати до 16%, середньомасова температура збільшуватися на 25 – 30 °С, а прочнісні властивості знижуватися на 20 – 25%.

Для того щоб механічні властивості прутків по довжині, включаючи і кінцеві ділянки, перевищували нижню границю для заданого класу міцності, режим охолодження звичайно налаштовують з «запасом». При цьому початкові ділянки прутків набувають надлишкову міцність і навіть можуть перевершити границю наступного класу міцності. Недоліком такого режиму є небезпека неприпустимого зниження пластичних властивостей на початкових ділянках прутків і надлишкова витрата охолоджувальної води високого тиску.

На стані 250-1 Західно-Сибірського металургійного комбінату застосовували доохолодження кінцевих ділянок у додатковій секції, що підключалась автоматично до водяної магістралі після спрацьовування летучих ножиць. При цьому, в середній частині прутків утворювався «горб» прочнісних властивостей, які знижувались по мірі прискорення прутків, однак повна компенсація не досягалася [137].

Для повної компенсації підвищення температури при прискоренні прутків потрібно управляти витратою води в додатковій секції охолодження (довжина якої залежить від діаметру і швидкості прокату) за допомогою швидкодіючих гідравлічних клапанів, що реалізують видаткову характеристику відповідно до закону зміни швидкості (температури) прутків. Такі клапани промисловістю не випускаються; потрібна їхня розробка, наприклад, на основі пневмогідравлічних запірних клапанів із прохідними перетинами, що утворять ряд у двоїчному кодї або кодї Фібоначчі.

Параметри руху прутка, що прискорюється, можна визначити з рішення повного рівняння динаміки:

$$m \cdot \ddot{x} = F_r(\dot{x}, x) + F_p(x) \cdot \text{sign}(V_p - \dot{x}) - F_t(x) \quad (4.19)$$

де: x , \dot{x} , \ddot{x} – відповідно, координата, швидкість і прискорення прутка прокату; m – маса прутка довжиною l_n ; F_r – гідродинамічне зусилля впливу на пруток, що залежить від швидкості і величини поточного переміщення кінцевої ділянки прутка довжиною l_t , що знаходиться в трасі охолодження; F_p – тягнуче зусилля відводячого рольганга, яке залежить від поточного

переміщення початкової ділянки прутка l_p довжиною , що знаходиться на рольгангу:

$$F_p = \mu_1 \cdot m \cdot g \cdot \frac{l_p(x)}{l_n}, \quad (4.20)$$

V_p – швидкість рольганга (встановлюється з перевищенням над швидкістю прокатки) :

$$V_p = (1 + k_{обг}) \cdot V_n \quad (4.21)$$

$k_{обг}$ – коефіцієнт обгону, звичайно встановлюється в межах $0,05 \div 0,1$; F_T – опір переміщенню прутка в проводках траси охолодження (залежить від переміщення):

$$F_T = \mu_2 \cdot m \cdot g \cdot \frac{l_T(x)}{l_n}, \quad (4.22)$$

μ_2 – коефіцієнт тертя (опору) у проводках траси.

Рішення нелінійного диференціального рівняння руху прутка (4.19) не можна одержати в аналітичних функціях, воно може бути досліджено і вирішене чисельним методом. Для практичного управління доохолодженням кінцевих ділянок прутків при рішенні рівняння в темпі з процесом потрібен поточний контроль усіх вхідних у нього параметрів, у тому числі й аналітичне визначення гідродинамічного зусилля F_r , розрахункова модель якого досить складна. Експериментально встановлено, що гідродинамічне зусилля в залежності від діаметру прокату і швидкості потоку води може досягати $500 \div 1000$ Н [38,40].

Для наближеного оцінного рішення рівняння руху прутка (4.19) спростимо його, вважаючи F_r і F_p постійними середніми величинами, що не залежать від переміщення, і зневажаючи опором у трасі охолодження F_T . Одержимо просте рівняння рівноприскореного руху, з якого легко визначається величина прискорення прутка:

$$\ddot{x} = \frac{F_r}{m} + \mu_1 \cdot g \cdot \frac{l_p}{l_n} \quad (4.23)$$

Час τ_y і швидкість V_y прискореного переміщення кінця прокату через зону охолодження довжиною $L_{\text{охл}}$ одержимо з відомої формули шляху при рівноприскореному русі з початковою швидкістю прокатки $V_{\text{п}}$:

$$L_{\text{охл}} = V_{\text{п}} \cdot \tau_y + \frac{\ddot{x} \cdot \tau_y^2}{2}, \quad (4.24)$$

відкіля одержуємо τ_y як корінь цього квадратного рівняння:

$$\tau_y = -\frac{V_{\text{п}}}{\ddot{x}} + \sqrt{\left(\frac{V_{\text{п}}}{\ddot{x}}\right)^2 + \frac{2 \cdot L_{\text{охл}}}{\ddot{x}}} \quad (4.25)$$

і

$$V_y = V_{\text{п}} + \ddot{x} \cdot \tau_y. \quad (4.26)$$

Як приклад, розглянемо конкретний випадок термозміцнення арматурного прокату діаметром 20 мм на клас міцності А500.

Початкові розрахункові параметри: $D_{\text{пр}}=20\text{мм}$, $l_{\text{п}}=100\text{м}$, $l_{\text{р}}=90\text{м}$, $V_{\text{п}}=14\text{м/с}$, $m=250\text{кг}$, $\mu_1=0,3$, $g=9,81\text{м/с}^2$, $F_{\text{г}}=300\text{Н}$, $t_{\text{см_ввых}}=550^\circ\text{C}$, $t_{\text{см_вх}}=1050^\circ\text{C}$, $t_{\text{вд}}=60^\circ\text{C}$, $Bi \approx 60$.

З моделі охолодження (4.17, 4.18) одержуємо: $\tau_{\text{охл}}=1,12\text{с}$, $L_{\text{охл}}=15,7\text{м}$.

З виражень (4.23), (4.25) і (4.26) маємо: $\ddot{x}=3,8\text{ м/с}^2$, $\tau_y=0,99\text{ з}$, $V_y=17,7\text{м/с}$.

Середньомасову температуру кінця прутка $t_{\text{см_ввых_к}}$ одержимо, підставляючи нове значення часу його охолодження $\tau_y=0,99\text{з}$ у модель охолодження (4.17), маємо: $t_{\text{см_ввых_к}}=572^\circ\text{C}$.

Таким чином, наближена оцінка параметрів прискореного руху прутка показала скорочення часу переміщення кінця прутка і, отже, скорочення часу охолодження на $(1,12-0,99)=0,13\text{с}$, збільшення швидкості з 14м/с до $17,7\text{м/с}$, тобто на 26%, і збільшення середньомасової температури на $(572-550)=22^\circ\text{C}$. Отримані значення параметрів добре погодяться з експериментальними даними, з огляду на наближеність вихідних даних і розрахункових рівнянь.

Для виконання основного критерію якості управління режимом охолодження (термозміцнення) – забезпечення необхідних механічних

властивостей готового прокату – необхідно розрахувати по теоретичній або регресійній моделі режим охолодження (довжину секцій охолодження і витрату охолоджувальної води) в залежності від марки сталі (вуглецевого еквіваленту), діаметру прокату, необхідного класу міцності, швидкості прокатки, температури прокату й охолоджувальної води. З огляду на невисоку точність теоретичних і регресійних моделей і дії у виробничих умовах і збурювань поточних параметрів, що не спостерігаються, режим охолодження необхідно автоматично контролювати і регулювати по інтегральному показнику – кількості структурної магнітної фази (мартенситу) у поперечному перерізі прокату безпосередньо на виході з установки прискореного охолодження [60,119].

Для виконання першого додаткового критерію якості управління режимом охолодження – мінімізації розкиду механічних властивостей по довжині одного прутка, що відрізається, – необхідна компенсація прискорення прутків рольгангом, що відводить, і гідравлічним потоком на кінцевій ділянці прутка шляхом додаткового охолодження цієї ділянки.

Необхідно по сигналу датчика магнітної фази автоматично коректувати витрату охолоджувальної води в додатковій секції охолодження при переміщенні цієї ділянки за допомогою швидкодіючих гідравлічних клапанів, які забезпечать зміну витрати для всіх діапазонів діаметрів і швидкостей руху прокату орієнтовно на 10 – 20 % за час 0,5 – 2,5с.

Для виконання другого додаткового критерію якості управління режимом охолодження – мінімізації розкиду механічних властивостей у партії прокату – необхідно контролювати хімічний склад кожної нової плавки, що прокатується, і коректувати режим охолодження і показання датчика магнітної фази по регресійній моделі при відхиленні вуглецевого еквівалента стали більш, ніж на 0,02% (абсолютних).

Для виконання третього додаткового критерію якості управління режимом охолодження – мінімізації часу настроювання нового режиму – необхідно виконати швидко коректування розрахованого режиму за фактичними

показниками датчика магнітної фази за допомогою швидкодіючих гідравлічних клапанів за час порядку 0,5 – 1с.

4.3 Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв управління виробництвом прокату в стрижнях

Стрижні прокату виходять у результаті розрізання пакета прутків на стаціонарних ножицях холодного різання. Розрізання здійснюється під упор, і точність розрізання визначається точністю установки упору, люфтами упору і ножів стаціонарних ножиць [56]. Тому, технічні характеристики даного устаткування і визначають можливість прокатного стану забезпечити виконання технічного критерію (2.29). Він повинен забезпечувати:

$$\Delta_{\text{лн}} + \Delta_{\text{лу}} + \Delta_{\text{уу}} < \delta L^+ + \delta L^- , \quad (4.27)$$

де $\Delta_{\text{лн}}$ – люфт ножів стаціонарних ножиць на виході холодильника, $\Delta_{\text{лу}}$, $\Delta_{\text{уу}}$ – люфт і погрішність виставлення упора стаціонарних ножиць.

Основним технічним критерієм виробництва прокату в стрижнях є критерій (2.29). Оскільки при масовому виробництві прокату в стрижнях замовленнями задаються їхня мірна довжина, то фактична довжина прокату в i -ому замовленні – l_i , у (2.29) є мірною довжиною.

Розрізання пакета прутків на пачки стрижнів здійснюється під упор, крім першого, зачисного розрізу.

Виконання техніко-економічних критеріїв (3.39, 3.43, 3.44) визначаються особливістю формування пакета прутків і координатою зачисного розрізу.

На рис.4.3 приведена одна з можливих конфігурацій пакета прутків прокату, що надходить на розрізання стаціонарними ножицями.



Рисунок 4.3– Конфігурація и статистичні характеристики пакета прутків дрібносортового прокату, укладених способом групування передніх торців: $m[l_{пр}]$, $\sigma[l_{пр}]$ – м.о. и с.к.о. довжин прутків дрібносортового прокату; $\sigma[x_{у_пр}]$ – с.к.о. групуваного перерізу розташування прутків (передніх торців) відносно центру групування; $m[x_{т_пк}]$, $\sigma[x_{т_пк}]$ – м.о. и с.к.о. розташування торця пакету відносно центру групування прутків; $y_{нг}$, $y_{кг}$, L_r – розрахункові координати розташування початку, кінця годної частини пакету и її довжина, відповідно, відносно переднього торця пакету

Очевидно, що пачки стрижнів, що містять тільки мірний прокат, тобто відповідаючих критерію (3.44), утворюються тільки з пачок, отриманих з «придатної» частини пакету. В інших пачках будуть присутні стрижні іншої товарної модифікації.

Очевидно, що всі три критерії несуперечливі. Інтуїтивно зрозуміло, що розходження між максимумами критерію (3.39) і (3.43) може лежати лише у вартості прутків немірної і некондиційної довжини, одержуваних з кінцевих

ділянок пакета, а розходження між максимумами критеріїв (3.43) і (3.44) повинне знаходитись між співвідношенням кількості мірних прутків, одержуваних із придатної частини пакета і його кінцевих ділянок.

В цілому, можна визначити три основних напрямки, що забезпечують максимізацію критеріїв (3.39, 3.43, 3.44):

- підвищення точності управління укладанням прутків у пакет;
 - забезпечення максимальної довжини придатної частини пакета, кратній мірній довжині;
 - підвищення точності прогнозування і розкрою прокату летучими ножицями.

Перший напрямок призначений для одержання необхідного розташування прутків у пакеті. Як правило, прагнуть домогтись мінімального розкиду торців прутків для переднього, ближнього до стаціонарних ножиць, торця пакета.

Розкид торців прутків у пакеті зв'язаний з різними початковими швидкостями прокату, що укладається на холодильник, і, як наслідок, різними його гальмовими шляхами на холодильнику:

$$x_{\text{пр_ост}} = x_{\text{пр_сбр}} + \frac{V_{\text{пр_сбр}}^2}{2 \cdot a_{\text{пр_тр}}} , \quad (4.28)$$

де $x_{\text{пр_ост}}$ – координата переднього торця прутка після його гальмування на настилі холодильника і повної зупинки прутка; $x_{\text{пр_сбр}}$ – координата переднього торця прутка в момент скидання прутка на настил холодильника; $V_{\text{пр_сбр}}$ – швидкість руху прутка в момент скидання його на настил холодильника; $a_{\text{пр_тр}}$ – прискорення гальмування прокату на настилі холодильника, що визначається коефіцієнтом тертя прокату об настил холодильника – $f_{\text{пр_тр}}$.

$$a_{\text{пр_тр}} = f_{\text{пр_тр}} \cdot g , \quad (4.29)$$

Коефіцієнт тертя $f_{\text{пр_тр}}$ залежить від температури прокату, марки сталі і швидкості ковзання прокату по настилу холодильника.[1]

Коливання швидкості прокату на виході випускний кліті складає до 3% при відсутності систем автоматичного регулювання швидкісного режиму прокатки в чистовій групі клітей (систем петлерегулювання і систем автоматичного регулювання прогину прокату (АСРП)) і до 10% при наявності таких систем. Такому розкиду швидкостей відповідає розкид гальмового шляху від 6% до 20%, що в абсолютних одиницях складає від 1,2 до 4м.

Деякий стабілізуючий ефект на швидкість прокату виконує процес транспортування прутків секціями підводячого рольганга. У той же час, для арматурного прокату додаткові збурювання швидкості прутка в момент скидання вносить ефект його гідротранспортування в секціях установки прискореного охолодження.

У цілому ж, як показали дослідження, [78], навіть при управлінні гальмуванням (коректуванню початкової координати скидання прутка на холодильник в залежності від його початкової швидкості (швидкості прокатки при його формуванні) і прогнозованого коефіцієнта тертя), середньоквадратичне відхилення торців прутків від перетину їхнього групування склало 0,35–0,5 м, тобто розкид передніх торців склав 1,75–3,0м. Тому, скорочення розкиду прутків у пакеті забезпечується конструктивними рішеннями прокатних станів, що будуть розглянуті в цьому параграфі нижче.

Другий напрямок вирішується як системами розкрою, так і конструктивними прийомами.

Алгоритми систем розкрою прокату на прутки побудовані таким чином, щоб прокат розрізався на мінімальну кількість прутків максимальної довжини. При цьому прагнуть забезпечити кратність довжин даних прутків мірної довжини. Збільшення придатної частини пакета досягається збільшенням довжини холодильника.

Підвищення точності прогнозування довжини прокату необхідно для більш точного складання розкрійного плану у сполученні з більш точним розрізанням прокату – його більш точною реалізацією.

В цілому, питанням масового виробництва мірного прокату присвячені роботи [1,31,55,56 і ін.]. Як впливає з даних робіт, вихід мірного прокату залежить як від стратегій управління комплексом операцій розкрою прокату і формування пакета прутків, так і від складу і конструктивних особливостей устаткування, що здійснюють ці операції, його наявності і розташування в лінії технологічного процесу виробництва прокату.

Для підвищення виходу мірного прокату на сучасних станах використовують: старт-стопні летучі ножиці для розкрою прокату за випускною кліткою на довжини, які можуть прийняті холодильником, що забезпечує точність у реалізації розрахункового плану розкрою прокату на прутки; устаткування, що дозволяє здійснювати скидання прутка на холодильник з мінімальним розривом між прутками (система HSD – High-Speed Bar Delivery), добір прутків, не кратних мірній довжині, з добором немірного прокату перед холодильником [67]; пристрою для торцювання прутків на холодильнику; масове сортування пачок стрижнів для добору немірного прокату в технологічному потоці [67].

На вітчизняних станах склад устаткування, що забезпечує операції виробництва мірного прокату, наприклад, використовувані для розкрою прокату барабанні летучі ножиці, що постійно обертаються, не відповідає рівню аналогічного устаткування сучасних станів. А конструктивні особливості станів, такі як, наприклад, відсутність ділянок для сортування прокату в технологічній лінії його виробництва і місця для їхнього будівництва, розміщення ділянки розрізання прокату на прутки по ходу прокатки, а не проти ходу, роблять проблематичним використання повною мірою комплексу технічних рішень по підвищенню виходу мірної продукції, застосовуваних на сучасних закордонних станах.

Тому, проблему збільшення виходу мірного прокату для прокатних станів України необхідно вирішувати в двох напрямках: по-перше, модернізацією, де це можливо, устаткування з використанням апробованих на сучасних станах

технічних заходів, і, по-друге, розробкою стратегій управління комплексом операцій виробництва мірного прокату, що забезпечують максимальний вихід останнього при існуючому складі устаткування й особливостях технологічного процесу на кожному конкретному прокатному стані.

Особливістю виробництва мірної продукції є органічне переплетення в ньому специфічних рис технології, конструктивних особливостей і режимів роботи устаткування.

Навіть швидкий перегляд літератури, присвяченої особливостям конструкцій НМС і їхнього устаткування, дає представлення про різноманіття технологічних і технічних рішень, спрямованих на збільшення виходу мірного прокату [55,56,62,66–68,86].

Збільшення виходу мірної продукції на сучасних НМС за рахунок удосконалювання конструкції й устаткування не тільки не знімає цю проблему для діючих станів, введених в експлуатацію в 50-х – 70-х роках минулого століття, але й робить її більш гострою. Це зв'язано, з одного боку, з технічною неможливістю і/або економічною недоцільністю проведення масштабної реконструкції вихідної сторони станів, а, з іншого боку, необхідністю максимально наблизити техніко-економічні показники роботи цих прокатних станів до показників, досягнутим на найбільш сучасних станах, для забезпечення їхньої конкурентноздатності.

Оскільки основний обсяг виробництва сортового прокату в колишньому СРСР, а зараз – у СНД, приходиться на стани, збудовані у 50-х – 70-х роках минулого століття, то проблема підвищення виходу мірної продукції на діючих станах за рахунок технічних рішень по організації і управлінню операціями стадій охолодження і розрізання прокату, тобто без корінної реконструкції устаткування, є актуальною протягом уже декількох десятиліть.

Рішенню різних аспектів цієї проблеми присвячені роботи [1,3,32,41,45,52-59,77,80,83,88,97,116,120-123].

Найбільше повно комплекс технологічних операцій, що визначають вихід мірного прокату, був досліджений В.С. Єгоровим [31]. Їм уперше були сформульовані критерії оптимального розкрою прокату однієї заготовки на прутки, умови транспортування прутків до холодильника, запропоновані нові стратегії формування пакета прутків і правила його розкрою на стаціонарних ножицях.

Проте, у роботі зроблений висновок про проблематичність створення системи розкрою, що цілком відповідають запропонованим критеріям. Такий висновок став можливий через усунення за рамки теоретичного дослідження впливу стратегій розкрою на кінцевий вихід мірного прокату ланцюжка наступних операцій, що забезпечують формування пакета прутків і розрізання його на пачки стрижнів з наступним формуванням пачок товарної продукції. Те ж саме твердження може бути віднесене до досліджень інших операцій, що визначають вихід мірної продукції.

Такий локально поопераційний підхід до виробництва мірного прокату зберігся і дотепер, що добре видно з заходів щодо збільшення виходу мірного арматурного прокату на стані 250 Західно-Сибірського металургійного комбінату [117].

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВХОДЯТЬ В УЗАГАЛЬНЕНІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ З ПАРАМЕТРАМИ, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ

5.1 Параметри, що входять у критерії якості управління швидкісним режимом прокатки

5.1.1 Способи контролю величини міжклітьового натягу

Способи, використовувані для ідентифікації міжклітьових зусиль у чорнових групах клітей безперервних дрібносортних станів, досить чуттєві до технологічних збурень, що супроводжують процес безперервної прокатки, а підвищення точності ідентифікації за рахунок використання статистичних методів обробки вихідної інформації неминуче приводить до збільшення періоду одержання вихідної інформації для здійснення управляючого впливу.

У результаті, управління швидкісним режимом прокатки при використанні непрямих методів ідентифікації зводиться до послідовного, ітераційного наближення до такого швидкісного режиму прокатки, що максимально наближений до режиму вільної прокатки, з одного боку, і забезпечує стабільність режиму безперервної прокатки в умовах реально діючих технологічних збурень, з іншого.

Оскільки процес безперервної прокатки заготовки протікає одночасно в декількох клітях, то існує тісний взаємозв'язок міжклітьових зусиль у прокаті, що знаходиться в різних міжклітьових проміжках. Тому підходи до ідентифікації міжклітьових зусиль у прокаті повинні враховувати дану особливість процесу безперервної прокатки.

Раціональний режим міжклітьових зусиль в окремому міжклітьовому проміжку визначається трьома основними вимогами: максимальною стабільністю поперечних розмірів прокату на виході кліті, що замикає по ходу прокатки міжклітьовий проміжок; мінімальним впливом процесу звільнення міжклітьового проміжку прокатом на стабільність швидкісного режиму прокатки в наступному, по ходу прокатки, міжклітьовому проміжку; безаварійністю процесу безперервної прокатки.

Вплив міжклітьових зусиль на розширення прокату в кліті схематично можна проілюструвати графіком, приведеним на рис.5.1.

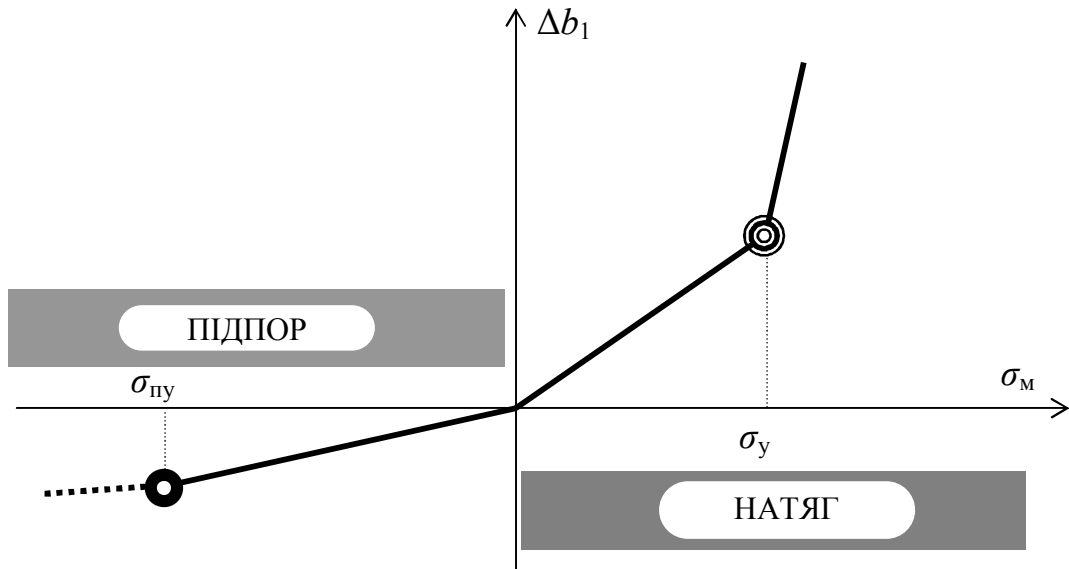


Рисунок 5.1 – Графік залежності розширення на виході з кліті Δb_1 від величини міжклітьового зусилля перед кліттю σ_m (σ_y – границя пружного натягу прокату; σ_{ny} – точка втрати стійкості прокатом при підпорі)

На графіку можна виділити чотири основні зони:

- 1). $0 \leq \sigma_m < \sigma_y$ – зона пружного натягу прокату (σ_n);
- 2). $\sigma_{ny} < \sigma_m < 0$ – зона пружного підпору прокату (σ_n);
- 3). $\sigma_m \geq \sigma_y$ – зона пружно-пластичного натягу прокату ($\sigma_{yпн}$);
- 4). $\sigma_n \leq \sigma_{ny}$ – зона втрати стійкості прокатом.

По літературним даним [11] коефіцієнти впливу натягу на розширення ($\Delta b_1 = \tilde{K}_m^b \cdot \Delta \sigma_m$) для перших трьох зон співвідносяться приблизно в такий

спосіб: $\frac{\tilde{K}_{yпн}^b}{\tilde{K}_n^b} \approx (2 \div 5)$; $\frac{\tilde{K}_n^b}{\tilde{K}_n^b} \approx (0,3 \div 0,6)$, де нижні індекси у коефіцієнтів впливу

відповідають позначенням відповідних зон.

Четверта зона характерна тим, що прокат у міжклітьовому проміжку починає змінювати своє просторове положення під дією стискальних зусиль – утрачає стійкість. Фактично, у цій зоні подовжні зусилля в прокаті близькі

до σ_{ny} . Цю особливість четвертої зони намагалися використовувати для забезпечення прокатки з малими міжклітьовими зусиллями [105], але стійкий результат не був отриманий, оскільки даний режим для чорнових груп клітей є передаварійним. Це пов'язано з появою в прокаті, крім стискаючих сил, спрямованих по осі прокатки, ще і поперечних сил, що впливають на привалкову арматуру. Такі поперечні сили тим більше, чим більше поперечний переріз прокату і величина питомого міжклітьового підпору, що відповідає σ_{ny} .

Значні зусилля з боку прокату на привалкову арматуру приводить до швидкого виходу її з ладу і полумкам, і, як наслідок, до погіршення умов захоплення переднього торця прокату валками кліті або невлученню його в калібр, що викликає виникнення аварійної ситуації.

Границя між другою і четвертою зонами визначається по критичному міжклітьовому зусиллю в прокаті, що пропорційно квадрату найменшого з розмірів прокату по перетину (висоті або ширині) і обернено пропорційно квадрату довжини міжклітьового проміжку і розраховується по формулі Ейлера [106].

Як граничне значення між зонами пружної і пружно-пластичної деформації приймають питомий міжклітьовий натяг величиною $\sigma_{унн} \approx 10 \text{ Н/мм}^2$ [33]. Це значення міжклітьових зусиль можна розглядати як м'яке обмеження області раціональних міжклітьових зусиль зверху, тоді як величину міжклітьових зусиль, при яких настає втрата прокатом стійкості – як жорстке обмеження знизу.

Оскільки ж при заповненні і звільненні міжклітьового проміжку прокатом міжклітьові зусилля відсутні, то область раціональних міжклітьових зусиль повинна включати точку $\sigma_m = 0$.

Таким чином, можна запропонувати наступну систему цільових функцій, обмежень і умов для вибору раціональної області міжклітьових зусиль в окремому міжклітьовому проміжку:

$$(\sup \{\sigma_m\} - \inf \{\sigma_m\}) \Rightarrow \min ; \quad (5.1)$$

$$\sigma_{ny} < \inf \{ \sigma_m \} \leq 0; \quad (5.2)$$

$$\sup \{ \sigma_m \} < \sigma_y; \quad (5.3)$$

$$\frac{|\inf \{ \sigma_m \}|}{|\sup \{ \sigma_m \}|} \approx \frac{\tilde{K}_H^b}{\tilde{K}_П^b} \approx 2 \quad \text{при} \quad \sigma_{ny} \ll \inf \{ \sigma_m \} < 0 \quad \text{и} \quad \sup \{ \sigma_m \} < \sigma_y. \quad (5.4)$$

Для міжклітьових проміжків групи клітей необхідно забезпечити виконання обмежень (5.2 – 5.4) для всіх міжклітьових проміжків групи, а цільові функції (5.1) записати як лексикографічну послідовність із пріоритетністю цільових функцій відповідно до номера міжклітьового проміжку. Така послідовність пріоритетів безпосередньо впливає зі ступеня впливу міжклітьових зусиль на стабільність поперечних геометричних розмірів прокату на виході з групи клітей.

5.1.2 Стислий аналіз способів апаратурного контролю міжклітьових зусиль у чорновій групі

Теоретично і практично встановлено, що точність розмірів готового сортового прокату забезпечується прокаткою з петлею або мінімальним натягом у декількох останніх проміжках чистової групи клітей. У той же час, вимоги до точності настроювання чорнової групи з мінімальними міжклітьовими зусиллями зв'язані не тільки з точністю розмірів підкату для проміжної і чистової груп. Значною мірою це викликано небезпекою забурювання при втраті прокатом стійкості при підпорі (особливо для останніх проміжків чорнової групи), а також великими абсолютними значеннями міжклітьових зусиль при натязі, що може привести до перевантаження двигунів.

У вітчизняній і світовій практиці відомі різні способи апаратурного контролю міжклітьових зусиль у чорновій групі, застосовувані при дослідженнях і для автоматичного регулювання.

5.1.2.1 Безпосередній вимір міжклітьових зусиль

Зусилля вимірюються за допомогою силувимірювальних приладів (месдоз) різних конструкцій, що встановлюються між подушками валків і станиною кліті. Варіантом цього способу є установка месдоз під опори «хитної» (на шарнірних опорах) кліті. Недоліком цього способу є необхідність зміни конструкції клітей, незручністю експлуатації месдоз в умовах чорнової групи, підвищення вимог до точності установки і юстировки месдоз, вибірки зазорів, стабільності характеристик. Цей спосіб знайшов застосування тільки для дослідницьких цілей [15,105,110].

5.1.2.2 Непрямий вимір міжклітьових зусиль

1-й варіант – вимір зміни моменту прокатки на приводному валу шестеренної кліті з перерахуванням на зусилля прокатки при захопленні/викиді прокату в суміжних клітях. Спосіб використовує зміну напруженого стану крутіння в матеріалі валу, вимірюване чуттєвими елементами різної конструкції (контактними і безконтактними). Недоліком цього способу є низька точність, він застосовується, в основному, при дослідженні абсолютних значень моменту прокатки.

2-й варіант – вимір зміни моменту і зусилля прокатки при захопленні/викиді прокату. Зусилля прокатки вимірюється або месдозами, що встановлюються під натискні гвинти, або датчиками розтягання станини кліті різних конструкцій. Запропоновано різні алгоритми розрахунку міжклітьових зусиль, що використовують величини моменту і зусилля прокатки. Цьому способу властиві всі недоліки розглянутих вище способів; хоча він описаний у різних джерелах, застосування його на практиці не відомо.

3-й варіант – вимір збільшення випередження при захопленні/викиді прокату в кліті. Вимагає застосування спеціальних безконтактних фотооптичних датчиків для точного виміру лінійної швидкості прокату в міжклітьовому проміжку. Такі датчики, засновані на кореляційному принципі

виміру, відомі. Однак, їхня точність низка, і застосування їх в умовах туману і запарошеності чорнової групи при прокатці практично виключено.

4-й варіант – вимір різниці часів проходження фіксованої відстані (бази) у міжклітьовому проміжку торцями суміжних заготовок з перерахуванням на неузгодженість швидкостей клітей. Вимагає застосування або двох фотодатчиків, установлених на базі, або використання струму навантаження приводних двигунів для фіксації моментів проходження торцями міжклітьової відстані. Цей спосіб має недостатню точність через нестабільність форми торців і обмеженість величини полю зору датчиків. Цей спосіб неодноразово пропонувався, але практичне його застосування невідоме.

5-й варіант – вимір зміни якірного струму приводного двигуна при захопленні/викиді прокату з перерахуванням на міжклітьове зусилля. Цим способом успішно користуються оператори для оцінки натягу в групі при її настроюванні, хоча вони і не визначають при цьому безпосередньо величину зусилля. Необхідні параметри для такого розрахунку можна вимірити в сучасному електроприводі і розрахувати зусилля, додатково використовуючи дані калібрування.

Цей спосіб використаний для автоматизації настроювання швидкісного режиму в чорнових групах багатьох станів. Однак, його застосування виявилось не настільки успішним, як передбачалося. Це зв'язано з нестабільністю температури прокати по довжині заготовки, незакономірною зміною перетину заготовки при її попереднім зачищенні, недостатнім часом обробки сигналів, особливо для останніх проміжків, впливом натягів у суміжних проміжках при заповненні/звільненні групи заготовкою, недостатньою точністю виміру збільшення струму при його коливаннях через пульсації тахогенератора і ін.

Одним з перспективних напрямків підвищення точності визначення міжклітьових зусиль є використання статистичної обробки сигналів якірних струмів для уточненої оцінки міжклітьових зусиль і розробки алгоритмів, що забезпечують ідентифікацію цих зусиль на всіх стадіях заповнення і звільнення чорнової групи клітей у всіх міжклітьових проміжках чорнової групи.

6-й варіант – вимір просторового «розриву» між торцями суміжних заготовок при заповненні групи клітей з наступним перерахуванням на середню неузгодженість швидкостей клітей у групі. Цим способом користуються досвідчені оператори, візуально оцінюючи збільшення величини «розриву» від кліті до кліті уздовж чорнової групи.

5.1.3 Контроль міжклітьових зусиль в однопитковій чорновій групі

5.1.3.1 Визначення величини міжклітьового натягу/підпору по зміні навантаження (струму) приводних двигунів

Зміна потужності прокатки на валках кліті $\Delta N_{вал}$ при прикладанні до них натягу/підпору σ :

$$\Delta N_{вал} = V_{пр_вх} \cdot F_{вх} \cdot \sigma_{вх} - V_{пр_вых} \cdot F_{вых} \cdot \sigma_{вых}; \quad (5.5)$$

де $V_{пр_вх}$, $V_{пр_вых}$ – швидкість прокатки на вході і виході кліті; $F_{вх}$, $F_{вых}$ – перетин прокату на вході і виході кліті.

Відповідна зміна електричної потужності приводного двигуна:

$$\Delta N_{дв} = U_{я} \Delta I_{я}, \quad (5.6)$$

де: $U_{я}$ – напруга на якорі двигуна; постійна при налагодженому швидкісному режимі; $\Delta I_{я}$ – зміна струму якоря при накладанні натягу/підпору наступною кліттю або зняттю натягу/підпору попередньою кліттю.

Виходячи з рівності зазначених збільшень, з обліком к.к.д. передачі потужності ($\eta \approx 0,95$):

$$\eta \cdot U_{я} \Delta I_{я} = V_{пр_вх} \cdot F_{вх} \cdot \sigma_{вх} - V_{пр_вых} \cdot F_{вых} \cdot \sigma_{вых}. \quad (5.7)$$

Звідси, одержуємо для будь-якої кліті:

$$\Delta \sigma = \frac{\eta \cdot U_{я}}{V_{пр} \cdot F_{вых}} \Delta I_{я}, \quad (5.8)$$

де $\Delta \sigma = \sigma_{вх} - \sigma_{вых}$; ($V_{пр_вх} \cdot F_{вх} = V_{пр_вых} \cdot F_{вых}$) – закон сталості секундних розходів), $V_{пр}$ швидкість прокатки:

$$V_{np} = \frac{\omega_{\partial\phi} \cdot D_k}{2 \cdot i_{ред}}, \quad (5.9)$$

діаметр, що катає:

$$D_k = D_\phi + z - \frac{F_{\phi\text{вх}}}{B_{\phi\text{вх}}}. \quad (5.10)$$

У приводі кліті вимірюються величини: U_γ , ΔI_γ і частота обертання двигуна $\omega_{\partial\phi}$. По вихідним даним розраховується величина D_k :

D_ϕ – діаметр по дну калібру встановлених у кліть валків; z – зазор між бочками валків (по калібруванню); $F_{\phi\text{вх}}$ – площа перетину прокату на виході з кліті (по калібруванню); $B_{\phi\text{вх}}$ – ширина прокату на виході з кліті (по калібруванню);

Приймається значення $i_{ред}$ – передатне відношення редуктора кліті – по технічним даним приводу.

З (5.8) випливає, що вплив міжклітьових зусиль на статичний струм навантаження приводу для будь-якої кліті групи обернено пропорційний напрузі якоря, а при однакових напругах на якорях двигунів – однаковий для всіх клітей, тому що $V_{np} \cdot F_{np} = const$.

Варто також мати на увазі, що фактичний натяг σ^ϕ у міжклітьовому проміжку в сталому режимі буде відрізнятися від розрахованого по формулі (5.8) σ^p безпосередньо після захоплення прокату наступною кліттю або звільнення попередньою.

При заповненні стану за проміжком i , $i+1$ фактичний натяг у ньому $\sigma_{i,i+1}^\phi$ буде збільшуватися, у міру виникнення натягів у проміжках $(i+1, i+2)$, $(i+2, i+3)$... і т.д. За даними роботи [132] можна приблизно прийняти:

$$\begin{aligned} \sigma_{i,i+1}^\phi \cong & \sigma_{i,i+1}^p + 0,5\sigma_{i+1,i+2}^p + 0,25\sigma_{i+2,i+3}^p + \\ & + 0,125\sigma_{i+3,i+4}^p + 0,0625\sigma_{i+4,i+5}^p + \dots \end{aligned} \quad (5.11)$$

При звільненні стану перед проміжком i , $i+1$ натяг у ньому почне слабшати в зворотному порядку в міру зникнення натягів у проміжках (1,2)

(2,3) (3,4)...($i-1, i$)... Очевидно, що для практичних розрахунків σ^ϕ досить обмежитися обліком розрахункових натягів σ^p у 3-х суміжних проміжках.

Таким чином, питомі міжклітьові зусилля, визначені відомими методом статичного моменту навантаження (статичного струму), забезпечують «грубу» оцінку якості настроювання швидкісного режиму прокатки, оскільки не враховують наступний вплив зміни міжклітьових зусиль у суміжних міжклітьових проміжках у міру заповнення і звільнення чорнової групи клітей розкатом.

5.1.3.2 Оцінка необхідної точності виміру струму приводних двигунів при прокатці з підпором

Розглядаємо прокат у міжклітьовому проміжку як шарнірно обпертий стрижень при температурі прокатки. Критичне напруження стиску σ_{kp} за умовою втрати стійкості визначається по формулі Ейлера [106]:

$$\sigma_{kp} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (5.12)$$

де: E – модуль пружності сталі; при температурі прокатки $1100 \div 1200^\circ\text{C}$ для конструкційних сталей $E \cong 0,8 \cdot 10^5 \frac{\text{H}}{\text{мм}^2}$; λ – гнучкість стрижня;

$$\lambda = \frac{L}{i}, \quad (5.13)$$

L – відстань між опорами стрижня – осями суміжних клітей; i – радіус інерції перетину; для прямокутного перетину прокату (по калібруванню чорнової групи):

$$i = 0,289 \cdot h, \quad (5.14)$$

h – вертикальний розмір прямокутного прокату.

Для стрижнів малої гнучкості руйнування може наступити при нарузі стиску меншій критичної. Тому граничне значення гнучкості $\lambda_{пред}$ варто визначати з урахуванням межі міцності сталі σ_n :

$$\lambda \geq \lambda_{пред} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_n}}, \quad (5.15)$$

Для конструкційних сталей при температурі 1100-1200⁰С

$$\sigma_n = \sigma_\epsilon \approx 35 \frac{H}{мм^2}.$$

Оскільки на стиснутий стрижень – прокат діють різні збурення – тертя в провідках, коливання температури прокату, поперечна сила ваги і ін., допустиме напруження стиску $\sigma_{дон}$ повинне бути зменшене стосовно критичного:

$$\sigma_{дон} = \varphi \cdot \sigma_{кр}, \quad (5.16)$$

де φ – коефіцієнт зменшення, визначається в залежності від гнучкості λ по таблицях [106].

Розрахунок припустимого зусилля стиску $\sigma_{дон}$ у всіх міжклітьових проміжках чорнової групи стану 250/150 виконаний по формулах (5.12) – (5.16) для підкату дротового блоку ϕ 13,8 мм із квадратної заготовки 125x125 мм. Проміжні і кінцеві результати розрахунку приведені в Таблиці 5.1.

У табл. 5.1 також приведені значення повних міжклітьових стискальних зусиль, $T_{дон}$, що відповідають значенням $\sigma_{дон}$:

$$T_{дон} = F \cdot \sigma_{дон},$$

F – площа поперечного перетину прокату.

Очевидно, що допустиме напруження $\sigma_{дон}$ за умовою втрати стійкості не повинне перевищувати граничного зусилля $10 \frac{H}{мм^2}$, встановленого за умовою припустимого збільшення розширення в калібрах, тобто:

$$\sigma_{дон} \leq 10 \frac{H}{мм^2}.$$

Таблиця 5.1 – До розрахунку припустимого зусилля стиску прокату в чорновій групі стану 250/150 за умовою втрати стійкості*

Проміжок між клітьми N-N	V_{np}	L	h	i	λ	$\lambda_{пред}$	$\sigma_{кр}$	φ	$\sigma_{дон}$	F	$T_{дон}$
	м/с	м	мм	мм	–	–	Н/мм ²	–	Н/мм ²	мм2	кН
1-2	0,17	3,75	118	34,1	110	150	35	0,625	22	14 140	309,3
2-3	0,19	3,5	116	33,5	104	150	35	0,625	22	12 800	280,0
3-4	0,25	3,25	86	24,8	131	150	35	0,625	22	9 635	210,8
4-5	0,32	3,25	86	24,8	131	150	35	0,625	22	7 525	164,6
5-6	0,42	3,25	63	18,2	178	150	25	0,24	5,9	5 790	34,2
6-7	0,55	3,25	65	18,8	173	150	26	0,25	6,6	4 365	28,8
7-8	0,75	3,25	45,5	13,1	248	150	13	0,15	1,9	3 225	6,2

* – температура прокатки 1100-1200⁰С; конструкційна сталь $\sigma_s \cong 35 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; по калібруванню підкату $\phi 13,8$ мм із квадратної заготовки 125x125 мм.

Таким чином, у трьох останніх міжклітьових проміжках втрата стійкості може наступити раніш, ніж буде досягнуте граничне значення по розширенню. У перших чотирьох проміжках обмежуючим фактором стискальних зусиль є не втрата стійкості, а граничне значення по розширенню.

У зв'язку з тим, що міжклітьові зусилля визначаються по зміні якірного струму приводних двигунів при захопленні і викиді заготовки, визначимо залежність величини струму від величини зусилля. Виходячи з формули (5.8) можна записати:

$$\Delta I_{\text{я}} = \frac{V_{\text{np}} \cdot F}{\eta \cdot U_{\text{я}}} \cdot \sigma, \quad (5.17)$$

При безперервній прокатці для всіх клітей $V_{\text{np}} \cdot F = \text{const}$, і для умов розрахунку $V_{\text{np}} \cdot F \cong 2410 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{мм}^2$. Напруги на якорях практично всіх двигунів чорнової групи в середньому складають $U_{\text{я}} \approx 300\text{В}$.

Приймаючи $\eta \approx 0,95$, одержимо по (5.17) для орієнтованого розрахунку:

$$\Delta I \cong 8,5\sigma; \quad \Delta I [\text{А}], \sigma \left[\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right].$$

На рис. 5.2а,б показані сполучені графіки для аналізу можливості прокатки з підпором у чорновій групі клітей.

Лівий графік, побудований за даними табл.5.1, показує залежність припустимої напруги стиску за умовою втрати стійкості в міжклітьових проміжках. Пряма правого графіка відбиває залежність збільшення якірного струму $\Delta I_{\text{я}}$ від напруги стиску. Тут же пунктиром нанесене обмеження $\sigma \leq 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ за умовою збільшення розширення в калібрах.

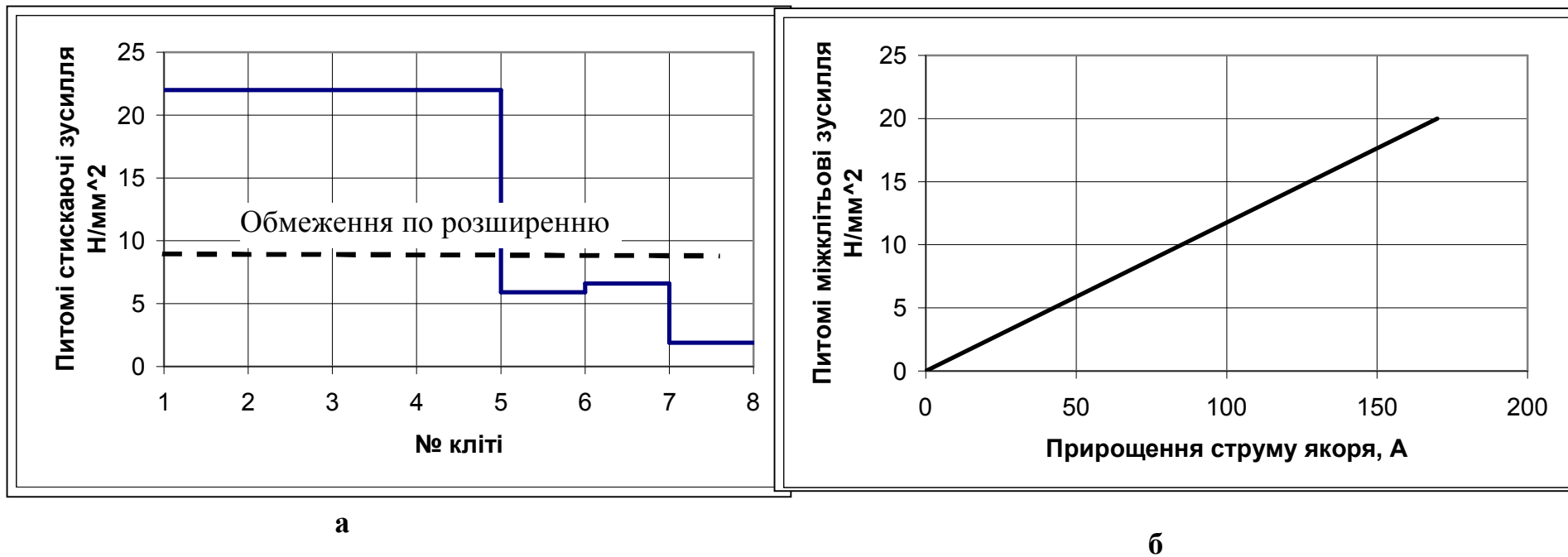


Рисунок 5.2 – До аналізу прокатки з підпором у чорновій групі клітей:

а – стискаючі зусилля, гранично допустимі за умовою втрати стійкості;

б – залежність збільшення струму якоря двигуна кліті від питомих міжклітьових зусиль в прокаті

Додатковою обмежуючою умовою є можлива точність виміру збільшення якірного струму. При настроюванні швидкісного режиму в чорнової групи оператором точність оцінки збільшення струмів приводів клітей визначається точністю візуальної оцінки по шкалах амперметрів і складає приблизно $25 \div 50A$. Це теоретично забезпечує точність настроювання міжклітьових зусиль не краще $5 \div 10 \text{ Н/мм}^2$, що близько до припустимого обмеження по розширенню.

З графіків рис.5.2 також випливає, що для забезпечення якісного настроювання необхідно контролювати якірний струм з погрішністю в межах $10A \div 20A$, що дозволить оцінювати міжклітьові зусилля в межах до 5 Н/мм^2 , а це можливо досягти тільки з використанням статистичної обробки сигналу якірного струму навантаження.

Таким чином, аналіз графіків показує:

– у перших чотирьох міжклітьових проміжках можлива прокатка з підпором $6 < \sigma \leq 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$;

нижня границя визначається точністю виміру збільшення струму, а верхня – обмеженням по розширенню:

– прокатка в проміжках 5-6 і 6-7 з підпором можлива тільки на границі втрати стійкості і, одночасно, на границі точності виміру збільшення струму;

– прокатка з підпором в останньому проміжку 7-8 неможлива через недостатню точність виміру струму при дуже малій величині допустимого зусилля втрати стійкості;

– підвищення точності настроювання швидкісного режиму прокатки вимагає підвищення точності одержання вихідної інформації для ідентифікації міжклітьових зусиль.

5.1.3.3 Оцінка середньої розбіжності швидкостей клітей в чорновій групі по „розриву” між заготовками

При настроюванні швидкісного режиму в чорновій групі досвідчені оператори візуально оцінюють загальну середню величину неузгодженості між клітями по «розриву» між заготовками, тобто по зміні відстані між торцями суміжних заготовок у міру прокатки уздовж групи. Цей «розрив» наростає від кліті до кліті тим більше, чим вище середній рівень міжклітьових натягів.

Становить інтерес оцінити можливість виміру величини «розриву» апаратним методом для автоматизації контролю настроювання швидкісного режиму.

Величину «розриву» у часі між будь-якими суміжними клітями i і $i+1$ $\Delta t_{i,i+1}$ можна визначити як:

$$\Delta t_{i,i+1} = \tau + \frac{l_{i,i+1}}{V_{i \text{ вих}}} - \frac{l_{i,i+1}}{V_{i+1, \text{ вх}}}, \quad (5.18)$$

де τ – пауза між подачею суміжних заготовок у першу кліть; $l_{i,i+1}$ – міжклітьова відстань; $V_{i \text{ вих}}$, $V_{i+1 \text{ вх}}$ – швидкості виходу і входу прокату в клітях.

Вираз (5.18) можна представити як:

$$\Delta t_{i,i+1} = \tau + \frac{l_{i,i+1}}{V_{i \text{ вих}}} \left(\frac{V_{i+1 \text{ вх}} - V_{i \text{ вих}}}{V_{i+1 \text{ вх}}} \right). \quad (5.19)$$

Тут вираз в дужках не що інше, як відносна неузгодженість швидкостей клітей $i+1$ та i . Позначивши її через $\varepsilon_{i+1,i}$, запишемо:

$$\Delta t_{i,i+1} = \tau + \frac{l_{i,i+1}}{V_{i \text{ вих}}} \varepsilon_{i+1,i}. \quad (5.20)$$

Величина просторового «розриву» між клітями i та $i+1$ у момент виходу кінця попередньої заготовки з $(i+1)$ -й кліті:

$$\Delta L_{i,i+1} = V_{i \text{ вих}} \cdot \Delta t_{i,i+1} \quad (5.21)$$

«Розрив» між будь-якими клітьми k та $k + 1$ визначиться підсумовуванням «розривів» по всіх попередніх проміжках з обліком того, що величина паузи τ залишається постійною:

$$\Delta L_{k,k+1} = V_{k \text{ Вых}} \cdot \left[\tau + \sum_{i=1}^k \frac{l_{i,i+1} \cdot \varepsilon_{i+1,i}}{V_{i \text{ Вых}}} \right]. \quad (5.22)$$

Якщо прийняти неузгодженість швидкостей клітей однаковою ε_{cp} , то

$$\Delta L_{k,k+1} = V_{k \text{ Вых}} \cdot \left[\tau + \varepsilon_{cp} \sum_{i=1}^k \frac{l_{i,i+1}}{V_{i \text{ Вых}}} \right]. \quad (5.23)$$

Величина під знаком суми постійна для даного розташування клітей і калібрування прокатки заготовки. Таким чином, щоб оцінити ε_{cp} необхідно виміряти $\Delta L_{k,k+1}$, $V_{k \text{ Вых}}$, τ і попередньо розрахувати суму у формулі (5.23):

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta L_{k,k+1} - V_{k \text{ Вых}} \cdot \tau}{V_{k \text{ Вых}} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{l_{i,i+1}}{V_{i \text{ Вых}}}}. \quad (5.24)$$

У табл. 5.2 представлені результати розрахунку величини «розриву» при прокатці підкату $\phi 13,5 \text{ мм}$ з заготовки $125 \times 125 \text{ мм}$, при завантаженні заготовок без паузи ($\tau = 0$) і середній міжклітьовій неузгодженості швидкостей $\varepsilon_{cp} = 0,01(1\%)$.

Таблиця 5.2 – Зміна «розриву» по проміжках чорнової групи*

Параметр		Проміжок між клітьми № - №						
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
$V_{i,i+1}$	м/с	0,17	0,19	0,25	0,32	0,42	0,55	0,75
$l_{i,i+1}$	м	3,75	3,5	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
$\Delta t_{i,i+1}$	с	0,22	0,18	0,13	0,10	0,08	0,06	0,04
$\sum \Delta t_{i,i+1}$	с	0,22	0,40	0,53	0,63	0,71	0,77	0,81
$\Delta L_{k,k+i}$	мм	37,4	76,0	132,5	201,6	298,2	423,5	607,5

* $\tau = 0$; $\varepsilon_{cp} = 0,01(1\%)$.

На рис.5.3 більш наочно показано зростання «розриву» по міжклітьових проміжках при цих умовах.

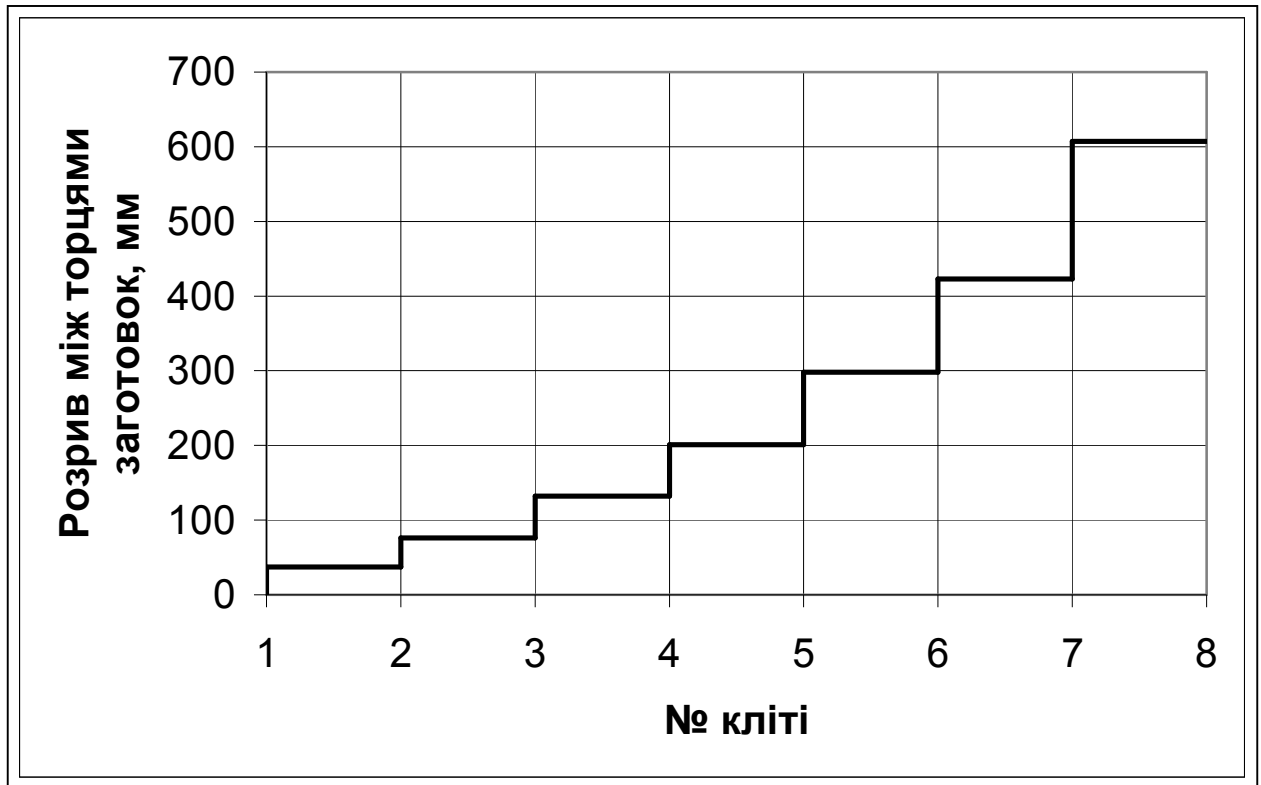


Рисунок 5.3 – Зростання „розриву” між торцями заготовок при прокатці в чорновій групі клітей, $\tau = 0$, $\varepsilon_{\text{ср}} = 0,01(1\%)$

Оскільки величина паузи τ і моменти входу/виходу прокату в клітях визначаються по зростанню навантаження (струму) приводного двигуна кліті, необхідно оцінити точність визначення цих величин. Момент прокатки зростає/спадає в міру заповнення/звільнення осередку деформації в i -й кліті, час зростання/спаду $\Delta t_{\text{ос } i}$:

$$\Delta t_{\text{ос } i} = \frac{1}{V_{i \text{ Вых}}} \cdot \sqrt{\frac{D_{ki}}{2} \cdot \Delta H_i}$$

де D_{ki} – діаметр, що катає; ΔH_i – обтиснення.

У табл.5.3 представлені результати розрахунку по цій формулі часу зростання/спаду моменту прокатки в клітях $\Delta t_{\text{ос}}$ для тих же умов прокатки підкату $\phi 13,5$ з заготовки 125x125 мм.

Таблиця 5.3 – Час зростання/спаду моменту прокатки в клітях чорнової групи

Параметр		Кліть №							
		1	2	3	4	5	6	7	8
D_k	мм	482	440	405	385	343	331	348	340
ΔH	мм	8,6	12,0	32,0	36,5	33,0	32,0	29,5	17,0
$\sqrt{\frac{D_k}{2} \Delta H}$	мм	45,5	51,4	80,5	83,8	75,2	72,8	71,6	53,7
Δt_{oc}	с	0,26	0,27	0,32	0,26	0,18	0,131	0,095	0,053

Безпосереднє визначення ε_{cp} по формулі (5.24) не може забезпечити необхідну точність, тому що час зростання/спаду моменту в 1-й кліті ($t_{oc} = 0,26c$) для виміру τ зіставлений із сумарним «розривом» у часі $\sum_1^8 \Delta t_{7,8}$ в останньому проміжку $\left(\sum_1^8 \Delta t_{7,8} = 0,81c \right)$. Крім того, швидкість прокатки безпосередньо не вимірюється, а розраховується по частоті обертання двигуна кліті і діаметру валків D_k , що катає.

Точність визначення ε_{cp} буде невисокою і залежати, в основному, від точності виміру величин, пропорційних ΔL , і τ , тобто не краще 3÷5% (відносних).

Успіх такого способу визначення ε_{cp} пов'язаний з точністю фіксації моментів проходження торців прокату визначених перетинів стану. Спроби використання даного способу для оцінки якості настроювання швидкісного режиму прокатки в окремих міжклітьових проміжках дали негативний результат саме з цієї причини. У той же час, наведені вище розрахунки вказують на можливість використання даного способу для інтегральної оцінки якості настроювання швидкісного режиму прокатки в чорновій групі – по збільшенню

цього розриву від початку до кінця групи. В алгоритмах автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки даний спосіб може бути використаний для додаткової перевірки якості настроювання, виконаної на основі ідентифікації міжклітьових зусиль по статичних моментах навантаження електроприводів клітей. Ефективність такої перевірки вимагає експериментальних досліджень.

5.2 Параметри, що входять у критерії якості управління режимом прискореного охолодження (термозміцнення) арматурного прокату

5.2.1 Математична модель механічних властивостей термозміцненого арматурного прокату

5.2.1.1 Структура моделі механічних властивостей термозміцненого арматурного прокату

Основними параметрами, що характеризують механічні властивості низьковуглецевої низьколегованої арматурної сталі, що нормуються стандартами [7,19,20,29], є границя текучості σ_T (умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$), тимчасовий опір розриву (межа міцності) σ_y , відносне подовження після розриву δ_5 і рівномірне подовження δ_p .

Результати досліджень, приведені в [24,С.360; 113,С.222-224, С.296-303], показали тісний взаємозв'язок цих параметрів, як між собою, так і зі структурою прокату, отриманого в результаті процесу термозміцнення.

Характерною рисою структуроутворення в термозміцненому арматурному прокаті є те, що в процесі термічного зміцнення прокату з прокатного нагрівання в ньому утворюється поверхневий шар відпущеного мартенситу і серцевинний шар феріто-перлітної структури з тонким прошарком проміжних структур між шарами [113, рис.67], [16, рис.63], [75, рис.5.2], [103,138] (див.рис.5.4).

Оскільки для одержання заданих властивостей в умовах масового виробництва арматурного прокату потрібне досягнення мінімального коливання кінцевих властивостей готової продукції [16,119], то вибір хімічного складу сталі визначають таким чином, щоб забезпечити підвищену стійкість аустеніту

[16,118,119], тобто щоб фазові перетворення в серцевинному шарі відбувалися при відносно стабільній температурі, що відповідає температурі самовідпуску прокату на холодильнику.

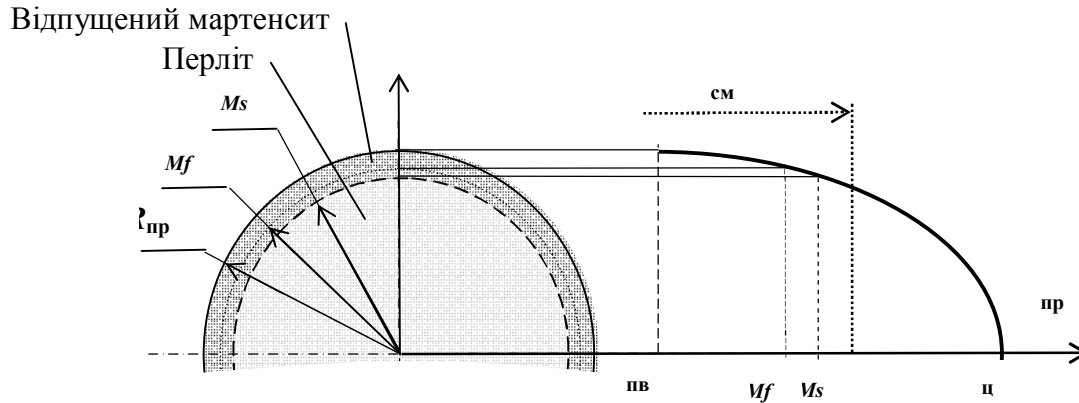


Рисунок 5.4 – Структура перетину прокату и графік температури прокату по його перетину на виході установки термозміцнення:

$t_{пв}$ – температура поверхні прокату; t_{Mf} – температура завершення мартенситного перетворення; t_{Ms} – температура початку мартенситного перетворення; $t_{ц}$ – температура центру прокату; $t_{см}$ – середньомасова температура прокату;
 $R_{пр}$ – радіус прокату; r_{Mf} – радіус шару прокату, в якому температура дорівнює температурі завершення мартенситного перетворення; r_{Ms} – радіус шару прокату, в якому температура дорівнює температурі початку мартенситного перетворення

Ґрунтуючись на даних роботи [119], можна прийняти температуру фазових перетворень серцевинного шару $t_{фп}$ і середньомасову температуру прокату на виході установки прискореного охолодження $t_{см}$ рівними температурі самовідпуску прокату на холодильнику $t_{фп} \approx t_{см} \approx t_{со}$.

Діаграма розтягання прокату може бути представлена як суперпозиція діаграм розтягання шарів з урахуванням об'ємної частки кожного із шарів у прокаті:

$$\sigma(\varepsilon) = s_m \cdot \sigma_{(m)}(\varepsilon) + (1 - s_m) \cdot \sigma_{(n)}(\varepsilon), \quad (5.25)$$

де ε – відносне подовження випробуваного зразка; σ , $\sigma_{(m)}$, $\sigma_{(n)}$ – усереднений (віднесений до всього перетину) питомий натяг у прокаті,

поверхневому шарі відпущеного мартенситу, серцевинному феріто-перлітному шарі, відповідно; s_m – відносна кількість мартенситу в перетині прокату.

Відносна кількість мартенситу в перетині прокату при одноцикловому охолодженні може бути оцінена для арматурного прокату класів А400, А500 за даними роботи [138] ($s_m \approx 0,15$), а для класу А800 – за даними роботи [14] ($s_m \approx 0,32$), що підтверджує необхідності враховувати внесок обох шарів у механічні властивості прокату.

Особливості діаграми розтягання арматурних сталей розглядаються в [16,64,73]. Такі сталі в стані постачання не мають площадки пластичності, а спостерігається монотонне збільшення зусилля розтягання (питомого натягу), аж до досягнення умовного питомого натягу величини тимчасового опору розриву, після чого спостерігається різке його зниження і розрив зразка. Залежність питомого натягу від величини відносного подовження на ділянці пружно-пластичної деформації добре апроксимується рівнянням третього ступеня, причому найбільш нелінійною ділянкою є відносно короткий відрізок переходу від пружної до пружно-пластичної деформації.

З огляду на ці особливості, а також те, що міцнісні властивості шарів визначаються однією і тією же температурою – температурою самовідпуску, можна прийняти за оцінку міцнісних властивостей сталі середньозважені параметри шарів (див. також [65,84,85]):

$$\sigma_T \approx s_m \cdot \sigma_{T(M)} + (1 - s_m) \cdot \sigma_{T(P)}, \quad (5.26)$$

$$\sigma_B \approx s_m \cdot \sigma_{B(M)} + (1 - s_m) \cdot \sigma_{B(P)}, \quad (5.27)$$

де $\sigma_T, \sigma_{T(M)}, \sigma_{T(P)}$ – умовні границі текучості прокату і сталей поверхневого шару відпущеного мартенситу, серцевинного феріто-перлітного шару, відповідно; $\sigma_B, \sigma_{B(M)}, \sigma_{B(P)}$ – тимчасові опори розриву прокату і сталей поверхневого шару відпущеного мартенситу, серцевинного феріто-перлітного шару, відповідно.

Пластичні ж властивості повинні визначатися властивостями окремих шарів. Дійсно, відносне рівномірне подовження прокату припиняється, як тільки

припиняється рівномірне подовження хоча б одного із шарів, а відносне подовження прокату після розриву буде визначатися відносним подовженням шару, розрив якого відбувся останнім:

$$\delta_p = \min \{ \delta_{p(m)}, \delta_{p(n)} \}, \quad (5.28)$$

$$\delta_5 = \max \{ \delta_{5(m)}, \delta_{5(n)} \}, \quad (5.29)$$

де δ_p , $\delta_{p(m)}$, $\delta_{p(n)}$ – відносне рівномірне подовження прокату, шару відпущеного мартенситу і серцевинного шару, відповідно; δ_5 , $\delta_{5(m)}$, $\delta_{5(n)}$ – відносне подовження після розриву прокату, шару відпущеного мартенситу і серцевинного шару, відповідно.

Таким чином, вихідними даними для розрахунку механічних властивостей прокату є механічні властивості кожного шару і відносна кількість відпущеного мартенситу в перетині прокату. Для практичних цілей доцільно обмежитися розрахунковою моделлю прогнозування тимчасового опору розриву. Вибір цього параметра в якості базового пов'язаний з тим, що, як показує практика, при міцнісних параметрах прокату, близьких до нижньої границі, нормованої стандартом, завжди забезпечуються необхідні пластичні властивості, а нормування останніх фактично може розглядатися як обмеження міцнісних властивостей зверху. Так, з експериментальних залежностей, приведених у [113, мал.89,93], видно, що тимчасовому опору розриву 600 Н/мм^2 (нижня границя для класу міцності А500) відповідає відносне подовження порядку 24% при нормованій величині 14%, а остання досягається при тимчасовому опору розриву порядку 1000 Н/мм^2 , що відповідає нижній границі тимчасового опору розриву для класу А800. Тому в якості базового доцільно приймати параметр, що характеризує міцність арматурного прокату, зокрема, тимчасове опір розриву σ_y , тому що воно нормується всіма стандартами на арматурний прокат, тоді як в одних стандартах нормується границя текучості, а в інші – умовна границя пружності.

5.2.1.2 Розрахункова модель тимчасового опору розриву арматурного прокату

Численні експериментальні дослідження впливу різних факторів на механічні властивості прокату з конструкційних сталей, зокрема арматурного прокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі, показали, що основними факторами є хімічний склад і температура самовідпуску сталі [16,24,25,104,113,118,119].

Вуглець впливає на властивості сталі більш сильно, ніж будь-який інший елемент [104]. Тому доцільно при аналізі впливу хімічного складу на ті або інші властивості сталі приводити вплив легуючих елементів до впливу вуглецю через відповідний вуглецевий еквівалент, як це прийнято в [29,34,61,114]. У першому ж наближенні досить обмежитися лише обліком впливу вуглецю [119].

Експериментальні точки залежності тимчасового опору розриву від температури фазових перетворень (температури самовідпуску прокату на холодильнику) у координатах тимчасовий опір розриву – масова частка вуглецю в сталі добре укладаються в лінійну залежність (див., наприклад, [24, мал.298], [16, С.143]) виду:

$$\sigma_{в(п)} = r_{0_C}^{\sigma_B}(t_{см}) + r_{1_C}^{\sigma_B}(t_{см}) \cdot m_c, \quad (5.30)$$

де m_c – масова частка вуглецю в сталі; $t_{см}$ – температура самовідпуску; $r_{0_C}^{\sigma_B}(t_{см})$, $r_{1_C}^{\sigma_B}(t_{см})$ – коефіцієнти регресії (залежать від температури самовідпуску).

Точно також у лінійну залежність виду:

$$\sigma_{в(п)} = r_{0_t_{см}}^{\sigma_B}(m_c) - r_{1_t_{см}}^{\sigma_B}(m_c) \cdot t_{см} \quad (5.31)$$

добре укладаються експериментальні точки, отримані при дослідженні взаємозв'язку механічних властивостей сталі визначеного хімічного складу з температурою самовідпуску (див.рис.28,88 у [113]; рис.225,289 у [25]; рис.28 у [118]; рис.22,27,29,40,45 у [16]), що справедлива до температури самовідпуску $\sim 250 \div 300$ °С. При більш низьких температурах відпуску тимчасовий опір розриву залишається незмінним.

Оскільки для досліджених марок сталей температура самовідпуску $\sim 250\div 300^{\circ}\text{C}$, що досягається в процесі охолодження, відповідає температурному інтервалу завершення мартенситних перетворень (див. рис.200 у [25]), то правомірно затверджувати, що граничними точками області визначення залежностей (3.6,3.7) є температура початку перлітних перетворень t_I – критична точка A_1 , і температура завершення мартенситних перетворень t_{Mf} . У загальному випадку, температури початку перлітних перетворень t_I і завершення мартенситних перетворень t_{Mf} залежать від хімічного складу сталі і можуть бути розраховані по відомих регресійних залежностях (див., наприклад, [70]). З огляду на прийняті нами допущення, для низьковуглецевих низьколегованих сталей вони мають вигляд:

$$t_{A1} = 723, (^{\circ}\text{C}) ; \quad (5.32)$$

$$t_{Mf} = r_{0_t_{Mf}} - r_{1_t_{Mf}} \cdot m_c, (^{\circ}\text{C}) . \quad (5.33)$$

За границями області визначення, механічні властивості сталі вже не залежать від температури самовідпуску, а визначаються тільки вмістом вуглецю в сталі, тобто описуються регресійними залежностями виду:

$$\sigma_{B(r)} = r_0^{\sigma_{B(r)}} + r_1^{\sigma_{B(r)}} \cdot m_c, \quad (5.34)$$

$$\sigma_{B(3)} = r_0^{\sigma_{B(3)}} + r_1^{\sigma_{B(3)}} \cdot m_c, \quad (5.35)$$

де $\sigma_{B(r)}$, $\sigma_{B(3)}$ – тимчасові опори розриву гарячекатаної і загартованої цілком на мартенсит сталей; $r_0^{\sigma_{B(r)}}$, $r_1^{\sigma_{B(r)}}$, $r_0^{\sigma_{B(3)}}$, $r_1^{\sigma_{B(3)}}$ – постійні коефіцієнти регресії.

Знаючи коефіцієнти регресії в (5.33, 5.34), легко одержати залежність для розрахунку тимчасового опору розриву в області визначення залежностей (5.30, 5.31), тобто в температурному інтервалі $t_{Mf} \leq t_{cm} \leq t_{A1}$. Приймавши

$\sigma_B(t_{A1}; m_c) = \sigma_{B(r)}(m_c)$ і $\sigma_B(t_{Mf}; m_c) = \sigma_{B(3)}(m_c)$, маємо:

$$\sigma_{B(n)} = r_0^{\sigma_{B(r)}} + r_1^{\sigma_{B(r)}} \cdot m_c + \frac{(r_0^{\sigma_{B(3)}} - r_0^{\sigma_{B(r)}}) + (r_1^{\sigma_{B(3)}} - r_1^{\sigma_{B(r)}}) \cdot m_c}{723 - r_{0_t_{Mf}} + r_{1_t_{Mf}} \cdot m_c} \cdot (723 - t_{опп}) . \quad (5.36)$$

При $t_{cm} \geq t_{A1}$ тимчасовий опір розриву визначається по залежності (5.34), і при $t_{cm} \leq t_{Mf}$ – по залежності (5.36).

Аналогічно можна одержати залежність для визначення залежності тимчасового опору розриву відпущеного мартенситу, від температури самовідпуску. Варто врахувати дві особливості протікання процесу відпуску мартенситу, пов'язані з тим, що структурні зміни в мартенситі протікають у часі, а їхній вплив на властивості сталі залежать від температурного інтервалу відпуску.

Експериментальні дослідження впливу температури ізотермічного відпуску на механічні властивості загартованої сталі проводяться при тривалості відпуску одна година [113], що відповідає часу завершення інтенсивного зростання карбідних часток у відпущеному мартенситі [11]. Особливістю відпуску прокату після його загартування в установці прискореного охолодження є те, що він є неізотермічним і включає дві фази: відносно коротку, 4-15 секунд у залежності від профілю [119], фазу розігріву поверхневого шару прокату до температури самовідпуску прокату на холодильнику (фазу нерегулярного режиму), і другу фазу щодо плавного зниження температури прокату (фазу регулярного режиму). Це дозволяє при аналізі процесу самовідпуску поверхневого шару мартенситу враховувати тільки фазу регулярного режиму охолодження прокату на холодильнику. Питання приведення середньомасової температури прокату і неізотермічних умов відпуску мартенситу на холодильнику до еквівалентної температури відпуску при ізотермічних умовах розглянуті в роботі [49].

Експериментальні дослідження взаємозв'язку механічних властивостей загартованої сталі від температури відпуску показали практично лінійне зниження тимчасового опору розриву зі збільшенням температури відпуску при температурах відпуску вище температури завершення мартенситного перетворення аж до температури, що відповідає гарячекатаному стану сталі [113].

Механічні властивості (тимчасовий опір розриву) відпущеного мартенситу при температурі завершення мартенситного перетворення можуть бути описані регресійною залежністю (5.35), а при температурі A_1 – залежністю:

$$\sigma_{B(0)} = r_0^{\sigma_{B(0)}} + r_1^{\sigma_{B(0)}} \cdot m_c, \quad (5.37)$$

де $\sigma_{B(o)}$ – тимчасовий опір розриву мартенситу, відпущеного при температурі A_1 , $r_0^{\sigma_{B(o)}}$, $r_1^{\sigma_{B(o)}}$ – коефіцієнти регресії.

Тоді залежність для розрахунку тимчасового опору розриву при відомій приведеній температурі відпуску нижче температури завершення мартенситних перетворень приймає вид:

$$\sigma_{B(M)} = r_0^{\sigma_{B(o)}} + r_1^{\sigma_{B(o)}} \cdot m_c + \frac{(r_0^{\sigma_{B(s)}} - r_0^{\sigma_{B(o)}}) + (r_1^{\sigma_{B(s)}} - r_1^{\sigma_{B(o)}}) \cdot m_c}{723 - r_{0_tMf} + r_{1_tMf} \cdot m_c} \cdot (723 - \tilde{t}_{отп}). \quad (5.38)$$

Тут $\tilde{t}_{отп}$ – приведена температура відпуску, що відповідає температурі ізотермічного відпуску мартенситу.

На практиці залежність (5.37) зручніше одержувати для температури нижче температури A_1 , але свідомо більше температури самовідпуску прокату на холодильнику. У цьому випадку в залежності (5.38) варто підставляти замість прийнятої температури A_1 (723°C) температуру, при якій отримана залежність (5.37). Це ж справедливо і для рівняння (5.34) і (5.36).

Аналогічні системи рівнянь можуть бути отримані і для інших параметрів, що характеризують механічні властивості прокату.

Таким чином, задача прогнозування механічних властивостей прокату, зокрема тимчасового опору розриву, зводиться до визначення коефіцієнтів регресії системи однопараметричних рівнянь (5.33-5.35, 5.37). Відповідні дослідження не вимагають промислових експериментів, а можуть бути виконані в лабораторних умовах для прокату, виготовленого на об'єкті для якого створюється модель.

Для перевірки коректності запропонованої методики декомпозиції була проведена оцінка коефіцієнтів регресії рівнянь (5.33-5.35, 5.37) і температури початку мартенситних перетворень. Отримано наступні оцінні залежності:

$$t_{Ms} = 510 - 470 \cdot m_c, (^{\circ}\text{C}); \quad (5.38)$$

$$t_{Mf} = 400 - 500 \cdot m_c, (^{\circ}\text{C}); \quad (5.39)$$

$$\sigma_{B(r)} = 330 + 800 \cdot m_c, (\text{H/мм}^2); \quad (5.40)$$

$$\sigma_{B(3)} = 700 + 3000 \cdot m_c, \text{ (Н/мм}^2\text{)} \quad (5.41)$$

$$\sigma_{B(0)} = 283 + 920 \cdot m_c, \text{ (Н/мм}^2\text{)}. \quad (5.42)$$

Підстановка отриманих коефіцієнтів регресії в (5.36, 5.38) дає:

$$\sigma_{B(\Pi)} = 330 + 800 \cdot m_c + \frac{370 + 2400 \cdot m_c}{323 + 500 \cdot m_c} \cdot (723 - t_{cm}), \text{ (Н/мм}^2\text{)} ; \quad (5.43)$$

$$\sigma_{B(M)} = 283 + 920 \cdot m_c + \frac{417 + 2080 \cdot m_c}{323 + 500 \cdot m_c} \cdot (723 - \tilde{t}_{отп}), \text{ (Н/мм}^2\text{)}. \quad (5.44)$$

Незважаючи на оцінний характер залежності (5.43), експериментальні дані досить добре з нею погоджуються. Так, експериментальні залежності зміни тимчасового опору розриву прокату зі сталі 35ГС від температури самовідпуску з [113], накривають розрахункову пряму для сталі зі вмістом вуглецю (по масі) 0,3%. Трохи завищені значення розрахункового тимчасового опору розриву в порівнянні з експериментальними даними пояснюється великим розкидом вихідних даних, на підставі яких була прийнята оцінна залежність (5.40) для розрахунку тимчасового опору розриву гарячекатаного прокату – тимчасові опори розриву сталі для однієї сталі з практично однаковим вмістом вуглецю в різних авторів відрізнялися до 200 Н/мм². Це пов'язано з впливом розмірів зерен аустеніту на властивості гарячекатаної сталі. З цього випливає, що при адаптації моделі під конкретну технологію прокатки, особливу увагу варто приділити дослідженню механічних властивостей гарячекатаної сталі, зокрема, для прокату різних профілерозмірів.

Трохи незвичайний висновок можна зробити з зіставлення залежностей (5.43) і (5.44): тимчасовий опір розриву феріто-перлітної (бейнітної) структури близький до тимчасового опору розриву мартенситу, відпущеного при температурі утворення феріто-перлітної (бейнітної) структури. Однак, цей висновок не суперечить експериментальним даним – як показано в [49], приведена температура відпуску поверхневого мартенситного шару при охолодженні прокату на холодильнику завжди нижче температури самовідпуску, при якій відбуваються фазові перетворення в серцевинному шарі. Внаслідок

цього при одноцикловому охолодженні твердість поверхневого мартенситного шару вище, ніж серцевинного шару, а у випадку високого відпуску поверхневого шару мартенситу, що має місце при двоцикловому охолодженні, твердість поверхневого шару високовідпущеного мартенситу виявляється меншою, ніж серцевинного шару [14]. Варто очікувати аналогічного співвідношення і між тимчасовими опорами розриву шарів.

Отже, запропонована методика декомпозиції моделі розрахунку механічних властивостей арматурної сталі адекватна і добре погодиться з експериментальними даними.

Аналогічна декомпозиція моделей може бути проведена для розрахунку границі текучості σ_T (відносної межі пружності $\sigma_{0,2}$), відносного подовження після розриву δ_5 і рівномірного подовження δ_p . Єдина особливість такої декомпозиції для відпущеного мартенситу полягає в тому, що “з підвищенням температури відпуску границя текучості сталі σ_T не змінюється аж до температури відпуску $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ” (С.259 [113]). Це ж повною мірою можна віднести і до відносного подовження після розриву δ_5 і рівномірному подовженню δ_p відпущеного мартенситу (див. рис.80 на С.258 [113]). Тобто, для границі текучості σ_T (відносна границя пружності $\sigma_{0,2}$), відносного подовження після розриву δ_5 і рівномірного подовження δ_p у регресійні залежності виду (5.38) замість $-r_{0_t_{MF}} + r_{1_t_{MF}} \cdot m_c$ необхідно підставляти $-400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а область їхнього визначення лежить між температурами A_1 і $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Такий характер зміни механічних властивостей відпущеного мартенситу від температури відпуску цілком визначається процесами, що відбуваються при цьому в сталі і досить докладно дослідженими в [11] і описаними в [71]. В силу кінцевої й обмеженої швидкості охолодження прокату мартенсит, що утворився в ньому, відразу ж піддається другій стадії розпаду (відпуску) з утворенням карбідних часток пластинчастої форми. З ростом температури відпуску спостерігається зростання часток зі збереженням пластинчастої форми. Ріст часток супроводжується і зростанням внутрішніх напружень на їхніх границях. У температурному інтервалі $300\div 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає третій стадії відпуску

мартенситу, зростання часток інтенсифікується, і з температури вище 350 °С починається процес сферодізації карбідів, що супроводжується підвищенням пластичності відпущеного мартенситу. Таким чином, зниження тимчасового опору розриву при практично постійній межі пружності і пластичних характеристик у температурному інтервалі до ≈ 400 °С пов'язано з ростом внутрішніх напружень у відпущеному мартенситі, а зниження міцнісних властивостей і підвищення пластичності при температурах вище 400 °С – із процесами сферодізації карбідних часток.

5.2.2 Взаємозв'язок магнітної фазової структури і температурного поля в перетині прокату на виході установки термозміцнення

Магнітні властивості прокату, оцінювані електромагнітним методом, прямо пропорційні кількості в ньому α -заліза в перетині розміщення датчика магнітної фази.

Усе магнітне α -залізо в прокаті на виході установки термозміцнення є мартенситом. Тому кількість магнітної фази в прокаті є як функцією температури прокату, так і температур початку і завершення мартенситного перетворення.

На рис.5.3 схематично представлені графік зміни температури прокату по його перетину й область магнітної фази в прокаті (заштрихована) на виході установки термозміцнення.

Площа, займана мартенситом у перетині прокату, може бути розрахована по формулі:

$$S_m = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{R_{\text{пр}}} r \cdot \alpha_m(r) dr , \quad (5.45)$$

де $R_{\text{пр}}$ – радіус прокату; $\alpha_m(r)$ – відносна частка мартенситу в шарі прокату радіусу r .

Залежність кількості мартенситу, що утворився, від температури після початку мартенситних перетворень носить експонентний характер, і за

температуру завершення перетворень приймається температура, при якій об'ємна частка досягає 0,99 [70], тому для шару прокату з температурою $t_{(r)} < t_{Ms}$ маємо:

$$\alpha_{m(r)} = 1 - \exp\left\{-4,6 \cdot \frac{t_{Ms} - t_{(r)}}{t_{Ms} - t_{Mf}}\right\}, \quad (5.46)$$

де t_{Ms} , t_{Mf} – температури початку і завершення мартенситних перетворень.

Відомо, що в області регулярного режиму охолодження розподіл температури по перетину циліндричного тіла може бути описано квадратичною параболою [36]. Для практичних розрахунків охолодження арматурного прокату приймається, що на виході з установки термозміцнення має місце регулярний режим [119].

У цьому випадку температура шару прокату радіуса r може бути розрахована по температурі поверхні прокату $t_{пв}$ і середньмасовій температурі перетину прокату $t_{см}$:

$$t_{(r)} = 2 \cdot t_{см} - t_{пв} - 2 \cdot (t_{см} - t_{пв}) \cdot \left(\frac{r}{R_{пр}}\right)^2. \quad (5.47)$$

Підстановка (5.46) у (5.47) дає:

$$\alpha_{m(r)} = \left(1 - \exp\left\{-4,6 \cdot \frac{r^2 - r_{Ms}^2}{r_{Mf}^2 - r_{Ms}^2}\right\}\right), \quad (5.48)$$

де r_{Ms} , r_{Mf} радіуси шарів прокату з температурою початку і завершення мартенситного перетворення, відповідно:

$$r_{Ms} = R_{пр} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_{см} - (t_{пв} + t_{Ms})}{2 \cdot (t_{см} - t_{пв})}}, \quad (5.49)$$

$$r_{Mf} = R_{пр} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_{см} - (t_{пв} + t_{Mf})}{2 \cdot (t_{см} - t_{пв})}}. \quad (5.50)$$

Відзначимо, що (5.46) справедливо при $r \geq r_{Ms}$, а при $r < r_{Ms}$ маємо $\alpha_{m(r)} = 0$.

Тоді, з урахуванням зміни нижньої межі інтегрування, (5.45) можна переписати у виді:

$$S_M = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_{Ms}}^{R_{np}} r \cdot \left(1 - \exp \left\{ -4,6 \cdot \frac{r^2 - r_{Ms}^2}{r_{Mf}^2 - r_{Ms}^2} \right\} \right) dr . \quad (5.51)$$

Після інтегрування, перетворення і переходу до відносної кількості магнітної фази s_M в перетині прокату, одержуємо:

$$s_M = \frac{S_M}{\pi \cdot R_{np}^2} = \frac{t_{Ms} - t_{пв} - 0,2174 \cdot (t_{Ms} - t_{Mf})}{2 \cdot (t_{cm} - t_{пв})} = \frac{(0,7826 \cdot t_{Ms} + 0,2174 \cdot t_{Mf}) - t_{пв}}{2 \cdot (t_{cm} - t_{пв})} . \quad (5.52)$$

У загальному випадку температури початку t_{Ms} і завершення мартенситних перетворень t_{Mf} залежать від хімічного складу сталі. Якщо обмежитися тільки впливом на них вмісту вуглецю в сталі і підставити в (3.43) залежність для температури початку мартенситних перетворень і залежність для температури завершення мартенситних перетворень, одержимо:

$$s_M \approx \frac{r_{0-t_{Ms}} - 0,22 \cdot (r_{0-t_{Ms}} - r_{0-t_{Mf}}) - t_{пв} - (0,78 \cdot r_{1-t_{Ms}} + 0,22 \cdot r_{1-t_{Mf}}) \cdot m_c}{2 \cdot (t_{cm} - t_{пв})} , \quad (5.53)$$

а після підстановки чисельних коефіцієнтів регресії (див. (5.38, 5.39)):

$$s_M \approx \frac{(486 - t_{пв}) - 477 \cdot m_c}{2 \cdot (t_{cm} - t_{пв})} . \quad (5.54)$$

З (5.54) випливає, що кількість магнітної фази в прокаті є лінійною функцією масової частки вуглецю в сталі і обернено-пропорційною – різниці середньомасової температури і температури поверхні прокату.

5.3 Параметри що входять в критерії якості управління розкромом прокату

Для забезпечення максимального виходу мірного стрижневого прокату відповідно до замовлення необхідно заздалегідь розрізати (розкроїти) розкат на прутки по визначеному способу (розкрійному плану) [1,56].

Відомі три технологічних критерії побудови розкрійних планів. Перший – дотримання кратності довжин прутків довжинам товарних стрижнів, другий – забезпечення максимально можливої довжини прутків, що відрізаються, для

підвищення використання площі холодильника, третій – обмеження мінімальної довжини останнього прутка, що відрізається.

Назви відомих використовуваних на практиці способів розкрою обумовлені тим, якою мірою задовольняються ці критерії.

5.3.1 Рівномірний розкрій

По цьому способу кожний розкат поділяється рівномірно на однакову кількість прутків довільної рівної довжини, що перевищує мінімальне значення. Спосіб задовольняє тільки третьому технологічному критерію. План розкрою записується в такому чином:

$$l_p = (n - 1) \cdot l_{\text{пр}} + l_k, \quad (5.55)$$

де: l_p - довжина розкату; n - задане число прутків; $l_{\text{пр}}$ - розрахункова довжина прутка; l_k - довжина кінцевого прутка (може відрізнятись від $l_{\text{пр}}$).

Довжини прутків підлягають умові:

$$l_k \leq l_{\text{пр}} \leq l_{\text{пр max}}; \quad l_{\text{пр}} = \frac{l_p}{n}; \quad l_{\text{пр}} \Rightarrow l_{\text{пр max}} \quad (5.56)$$

де: $l_{\text{пр max}}$ - максимально припустима довжина прутка, що відрізається, залежна від довжини холодильника і шляху гальмування;

$$l_k = V_{\text{пр}} \cdot t_{\text{кл}}, \quad (5.57)$$

де: $V_{\text{пр}}$ - швидкість прокатки; $t_{\text{кл}}$ - тривалість циклу клапанів холодильника.

При розкрої розкату інформація про передбачувану його довжину необхідна до початку розподілу на летучих ножицях. Час між спрацьовуваннями летучих ножиць t_n , може змінюватися відповідно до довжини розкату l_p :

$$t_n = \frac{l_p}{n \cdot k_o \cdot V_{\text{пр}}}, \quad (5.58)$$

де: k_o - коефіцієнт обгону ножиць, тобто відносне перевищення лінійної швидкості ножів над швидкістю прокатки, звичайно $k_o = 1,02 - 1,1$.

5.3.2 Розкрій по уставці (по жорсткій програмі)

По цьому способу кожен розкат поділяється на однакові прутки, довжина яких задається максимальній і кратній довжині стрижнів, а кінцеві прутки, що утворюються, відокремлюються від суміжних розкатів таким чином, щоб з урахуванням розриву між ними їхня загальна довжина знаходилася в межах від мінімальної до заданої.

План розкрою записується в такий спосіб:

$$l_p = n \cdot l_{\text{пр}} + l_k, \quad (5.59)$$

де: $l_{\text{пр}} \Rightarrow l_{\text{пр max}}$ - довжина прутка, кратна заданій обумовленій довжині стрижня l_c :

$$l_{\text{пр}} = r \cdot l_c, \quad (5.60)$$

де: r - кратність.

При такому плані розкрою не потрібне прогнозування довжини розкату l_p , два перших технологічних критерії задовольняються цілком.

Час між спрацьовуваннями летучих ножиців t_n визначається так само, як і при рівномірному розкрої.

Недоліком способу є можливість утворення кінцевих прутків довільної довжини, що може викликати їхнє аварійне застрявання при транспортуванні по рольгангу.

5.3.3 Розкрій на крат (ступінчастий)

По цьому способу кожен розкат поділяється на дві модифікації довжин прутків. Прутки першої модифікації відокремлюються від головної частини розкату, і їхня довжина вибирається максимально можливою, прутки другої модифікації мають меншу довжину. План розкрою має вигляд:

$$l_p = n_1 \cdot l_{\text{пр1}} + n_2 \cdot l_{\text{пр2}} + l_k, \quad (5.61)$$

де довжини прутків обох модифікацій:

$$l_{\text{пр1}} = r_1 l_{c1}; \quad l_{\text{пр2}} = r_2 l_{c2},$$

де: r_1 - максимальна кратність стрижнів довжиною l_{c1} ; r_2 - кратність стрижнів довжиною l_{c2} .

При такому плані розкрою потрібне прогнозування довжини розкату l_p , цілком реалізується третій технологічний критерій, а перший і другий – частково.

Час між спрацьовуваннями летучих ножиць $t_{н1}$ і $t_{н2}$ для двох модифікацій довжини прутків:

$$t_{н1} = \frac{l_{np1}}{K_o \cdot V_{np}}; \quad t_{н2} = \frac{l_{np2}}{K_o \cdot V_{np}}; \quad (5.62)$$

5.3.4 Прогнозування довжини розкату

Можливе використання трьох способів прогнозування довжини розкату.

1-й спосіб оснований на рівності часу проходження заготовки (розкату) через контрольні перетини стану – на вході і виході:

$$l_p = V_{пр} \cdot t_{вх}, \quad (5.63)$$

де: $t_{вх}$ - визначаємий час переміщення заготовки на вході в стан.

Точність прогнозування по цьому способу залежить від стабільності перетинів вихідної заготовки і готового прокату (тобто від стабільності коефіцієнту витяжки), точності визначення $t_{вх}$, наприклад, по спрацьовуванню фотореле, і точності визначення $V_{пр}$.

2-й спосіб оснований на допущенні про стабільність коефіцієнту витяжки при прокатці суміжних заготовок. Довжина наступного i -го розкату l_{pi} визначається через довжину l_{zi} i -ої заготовки і коефіцієнт витяжки попереднього $(i-1)$ -го розкату λ_{i-1} :

$$l_{pi} = l_{zi} \cdot \lambda_{i-1}, \quad (5.64)$$

$$\text{де } \lambda_{i-1} = \frac{l_{p(i-1)}}{l_{z(i-1)}},$$

тобто перша заготовка партії використовується в якості контрольної, і за результатами її прокатки визначається початковий коефіцієнт витяжки λ_0 .

Точність прогнозування по цьому способу, крім основного допущення, залежить від точності визначення довжини заготовки $l_{3(i-1)}$, наприклад, за часом її переміщення на вході в стан $t_{\text{вх}(i-1)}$, і швидкості входу в першу кліть.

$$l_{3(i-1)} = V_{\text{вх}} \cdot t_{\text{вх}(i-1)}, \quad (5.65)$$

а також від точності визначення довжини розкату на виході стану:

$$l_{\text{р}(i-1)} = V_{\text{вых}} \cdot t_{\text{вых}(i-1)}. \quad (5.66)$$

3-й спосіб оснований на вимірі тривалості проходження початку (кінця) заготовки через стан:

$$l_{\text{р}} = V_{\text{пр}} \cdot \sum_1^{N-1} \tau_{i,i+1} = V_{\text{пр}} \cdot t_{\Sigma}, \quad (5.67)$$

де: $\tau_{i,i+1}$ - час проходження заготовкою проміжку між i -ою і $(i+1)$ -ою клітьями N - клітьового безперервного стану.

Точність прогнозування по цьому способу залежить від точності визначення $V_{\text{пр}}$ і t_{Σ} .

Порівняння розглянутих способів прогнозування $l_{\text{р}}$ виявляється на користь 3-го способу.

5.3.5 Вплив способів розкрою на вихід стрижнів мірної довжини

Аналітичне визначення виходу стрижнів мірної довжини в залежності від способу розкрою розкату було виконано методом статистичного моделювання при заданих статистичних характеристиках величин, що входять у розкрійні плани [59].

Найменші втрати мають місце при розкрої по уставці, і, у залежності від замовленої довжини стрижнів від 6м до 12м, складають 2,5-3%. При розкрої на крат втрати зростають і складають, відповідно, 2,8-4%.

При рівномірному розкрої втрати найбільш значні і складають, відповідно, 4-8%.

Практично, ці втрати ще більше, тому що при моделюванні, виконаному тільки для одного профілерозміру прокату, враховані тільки основні технологічні параметри і параметри устаткування, що впливають на вихід мірної продукції. Крім того, не враховані втрати металу в обрізь при зачисних різках і торцовці на стаціонарних ножицях, що досягають на практиці 2-3%.

6 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОКАТКИ

6.1 Загальна методика настроювання швидкісного режиму безперервних станів

Настроювання й автоматична стабілізація швидкісного режиму прокатки в клітях безперервних станів здійснюються в три етапи.

Перший етап – початкова установка частот обертання (оборотів) приводів клітей. Виконується звичайно вручну при переході до прокатки нового профілерозміру. Значення частот обертання визначається простим перерахуванням:

$$\omega_y = \omega_k \cdot \frac{D_k}{D_y}, \quad (6.1)$$

де: ω_y - установлювана частота обертання; ω_k - частота обертання по таблиці калібрування профілерозміру; D_k - діаметр валків кліті по таблиці калібрування; D_y - діаметр встановлених у кліті валків.

Розрахункові значення ω_y збільшують послідовно по міжклітьових проміжках, «розтягуючи» стан таким чином, щоб у кожному із проміжків забезпечити початкову відносну неузгодженість $2 \div 2,5\%$ і гарантувати при прокатці першої заготовки підвищений натяг у прокаті. Це дозволить уникнути аварійних режимів підпору і петлевання при можливих помилках розрахунку ω_y .

Розрахунок ω_y і установка початкової неузгодженості по клітям може виконуватися також автоматичною системою управління швидкісним режимом при наявності в базі даних таблиць калібрувань і введенні значень діаметрів встановлених нових валків.

Другий етап – коректування частот обертання приводів клітей після початку прокатки. При ручному управлінні оператори послідовно зменшують відносну неузгодженість між клітями і групами клітей («збирають» стан) до такої величини, щоб забезпечити прокатку з мінімально можливим натягом.

У чорнових і проміжних групах клітей критерієм для оцінки величини натягу служить збільшення струму навантаження двигуна кліті або збільшення «розриву» між торцями заготовок (див. п. 5.1.5). Точність настроювання по цих параметрах досягає у кращих операторів 1-2%.

У чистових групах клітей критерієм для оцінки величини малого натягу (менш 10 Н/мм^2) служать параметри просторового положення розкату – прогин, амплітуда і частота коливань. Точність настроювання по цих параметрах досягає у кращих операторів 0,8-1%, що знаходиться на межі значення натягу, що допускається. Тривалість ручного коректування частот обертання звичайно досягається при прокатці 2-х – 3-х заготовок.

Система автоматичного управління швидкісним режимом дозволяє досягти в чистових клітях точності настроювання $0,3 \div 0,5\%$ і забезпечити за рахунок одночасності корекції швидкостей усіх клітей тривалість настроювання при прокатці від третини до половини першої ж заготовки.

Третій етап – стабілізація налагодженого режиму прокатки з мінімальними міжклітьовими натягами. При ручному управлінні оператор підтримує швидкісний режим з деяким «запасом» убік натягу (у порівнянні з мінімальним) щоб компенсувати швидкі технологічні збурення, на які він не встигає реагувати (температура і перетин заготовки, число ниток, що прокатуються, і ін.). Точність ручної стабілізації в чистових клітях 0,5- 0,8%, що забезпечує рівень натягу $5 \div 8 \text{ Н/мм}^2$.

При автоматичному управлінні в чистових клітях, наприклад, за допомогою систем АСРП, ПУСК точність стабілізації підвищується за рахунок швидкодії системи, що забезпечує рівень натягу не більш $0,2 \div 4 \text{ Н/мм}^2$.

Структура системи автоматичного управління швидкісним режимом стану будується таким чином, що остання кліть має постійну швидкість («ведуча» кліть), а регулювання швидкостей інших клітей стану здійснюється «назад» проти ходу прокатки. Це дозволяє виключити (або мінімізувати) збурення по вихідній швидкості прокатки на «чуттеві» до неї системи розкряу і термозміцнення прокату.

Особливістю систем управління швидкісним режимом багатониткових станів є спосіб розподілу регулюючого впливу між групами клітей при регулюванні «назад».

Нижче розглянута методика побудови систем автоматичного настроювання і стабілізації швидкісного режиму для станів різних типів: двониткового дрібносортного стану МС 250, чотирьохниткового дротового стану ПС 250, одноститкового дрібносортно-дротового стану МПС 250/150.

6.2 Методика автоматичного настроювання швидкісного режиму двониткового дрібносортного стану

Для забезпечення одноститкової прокатки без натягу або з малими натягами між проміжною і кожною з чистових груп клітей доцільно організувати регулювання горизонтальних петель або регулювання прогинів прокату.

Для регулювання петель необхідна реконструкція міжгрупових передатних жолобів для створення необхідних розкатних полів. Для регулювання прогинів у межах передатних жолобів необхідно створити похилі ділянки довжиною не менш 6 м для можливості утворення вільних прогинів до 100 мм. Обидва способи регулювання практично рівноцінні, вибір одного з них буде визначатися, виходячи зі складності того або іншого варіанта реконструкції передатних жолобів.

Основною особливістю погодженого регулювання швидкостей стану «назад» є можливість виникнення різних величин кінематичних неузгодженості між проміжною і кожною з чистових груп. Ці неузгодженості будуть викликатися різними по величині і за часом сумарними впливами «назад» при ручній корекції швидкостей клітей чистової групи і при роботі регуляторів прогину систем АСРП, а також - зміною площі перетину прокату до 1,5% на виході з проміжної групи у випадкові моменти часу при зміні кількості заготовок, що прокатуються.

Відповідно, регулюючі впливи «назад» автономних систем петлерегулювання (прогину) лівої і правої сторін можуть виявитися не тільки

різними по величині, але і за знаком, що приведе до конфліктної ситуації в роботі систем.

Оскільки уникнути цілком конфліктної ситуації неможливо, можна запропонувати два паліативних способи регулювання.

I спосіб. Один з регуляторів петлі (прогину), наприклад лівий, є ведучим, і його регулюючий вплив «назад» цілком передається на проміжну і чорнову групи. Другий регулятор (відомий) відпрацьовує як збурення по своїй стороні, так і вплив ведучого регулятора шляхом впливу на свою групу «уперед».

При такому способі швидкість вихідної кліті сторони першого регулятора залишається постійною, а - сторони другого регулятора може як збільшуватися, так і зменшуватися на величину різниці впливів регуляторів.

II спосіб. Один з регуляторів є ведучим, і половина його впливу, але не більш 0,5% установленної швидкості вихідній кліті, передається «уперед» на свою чистову групу, інша частина впливу передається «назад» на проміжну і чорнову групи. Другий регулятор відпрацьовує регулюючий вплив «уперед» на свою чистову групу. При такому способу за рахунок нестабільності швидкості вихідної кліті першої групи в межах $\pm 0,5\%$ можна, у порівнянні з I способом, на таку ж величину зменшити нестабільність швидкості на виході іншої чистової групи.

Однією з особливостей технології прокатки на стані 250-5 є те, що профілі №28 і №32 прокатуються як один пруток, без розкрою. У цьому випадку вимоги до стабільності вихідної швидкості не пред'являються, і можна застосовувати I спосіб. Профілі від №16 до №25 прокатується з розкромом на 2-4 прутка, і в цьому випадку також можна застосувати I спосіб – принаймні, по одній зі сторін швидкість буде стабільної, а по іншій стороні нестабільність складе близько 1%, що приведе до можливої помилки розкрою також до 1%, тобто до 1 м довжини прутка.

Іншою особливістю технології і розташування устаткування стану є те, що розкати при чергуванні завантаження в стан не одночасно «зв'язують» проміжну групу з обома чистовими групами.

Довжина розкату на виході з проміжної групи (з 9-ої кліті):

$$l_9 = l_3 \cdot \frac{F_3}{F_9}, \quad (6.2)$$

де l_3 – довжина заготовки; F_3 – площа перетину заготовки; F_9 – площа перетину прокату в 9-ій кліті (по калібруванню).

Відстань від 9-ої кліті до першої кліті чистової групи по лівій стороні $L_{л} = 23$ м, по правій стороні $L_{п} = 46$ м. Отже, довжина заготовки, що прокатується, одночасно в проміжній і в лівій чистовій групі $\Delta L_{л} = l_9 - L_{л}$, а для правої сторони $\Delta L_{п} = l_9 - L_{п}$. Довжина заготовки, що одночасно «єднає» обидві чистові групи з проміжною:

$$\delta l = \min \{ \Delta L_{л}, \Delta L_{п} \}, \quad (6.3)$$

причому, величина δl з урахуванням зміщення між завантаженням заготовок у стан може складатися з двох частин.

Тому способи I або II використовуються тільки при «зв'язаній» прокатці, в інший час регулятори петлі (прогину) відпрацьовують свої регулюючі впливи «назад». Для визначення моментів переключення впливу регуляторів необхідно відслідковувати (обчислювати) моменти початку і закінчення прокатки в 9-ій й у 12-ій (по правій стороні в 18-ій) клітках; одночасність перебування в 9-ій, 12-ій і 18-ій клітках свідчить про «зв'язану» прокатці.

У таблиці 6.1 приведені розраховані по калібруванню значення відносної довжини $\delta l_9 / l_9$ і, відповідно, відносного часу «зв'язаної» прокатки в умовах стану МС 250-5.

Дані таблиці свідчить про те, що для більшості профілів (крім №16) тривалість «зв'язаної» прокатки складає біля третини всього часу при безперервному завантаженні стану; у випадку пауз у завантаженні цей час ще зменшиться.

Таблиця 6.1 – Відносні довжини (часи) «зв'язаної» прокатки

Профіль №	l_9 , м	$\Delta L_{л}$, м	$\Delta L_{п}$, м	δl_9 , м	$\delta l_9 / l_9$, %
16	121,1	98,1	75,1	75,1	62,0
18÷20	73,6	50,6	27,6	27,6	37,5
22	72,5	49,5	26,5	26,5	36,5
24	74,7	51,7	28,7	28,7	38,4
25	69	46	23	23	33,3
28	72,5	49,5	26,5	26,5	36,5
32	66,2	35,2	12,2	12,2	18,4

Таким чином, незначна нестабільність вихідної швидкості стану при регулюванні по I або по II способу може виявлятися, в основному, не більш, ніж на третині сумарної довжини заготовки (часу прокатки).

6.3 Методика автоматичного настроювання швидкісного режиму багатониткового дровового стану

Основною задачею настроювання швидкісного режиму багатониткової прокатки є скорочення і стабілізація різноширинності прокату на вході в чистові групи клітей.

Скорочення різноширинності поліпшить роботу петлерегулятора перед чистовою групою клітей і підвищить ефективність усунення спадкоємної різноширинності прокату за рахунок підтримки режиму вільної прокатки перед чистовою групою. Стабілізація різноширинності дозволяє підвищити точність і спрощує роботу системи «ПУСК» по усуненню залишкової спадкоємної різноширинності прокату безпосередньо в чистовій групі клітей.

Скорочення різноширинності забезпечується підвищенням точності узгодження швидкісного режиму прокатки в міжклітьових проміжках.

Для підвищення точності настроювання швидкісного режиму прокатки оператором система управління швидкісним режимом прокатки повинна забезпечувати функцію погодженої групової зміни частот обертання усіх

попередніх – при керуванні «назад», або всіх наступних – при керуванні «уперед», клітей для будь-якого міжклітьового проміжку.

На стані ПС 250-3 погоджене групове управління в чорнових і перших проміжних групах доцільно здійснювати регулюванням «назад», у других проміжних і чистових групах – регулюванням «уперед».

Іншим резервом підвищення точності настроювання швидкісного режиму прокатки оператором є надання йому інформації про статичні моменти навантаження приводів клітей. У цьому випадку вплив перехідних процесів в електроприводах на оцінку якості настроювання швидкісного режиму прокатки буде зведено до мінімуму.

Контроль статичних моментів навантаження дозволяє при прокатці в одну нитку розрахувати міжклітьові зусилля в чорновій і проміжній групах клітей і видати операторові рекомендації з коректування швидкісного режиму прокатки. Після відпрацювання алгоритмів ідентифікації міжклітьових зусиль у режимі порадики з'являється можливість на їхній основі приступити до реалізації функцій автоматичного настроювання швидкісного режиму при прокатці в одну нитку в чорнових і першій проміжній групах клітей.

Зниження неузгодженості частот обертання приводів клітей у міжклітьових проміжках при багатонитковій прокатці може бути досягнуте шляхом автоматичної програмної корекції співвідношень швидкостей у цих проміжках при зміні числа працюючих ниток. Величина корекції є функцією числа працюючих ниток і діаметрів встановлених у клітях валків. Співвідношення частот обертання приводів двох послідовно розташованих клітей при зміні числа працюючих ниток розраховується по формулі:

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} \Big|_n = \frac{N_{i+1}}{N_i} \Big|_1 \cdot \frac{\lambda_{i+1} \Big|_n}{\lambda_{i+1} \Big|_1}, \quad (6.4)$$

де $\left. \frac{N_{i+1}}{N_i} \right|_n, \left. \frac{N_{i+1}}{N_i} \right|_1$ – відносини частот обертань $i+1$ -ої і i -ої клітей при прокатці в n ниток і одну нитку, відповідно, $\lambda_{i+1}|_n, \lambda_{i+1}|_1$ – витяжка в $i+1$ -ої кліті при прокатці в n ниток і одну нитку, відповідно.

Автоматичну програмну корекцію співвідношень частот обертань приводів дев'ятої і десятої клітей при зміні числа працюючих ниток проводити недоцільно. Більш точне настроювання швидкісного режиму прокатки для цього міжклітьового проміжку забезпечуються по прогинах прокату. Для підтримки мінімально можливих міжклітьових зусиль необхідно підтримувати максимально можливі прогини в цьому проміжку, що вимагає постійного коректування в ньому швидкісного режиму прокатки. Оператор фізично не в змозі безупинно контролювати і коректувати швидкісний режим прокатки між дев'ятою і десятої клітями. Тому пропонується для даного міжклітьового проміжку реалізувати автоматичне настроювання і стабілізацію режиму прокатки з максимальним прогином прокату з використанням датчика прогину.

Найбільший ефект по підвищенню точності геометричних розмірів катанки і стабілізації швидкісного режиму прокатки може бути досягнуто за рахунок автоматичного настроювання і корекції швидкісного режиму прокатки перед другими чистовими групами клітей – на великих петлевих столах.

Неузгодженість між тринадцятою і чотирнадцятої клітями – на великих столах складає 5,5%, що викликає інтенсивну утяжку профілю. У той же час, існує можливість забезпечити досить точне автоматичне настроювання швидкісного режиму прокатки в даному міжклітьовому проміжку, використовуючи датчик положення гарячого розкату. Автоматичне настроювання швидкісного режиму прокатки на великих петлевих столах ґрунтуються на контролі положення прокатів по обох нитках. У штатному режимі прокатки заготовки може бути виділено три стадії.

На першій стадії – при проходженні початкової ділянки заготовки, прокат знаходиться в зоні витягування прокату (див. рис.6.1.).

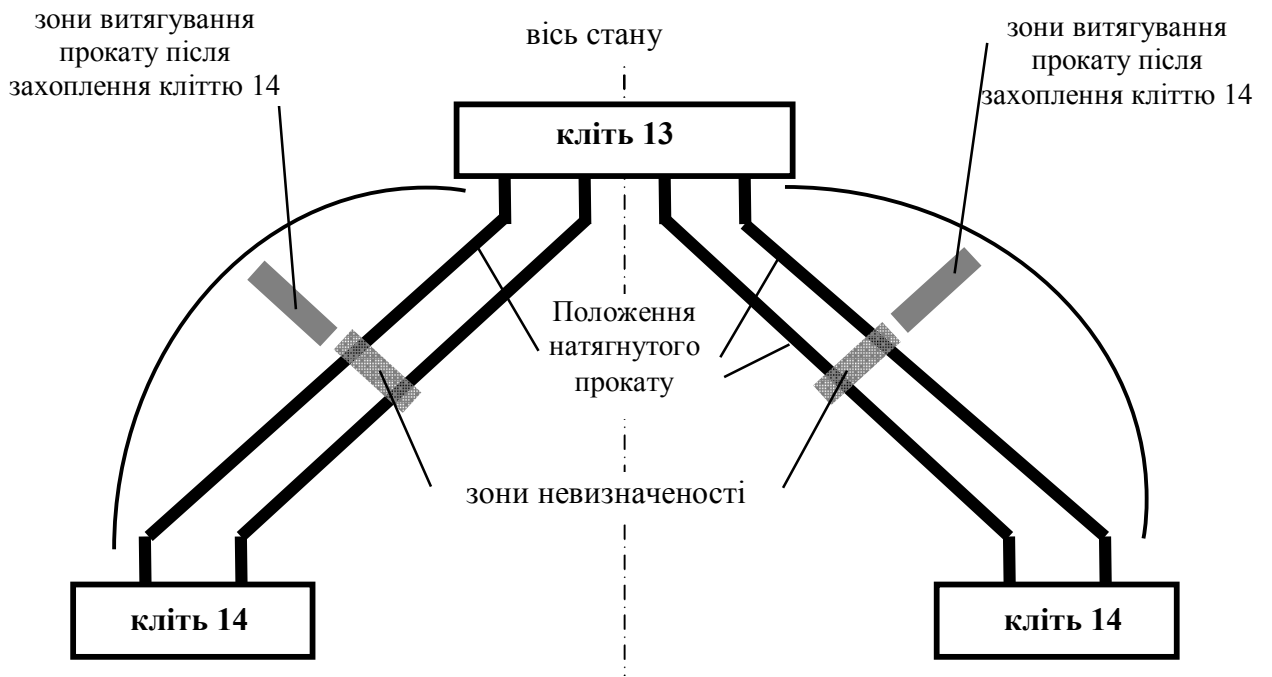


Рисунок 6.1 – Положення прокату на великих петлевих столах при прокатці заготовки

Автоматичне настроювання частоти обертання чотирнадцятої кліті здійснюються таким чином, щоб час витягування прокату відповідав t_{\max} . Спочатку цей час підбирається експериментальним шляхом і зберігається як базове \tilde{t}_{\max} разом з базовими значеннями частоти обертання привода \tilde{N}_{14} і діаметром валків \tilde{D}_{14} чотирнадцятої кліті. Для поточної частоти обертання N_{14} і фактичних діаметрів встановлених у кліть валків D_{14} час перераховується по формулі:

$$t_{\max} = \tilde{t}_{\max} \cdot \frac{\tilde{N}_{14} \cdot \tilde{D}_{14}}{N_{14} \cdot D_{14}}. \quad (6.5)$$

При прокатці в чотирнадцятої кліті двох ниток, настроювання здійснюють по максимальному, із двох ниток, часу витягування прокату.

При зміні числа робочих прокатних ниток з i -ої комбінації на j -у, існуюче співвідношення частот обертань тринадцятої і чотирнадцятої клітей для i -ої

комбінації робочих прокатних ниток – $\frac{N_{14}}{N_{13}} \Big|_i$, зберігають і встановлюють збережене раніше співвідношення для j -ої комбінації – $\frac{N_{14}}{N_{13}} \Big|_j$.

При відсутності збереженого співвідношення для j -ої комбінації, вона може бути розраховане по співвідношенню для i -ої комбінації.

$$\frac{N_{14}}{N_{13}} \Big|_j = \frac{N_{14}}{N_{13}} \Big|_i \cdot \frac{\lambda_{14} \Big|_j}{\lambda_{14} \Big|_i}, \quad (6.5)$$

де $\lambda_{14} \Big|_j$, $\lambda_{14} \Big|_i$ – розрахункові значення витяжки в чотирнадцятій кліті при j -ій і i -ій комбінаціях робочих прокатних ниток.

При автоматичному настроюванні швидкісного режиму прокатки на великих петлевих столах необхідно додатково контролювати вихід прокату з зони невизначеності. Вихід з цієї зони прокату допускається тільки безпосередньо перед виходом його з тринадцятої кліті. При виході прокату з цієї зони в процесі прокатки заготовки час t_{\max} повинен бути відкоректований у бік збільшення, тому що вихід прокату з зони невизначеності відбувався безпосередньо перед його виходом із тринадцятої кліті.

6.4 Методика визначення параметрів систем автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки в однопіткочовій чорновій групі

6.4.1 Ситуаційний аналіз процесу прокатки в чорновій групі клітей стану МПС 250/150

Інформаційне забезпечення алгоритмів автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки в чорновій групі клітей визначається, насамперед, використовуваними методами ідентифікації міжклітьових зусиль.

У той же час, загальним для всіх методів ідентифікації є ситуаційний аналіз процесу прокатки з фіксацією моментів проходження торців прокату визначених перетинів прокатного стану. Природними контрольними перетинами для

прокатного стану є осі клітей. Фіксація наявності прокату в клітях може бути здійснена або по величині статичного моменту, або по величині тиску прокату на валки клітей. Численні спроби постійного контролю тиску прокату на валки клітей спеціальними месдозами дали негативні результати у зв'язку з їх швидким виходом з ладу через тяжкі умови експлуатації. Таким чином, на практиці, контроль проходження прокатом осі кліті може бути здійснений тільки на основі аналізу статичного моменту прокатки.

У системах управління головними електроприводами клітей стану МПС 250/150 відсутні технічні засоби контролю статичного моменту навантаження. Безпосередня оцінка статичного моменту навантаження по струму якоря двигуна неможлива, оскільки стабілізація прогину прокату в чистовій і проміжній групах клітей здійснюється способом «назад» – регулюванням частоти обертання попередніх, по ходу прокатки, клітей. Це приводить до постійної роботи під час прокатки приводів клітей чорнової групи в перехідних режимах з динамічними струмами навантаження.

Іншою складністю фіксації моменту проходження торцем прокату осі кліті є поступове збільшення моменту прокатки в міру заповнення прокатом осередка деформації кліті в процесі його захоплення валками. Розрахунки показують, що довжина осередка деформації складає від 45мм до 80мм для різних клітей чистової групи, а час заповнення осередка деформації – до 0,3с.

Очевидним шляхом підвищення точності фіксації моменту проходження торцем прокату вісі кліті є визначення моменту досягнення величини статичного навантаження при захопленні прокату свого максимуму. Однак, такий максимум може бути зафіксований тільки після хоч і малого, але кінцевого інтервалу часу після завершення процесу заповнення осередка деформації прокатом.

Таким чином, для фіксації моментів проходження торців прокату вісей клітей МПС 250/150 необхідно передбачити в апаратно-програмному комплексі системи автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки засобу контролю статичних моментів навантажень електроприводів клітей.

Такі засоби повинні мати можливість здійснювати послідовний аналіз статичного навантаження приводу кліті при переході від холостого навантаження до повного прокатного навантаження для фіксації моменту проходження торця прокату вісі кліті, а алгоритм обробки такої інформації – забезпечувати часову синхронізацію даної інформації з реальними часовими параметрами процесу прокатки.

Засоби контролю статичних моментів навантажень електроприводів клітей необхідні також для автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки. Метод ідентифікації міжклітьових зусиль, заснований на ситуаційному аналізі статичних моментів навантаження електроприводів клітей, є базовим для алгоритмів автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки.

Аналіз можливостей фіксації проходження прокатом контрольних перетинів фотооптичними датчиками наявності прокату показав недоцільність їхнього використання за умовами експлуатаційної надійності і низької точності фіксації прокату в чорновій групі клітей.

6.4.2 Методика визначення величини статичного моменту електропривода кліті

Статичний момент електропривода кліті визначається по формулі:

$$M_c = M_d - J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.7)$$

де M_c – статичний момент навантаження двигуна; M_d – повний момент навантаження двигуна; J – приведений до двигуна момент інерції привода кліті (включаючи валки); ω – кутова швидкість вала двигуна.

В електроприводі кліті контролюється якірний струм ($I_{я}$), що пропорційний напрузі датчика струму ($U_{дт}$) і кутова швидкість вала двигуна по напрузі тахогенератора ($U_{тг}$).

Оскільки момент на валу двигуна пропорційний, при постійному потоці збудження, току якоря, а електроприводи чорнових клітей працюють у першій

зоні збудження, тобто при постійному струмі збудження, то рівняння (3.1) можна переписати у виді:

$$M_c = k_T \cdot U_{\text{дт}}^{\Delta t} - k_c \cdot \frac{\Delta U_{\text{тг}}}{\Delta t}, \quad (6.8)$$

де: k_T , k_c – коефіцієнти пропорційності; $\Delta U_{\text{тг}}$ – зміна напруги тахогенератора за час Δt ; $U_{\text{дт}}^{\Delta t}$ – усереднена, за той же інтервал часу Δt , напруга датчика струму.

Отже, задача інформаційно-математичного забезпечення контролю статичного моменту навантаження вирішується досить просто при правильному виборі (визначенні) коефіцієнтів пропорційності k_T , k_c і інтервалу часу Δt у (6.8).

Коефіцієнти пропорційності k_T , k_c можуть бути отримані експериментальним шляхом за наступною методикою.

Використовуючи стандартні засоби виміру, установимо коефіцієнт пропорційності $U_{\text{дт}}$ від $I_{\text{я}} - K_T$:

$$U_{\text{дт}} = K_T \cdot I_{\text{я}}. \quad (6.9)$$

Тоді коефіцієнт пропорційності k_T може бути розрахований безпосередньо по паспортним даним двигуна з обліком уставки на величину струму збудження в першій зоні:

$$k_T = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \cdot \frac{I_{\text{вп}}}{I_{\text{вн}}} \cdot K_T, \quad (6.10)$$

де: $M_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $I_{\text{вн}}$ – номінальні момент, якірний струм і струм збудження двигуна; $I_{\text{вп}}$ – фактичний струм збудження двигуна в першій зоні регулювання його частоти обертання.

Для визначення коефіцієнта k_c спочатку необхідно знайти коефіцієнт пропорційності $U_{\text{тг}}$ від частоти обертання електропривода $n_{\text{д}} - K_{\text{тг}}$. Він може бути отриманий зіставленням результатів контролю частоти обертання двигуна тахогенератором і інкрементальним датчиком:

$$U_{\text{тг}} = K_{\text{тг}} \cdot n_{\text{д}}. \quad (6.11)$$

Безпосередньо ж коефіцієнт k_c визначається за результатами наступного експерименту. На вхід завдання частоти обертання привода подається лінійно зростаючий сигнал до величини, що відповідає $0,8 \div 1,1$ номінальній частоті обертання двигуна, що контролюється по $U_{\text{тг}}$. Швидкість зростання сигналу вибирається такою, щоб максимальний струм якоря двигуна лежав у межах $0,5 \div 0,7 I_{\text{н}}$, а час зростання був не менш $1,5 \div 2,0$ с. При проведенні експерименту необхідно переконатися, що струм збудження приводу не змінюється.

На ділянці лінійного зростання частоти обертання двигуна при постійному якірному струмі – струмі розгону $I_{\text{яр}}$ (починається, приблизно, через $\tau_{\text{н}} = 200 \div 500$ мс після початку розгону) фіксується два значення напруги тахогенератора через проміжок часу $\Delta\tau$ ($\Delta\tau \geq 1$ с) – $U_{\text{тг}}(\tau)$ і $U_{\text{тг}}(\tau + \Delta\tau)$.

Після закінчення розгону фіксується вихід датчика струму $U_{\text{дт_хх}}$, що відповідає струму холостого ходу $I_{\text{хх}}$.

Коефіцієнт k_c визначається за результатами експерименту по формулі:

$$k_c = k_{\text{тг}} \cdot \Delta\tau \cdot \frac{U_{\text{дт}}^{\Delta\tau} - U_{\text{дт_хх}}}{U_{\text{тг}}(\tau) - U_{\text{тг}}(\tau + \Delta\tau)}. \quad (6.12)$$

Раціональне значення часу Δt в (6.8), що визначає періодичність, дискретність контролю статичного моменту навантаження, може бути оцінене з наступних міркувань.

Нижню границю раціонального Δt можна оцінити, виходячи з еквівалентної постійної часу контуру регулювання швидкості електропривода кліти. Для електроприводів клітей вона складає $0,025 \div 0,04$ с. Час перехідного процесу при настроюванні контуру регулювання швидкості, налагодженого на симетричний оптимум, складає $4 \div 5$ еквівалентних постійного часу контуру регулювання швидкості, тобто лежить у межах $100 \div 200$ мс. Цей час і може бути прийняте за нижню границю раціонального Δt .

Верхня границя раціонального Δt може бути оцінена по еквівалентної постійної часу контуру регулювання прогину в чистових клітках, що завжди більш 0,1с, оскільки при регулюванні «назад» ці контури визначають динаміку регулювання швидкості приводів чорнової групи. Час перехідного процесу в контурі регулювання прогину завжди більше 0,4с, що дозволяє прийняти дане значення за верхню границю раціонального Δt .

6.4.3 Методика розрахунку коефіцієнтів взаємозв'язку моменту двигуна кліті з міжклітьовими зусиллями

Момент на валу двигуна, необхідний для приводу валків робочої кліті прокатного стану складається з чотирьох величин [127]:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{пр}}/i_p + M_{\text{тр}} + M_{\text{хх}} + M_{\text{дин}}, \quad (6.13)$$

де: $M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, тобто момент, необхідний для подолання опору деформації металу, що прокатується, і сил тертя металу в калібрах валків; i_p - передаточне число редуктора кліті; $M_{\text{тр}}$ - приведений до вала двигуна момент додаткових сил тертя, що виникає у вузлах тертя (підшипниках валків і передавальних механізмів) без обліку моменту холостого ходу; $M_{\text{хх}}$ – момент холостого ходу; $M_{\text{дин}}$ – динамічний момент на валу двигуна, необхідний для подолання інерційних сил, що виникають при нерівномірному обертанні валків.

Перші три величини, що складають навантаження головного привода кліті, являють собою в сумі статичний момент.

Найбільша вага в статичному моменті двигуна має момент прокатки. Вираження для моменту прокатки в окремої кліті при безперервній прокатці, отримане на основі балансу енергії, має вигляд [15]:

$$M_{\text{пр}} = (p'_{\text{дм}} \cdot \ln \mu + \sigma_0 - \sigma_1) \cdot F_{\text{вых}} \cdot \frac{D_{\text{к}}}{2}, \quad (6.14)$$

де $p'_{\text{дм}}$ – тиск металу на валки при відсутності переднього і заднього натягу; μ – коефіцієнти витяжки прокату в кліті; $F_{\text{вых}}$ – площа перетину прокату на

виході з кліті; D_k – діаметр валків, що катає; σ_0, σ_1 - питомий задній і передній натяги (міжклітьові зусилля):

$$\sigma_0 = \frac{T_3}{F_{\text{вх}}}, \quad (6.15)$$

$$\sigma_1 = \frac{T_{\text{п}}}{F_{\text{ввх}}}, \quad (6.16)$$

а $T_3, T_{\text{п}}$ сили заднього і переднього міжклітьових зусиль у прокаті, тобто повні зусилля в прокаті безпосередньо перед і за кліттю; $F_{\text{вх}}$ – площа перетину прокату перед кліттю.

У моменті додаткових сил тертя виділяють дві складові – основну ($M_{\text{тр1}}$), пов'язану із силами тертя в підшипниках валків, і складову додаткової сили тертя, пов'язану з тертям у передавальному механізмі кліті ($M_{\text{тр2}}$) [127]:

$$M_{\text{тр}} = (M_{\text{тр1}} + M_{\text{тр2}}) / i_p, \quad (6.17)$$

де:

$$M_{\text{тр1}} = P_{\text{уп}} \cdot d_{\text{ц}} \cdot k_{\text{пв}}; \quad (6.18)$$

$$M_{\text{тр2}} = \left(\frac{1}{\eta_p} - 1 \right) \cdot (M_{\text{пр}} + M_{\text{тр1}}); \quad (6.19)$$

$P_{\text{уп}}$ – зусилля прокатки; $d_{\text{ц}}$ – діаметр цапф валків; $k_{\text{пв}}$ коефіцієнт тертя в підшипниках валків ($k_{\text{пв}} \approx 0,003$); η_p – к.к.д. редуктора ($\eta_p \approx (0,96 \div 0,98) \cdot r_{\text{ср}}$ де $r_{\text{ср}}$ – кількість ступіней редуктора кліті);

Зусилля прокатки визначається через питомий тиск металу на валки ($p_{\text{дм}}$) і горизонтальну проекцію площі контакту металу з валком (F_k):

$$P_{\text{уп}} = p_{\text{дм}} \cdot F_k. \quad (6.20)$$

У свою чергу, питомий тиск металу на валки при безперервній прокатці є функцією переднього і заднього міжклітьових зусиль [15]:

$$p_{\text{дм}} \approx p'_{\text{дм}} - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}. \quad (6.21)$$

Такий характер складового моменту двигуна робить доцільним представити його у виді суми двох складових – моменту навантаження $M_{\text{пн}}$, що залежить від умов прокатки:

$$M_{\text{пн}} = \frac{1}{i_p} \cdot (M_{\text{пр}} + M_{\text{тр1}} + M_{\text{тр2}}), \quad (6.22)$$

і власне моменту холостого ходу $M_{\text{хх}}$, що залежить тільки від поточного стану устаткування, який можна вважати постійним у процесі безперервної прокатки.

Підставивши в (6.22) розкриті вираження для членів правої частини даного рівняння і перетворивши, одержуємо:

$$M_{\text{пн}} = M_{\text{нф}} + M_{\sigma_0} - M_{\sigma_1},$$

де $M_{\text{нф}}$ – навантаження формозміни при відсутності переднього і заднього міжклітьових зусиль:

$$M_{\text{нф}} = \frac{1}{\eta_p \cdot i_p} \cdot \left(F_{\text{ввых}} \cdot \frac{D_K}{2} \cdot \ln \mu + d_{\text{ц}} \cdot k_{\text{пв}} \cdot F_K \right) \cdot p'_{\text{дм}}; \quad (6.23)$$

M_{σ_0} , M_{σ_1} – моменти на валу двигуна кліті, викликані дією заднього і переднього міжклітьових зусиль:

$$M_{\sigma_0} = \frac{1}{\eta_p \cdot i_p} \cdot \left(F_{\text{ввых}} \cdot \frac{D_K}{2} - 0,5 \cdot d_{\text{ц}} \cdot k_{\text{пв}} \cdot F_K \right) \cdot \sigma_0; \quad (6.24)$$

$$M_{\sigma_1} = \frac{1}{\eta_p \cdot i_p} \cdot \left(F_{\text{ввых}} \cdot \frac{D_K}{2} + 0,5 \cdot d_{\text{ц}} \cdot k_{\text{пв}} \cdot F_K \right) \cdot \sigma_1. \quad (6.25)$$

Співвідношення двох складових у дужках у (6.23-6.25) – $\frac{d_{\text{ц}}}{D_K} \cdot \frac{F_K}{F_{\text{ввых}}} \cdot k_{\text{пв}}$, для чорнових клітей сортопрокатних станів складає менш 1%, що дозволяє при практичних розрахунках зневажати другою складовою, а якщо врахувати, що $\frac{1}{\eta_p} \approx 1$, то (6.23-6.25) можна переписати у виді:

$$M_{\text{нф}} \approx \frac{1}{i_p} \cdot F_{\text{ввых}} \cdot \frac{D_K}{2} \cdot \ln \mu \cdot p'_{\text{дм}}; \quad (6.26)$$

$$M_{\sigma_0} \approx \frac{1}{i_p} \cdot F_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{D_k}{2} \cdot \sigma_0 ; \quad (6.27)$$

$$M_{\sigma_1} \approx \frac{1}{i_p} \cdot F_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{D_k}{2} \cdot \sigma_1 ; \quad (6.28)$$

У правих частинах виражень (6.26-6.28) технологічно залежними параметрами є $F_{\text{ВЫХ}}$, D_k , μ , $p'_{\text{ДМ}}$, σ_0 , σ_1 . Однак, вплив збурень технологічного процесу на відхилення цих параметрів від базових, наприклад, від їхніх середніх значень, різні.

Так, оскільки прокатка сортового прокату здійснюється в стиснутих калібрах, а валки клітей мають досить велику твердість, відносні зміни $F_{\text{ВЫХ}}$ й D_k у процесі прокатки незначні (менш 1%), що дозволяє вважати їх постійними величинами.

Тоді, при відомих складового статичного моменту навантаження (дана задача вирішується безпосередньо при ідентифікації міжклітьових зусиль), для розрахунку питомих міжклітьових зусиль досить знати перетин прокату в міжклітьових проміжках відповідно до калібрування і діаметру валків, встановлених у кліть.

Таким чином, для алгоритмів автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки необхідно забезпечити введення параметрів калібрування в апаратно-програмний комплекс.

6.4.4 Оцінка впливу технологічних факторів на статичний момент навантаження

Фактори, що визначають питомий тиск металу на валки кліті $p'_{\text{ДМ}}$, у стислій формі приведені в [127]. Він є мультиплікативною функцією опору деформації металу з коефіцієнтами-множниками, що враховують вплив форми осередка деформації і розподіл в ньому зон випередження, прилипання і відставання, а також коефіцієнта зовнішнього (поверхня прокату – поверхня валка) тертя.

Аналіз вираження для розрахунку опору деформації металу при гарячій прокатці, дозволив виділити фактор, що істотно впливає на питомий тиск металу на валки кліті – температуру прокату. Так, зміна температури металу на 50°C в процесі гарячої прокатки (саме така максимальна величина нерівномірності нагрівання заготовки регламентується технологічними інструкціями сортопрокатних цехів), приводить до зміни опору деформації металу приблизно на 6%, тоді як зміна швидкості і ступеня деформації, в області їхнього варіювання в процесі прокатки, дає розрахункові відхилення в сотих частках відсотка. Інші параметри, що входять у формули для розрахунку цих коефіцієнтів, для умов безперервної сортової прокатки можна прийняти постійними і зневажити впливом на них відхилень параметрів технологічного процесу, що мають місце при реальному процесі прокатки. Це дозволяє зневажити впливом корекції швидкісного режиму прокатки на питомий тиск металу на валки кліті.

Що ж стосується величини міжклітьових зусиль перед і за кліттю, то в силу взаємозв'язку клітей через метал, що прокатується, усі технологічні збурення швидкісного режиму прокатки, що виникають в осередках деформації клітей, що прокатують одну заготовку, приводять до зміни зусиль у тих міжклітьових проміжках, у яких знаходиться прокат цієї заготовки. Одним же з основних джерел збурень швидкісного режиму прокатки також є нерівномірність нагрівання заготовки по її довжині [39].

Результати експериментальних досліджень розподілу температури по довжині прокату, приведені в [110], показали наявність нерівномірного нагрівання окремих заготовок по довжині, а дослідження, проведені на сучасних станах, обладнаних печами з крокуючим подом, показали наявність складової нерівномірності нагрівання заготовки з періодом по довжині заготовки, рівним відстані між балками нагрівальної печі [39,51].

Оцінка нерівномірності нагрівання заготовки по довжині й облік її в алгоритмах ідентифікації міжклітьових зусиль і автоматичного настроювання

швидкісного режиму прокатки принципово дозволяють підвищити їхню точність.

Для дослідження взаємозв'язку зміни статичного моменту навантаження в процесі прокатки з нерівномірністю нагрівання заготовки необхідне зіставлення статичного моменту з поточною координатою заготовки, що прокатується. Фактично необхідно здійснити прив'язку поточного моменту навантаження до координати переднього торця заготовки в лінії стану.

Найбільше просто така прив'язка здійснюється на основі контролю швидкості прокатки і контролю проходження торцями прокату контрольних перетинів:

$$l_T = L_{МП} \cdot \frac{\int U_{ТГ} d\tau}{\int U_{ТГ} d\tau \cdot \Delta\tau_{МП}}, \quad (6.29)$$

де l_T – поточна координата торця прокату; $L_{МП}$ – довжина міжклітьового проміжку; τ – поточний час проходження торця прокату між вісями клітей; $\Delta\tau_{МП}$ – загальний час проходження прокатом міжклітьового проміжку (між вісями клітей).

6.4.5 Інформаційне забезпечення корекції швидкісного режиму прокатки

Результатом роботи алгоритму автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки є розрахунок рекомендованих значень частот обертання електроприводів клітей або величина їхньої корекції, або, при фіксованому кроці корекції – напрямок корекції. Такі розрахунки виконуються на основі аналізу міжклітьових зусиль і відповідного їм швидкісного режиму прокатки. Управління швидкісним режимом прокатки на стані МПС 250/150 здійснює система АСУ СРП, виконана на індустріальних комп'ютерах.

Усі дані про поточні задані частоти обертань приводів можуть бути отримані від даної системи в автоматичному режимі, і через дану систему

можливо здійснювати корекцію швидкісного режиму в автоматичному режимі, що, однак, вимагає доробки програмного і, можливо, технічного забезпечення АСУ СРП.

У цілому, інформаційна структура апаратно-програмного комплексу, необхідна для функціонування розрахункових алгоритмів автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки, представлена на рис.6.2.

6.5 Оцінка енергозбереження при автоматизації швидкісного режиму прокатки

Використання систем автоматизації настроювання і стабілізації швидкісного режиму прокатки з мінімальним міжклітьовим натягом дозволяє забезпечити високу точність поперечних розмірів готового прокату, зменшити різноширинність прокату по довжині і скоротити час настроювання швидкісного режиму при переході на новий профілерозмір.

При цьому енерговитрати на нагрівання і прокатку залишаються такими ж, як і при ручному управлінні. Економія енерговитрат можлива лише при скороченні кількості аварій (забурень) у стані за рахунок точної стабілізації мінімального натягу і прискорення настроювання стану.

На підставі досвіду роботи систем АСРП і по експертній оцінці можна очікувати скорочення кількості забурень, принаймні, на одиницю по кожній нитці стану в зміну. На забурення з інших причин, наприклад, по зносу і неправильній установці провадок, дефектам металу й ін., система стабілізації швидкісного режиму не впливає.

Для орієнтованої оцінки економії енерговитрат приймемо, що при кожному забуренні втрачається дві заготовки, одна в чистовій групі, а друга йде в обрізь на виході чорнової групи. Таким чином, за зміну у двонитковому безперервному стані при роботі систем стабілізації прокатується чотири зайві заготовки масою по 0,5т. При середньогодинній продуктивності стану близько 100 т/година за зміну (8 годин) буде виготовлено 800 т прокату і зекономлено 2т прокату, тобто:

$$2/800=0,0025 \quad \text{або } 0,25\%.$$

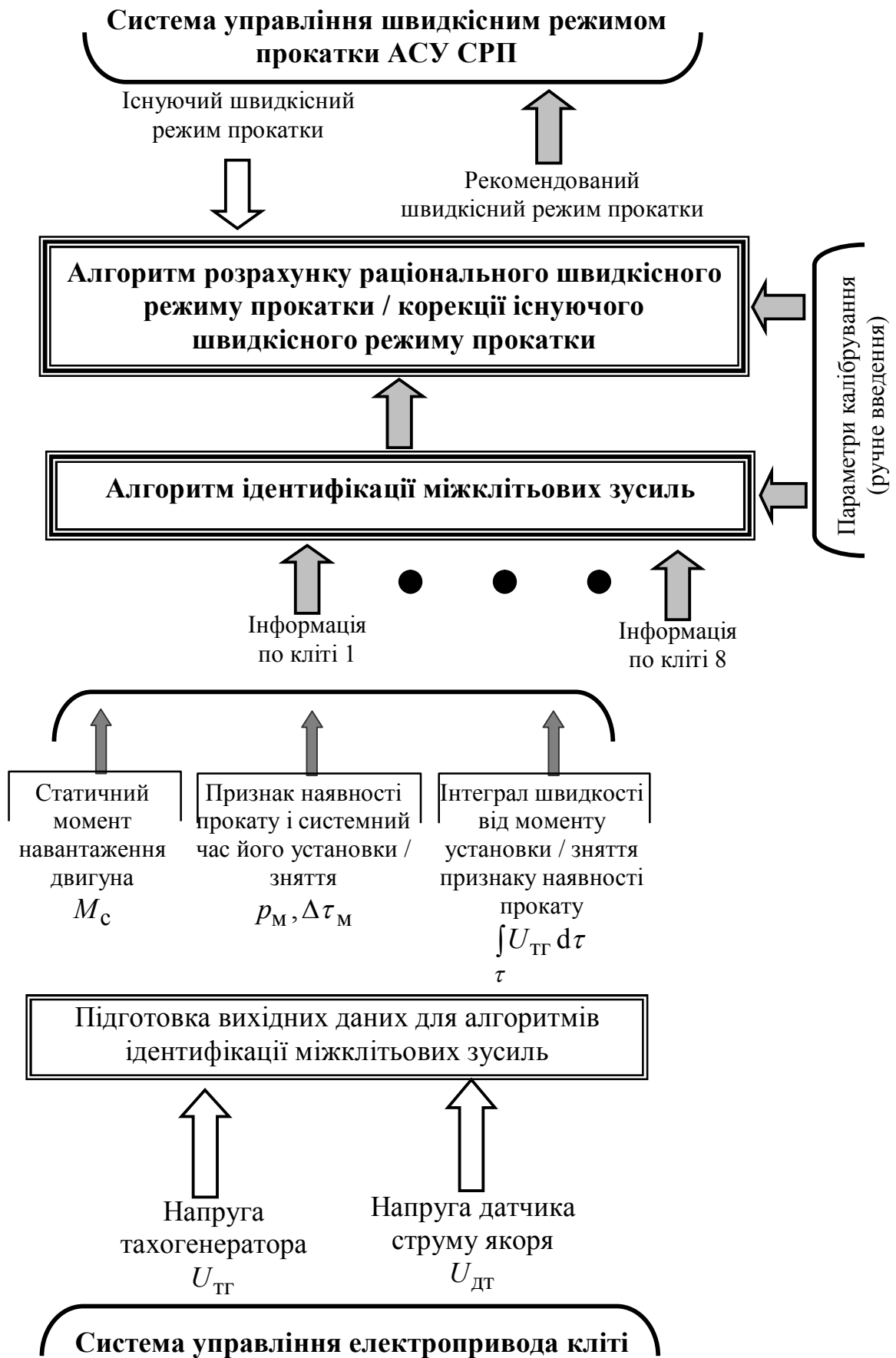


Рисунок 6.2 – Структура апаратно-програмного комплексу системи автоматичного настроювання швидкісного режиму прокатки

У калькуляції собівартості прокату питомі витрати на енергоносії (паливо, електроенергія) складають 3-4% /т. З них перемінна частина, зв'язана з обсягом виробництва, складає величину порядку 80-85%. Таким чином, можна оціночно прийняти відносну частину витрат енергоносіїв безпосередньо на нагрівання і прокатку металу в 3%/т.

В даний час відпускна ціна дрібносортового прокату, наприклад, арматурного, складає величину порядку 7500 грн/т, собівартість же виробництва прокату менше на 25-35% для забезпечення рентабельності виробництва.

Оціночно приймемо собівартість виробництва дрібносортового прокату не менш 5000 грн/т, тоді зниження собівартості за рахунок економії прокату при виключенні зазначених вище забурень складе:

– економія перемінної частини енергетичних витрат:

$$3 \text{ \%}/\text{т} \times 0,0025 = 0,0075 \text{ \%}/\text{т};$$

– економія зниження собівартості:

$$5000 \text{ грн}/\text{т} \times 0,0075 \times 10^{-2} = 0,375 \text{ грн}/\text{т}.$$

При річному обсязі виробництва дрібносортового стану порядку 800000 т економія складе:

$$800000 \text{ т} \times 0,375 \text{ грн}/\text{т} = 300 \text{ 000 грн}.$$

7 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ РЕЖИМУ ПРИСКОРЕНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ

7.1 Стратегія контролю процесу термозміцнення арматурного прокату

Стратегії контролю процесу термозміцнення істотно залежать від особливостей технології виробництва сталі і технічної можливості оснащення прокатного стану первинними засобами виміру.

З технологією виробництва сталі тісно пов'язані стабільність хімічного складу сталі в заготовках однієї плавки. Хімічний склад заготовок, отриманих на установках безперервного розливання сталі, досить стабільні. Навпроти, заготовки однієї плавки, отримані зі сталі розливої у виливниці, можуть мати досить великий розкид хімічного складу окремих заготовок у межах злитку. Через нерівномірне остигання злитка в ньому можуть виникати ліквіції хімічних елементів, склад яких і положення в злитку апріорі не визначаються.

Оскільки хімічний склад сталі визначається на стадії її розливання по ковшевій пробі, то, в залежності від технології виробництва заготовок, дані про хімічний склад сталі плавки можна приймати апріорі або як хімічний склад заготовки – при литій заготовці, або як математичне очікування хімічного складу заготовок однієї плавки – якщо заготовки отримані зі сталі, розливої у виливниці.

До технічних проблем по оснащенню первинними засобами виміру відноситься проблема контролю температури прокату в рихтувальних жолобах холодильника – тобто, фактично, проблема прямого виміру температури самовідпуску прокату хоча б в одному його перетині. Тут мають місце дві складності. Перша стосується розміщення і умов експлуатації технічних засобів виміру.

На одноплаткових прокатних станах з однобічним холодильником оптичні пірометри досить просто розміщуються біля рольганга холодильника, що підводить, з боку, протилежного розміщенню устаткування холодильника. На

двониткових станах спроби розмістити пірометри під рейковим настилом холодильника не дали позитивного результату через тяжкі умови експлуатації – значної запорошеності та наявності інтенсивного інфрачервоного випромінювання від прокату, що остигає. Пірометри швидко виходили з ладу, а точність їхнього візування на прокат залишала бажати кращого.

З проблемою візування на прокат пірометрів зв'язана друга технічна складність прямого виміру температури прокату на холодильнику. Зона візування оптичних пірометрів представляє пляму діаметром близько 10-20 мм і більш у залежності від типу пірометра і відстані до контрольованого об'єкта, тобто порівняна з поперечними розмірами основного сортаменту арматурного прокату. Якщо ж врахувати, що положення прутків прокату в рихтувальному жолобі точно не визначається, то при виробництві арматурного прокату з невеликими перетинами надійно вимірити температуру самовідпуску практично неможливо.

Контроль магнітної фази і температури охолоджувальної води на виході установки термозміцнення технічних труднощів не представляє.

Варіанти стратегій контролю процесу термозміцнення арматурного прокату в залежності від особливостей технології розливання сталі, з якої одержують заготовки, і оснащення стану первинними засобами контролю, приведені в табл. 7.1.

Безперервний контроль процесу термозміцнення можливий тільки при виробництві прокату з литої заготовки і за умови наявності контролю кількості магнітної фази в прокаті і температури охолоджувальної води на виході установки термозміцнення.

При виробництві прокату зі сталі, розливої у виливниці, контроль температури самовідпуску прокату на холодильнику дозволяє побічно оцінити масову частку вуглецю в сталі. Одержати чисельні значення всіх параметрів, необхідних для прогнозування механічних властивостей арматурного прокату, можливо тільки після укладання прутків прокату на настил холодильника, тобто після прокатки заготовки.

Таблиця 7.1 – Варіанти стратегій контролю процесу термозміцнення арматурного прокату

Технологія розливання сталі		Безперервне розливання сталі	Розливання сталі в виливниці
Параметри, прийняті апріорно		Хімічний склад сталі заготовки	М.О. хімічного складу сталі заготовки
Контрольовані параметри	Кількість магнітної фази в прокаті і температура охолоджувальної води на виході установки термозміцнення, температура самовідпуску прокату	Безперервна з дискретним уточненням параметрів моделі непрямой оцінки температури самовідпуску	Безперервно-дискретна
	Кількість магнітної фази в прокаті і температура охолоджувальної води на виході установки термозміцнення	Безперервна	Статистична
	Температура самовідпуску прокату	Дискретна	Дискретна

У той же час, безперервний контроль кількості магнітної фази в прокаті на виході установки термозміцнення дозволяє безупинно оцінювати стабільність процесу термозміцнення і виявляти його порушення.

Якщо при виробництві прокату зі сталі, розлитої у виливниці, контроль температури самовідпуску прокату на холодильнику нездійснений, тобто контролюється тільки кількість магнітної фази в прокаті і температура води на виході установки термозміцнення, то приходимо до стратегії контролю, заснованої на статистичній оцінці середньомасової температури і масової частки вуглецю в сталі заготовок. У цьому випадку прогнозується область значень, у якій знаходяться механічні властивості прокату. Мінімальний обсяг вибірки, що дозволяє оцінити границі цієї області, відповідає кількості заготовок, одержуваних з одного злитка, оскільки М.О. масової частки вуглецю

й інших елементів у заготовках, отриманих з одного злитка, відповідає їх вмісту в плавці, тобто може бути прийняте апріорі.

Підходи до управління процесом термозміцнення (див. рис.7.1) ґрунтуються на можливостях його контролю, тобто також визначаються особливостями технології розливання сталі, з якої одержують заготовки, і оснащенням стану первинними засобами контролю.

Іншим фактором, що визначає підходи до управління процесом термозміцнення арматурного прокату, є основні джерела нестабільності механічних властивостей арматурного прокату, а саме – прискорення прокату в установці термозміцнення і зміна хімічного складу сталі заготовок.

Тому в задачах управління можна виділити два напрямки. Перший – стабілізація механічних властивостей по довжині прокату за рахунок зміни режиму охолодження в процесі проходження кінцевої ділянки прокату через установку термозміцнення, і другий – коректування режиму термозміцнення при зміні хімічного складу сталі заготовок, тобто при переході до термозміцнення заготовок іншої плавки.

Проте, тимчасові періоди коректування режиму термозміцнення або закону його зміни при проходженні кінцевої ділянки прокату через установку термозміцнення, визначаються стратегією управління, представленої на рис.7.1.

7.2. Підвищення точності настроювання режиму термозміцнення арматурного прокату електромагнітним методом

У загальному розкіді механічних властивостей товарного арматурного прокату можна виділити три складові. Перша складова пов'язана з нерівномірністю охолодження прутків прокату по їхній довжині, друга – з коливаннями плавочного хімічного складу сталі, і третя – з випадковими лікваціями хімічних елементів у злитку.

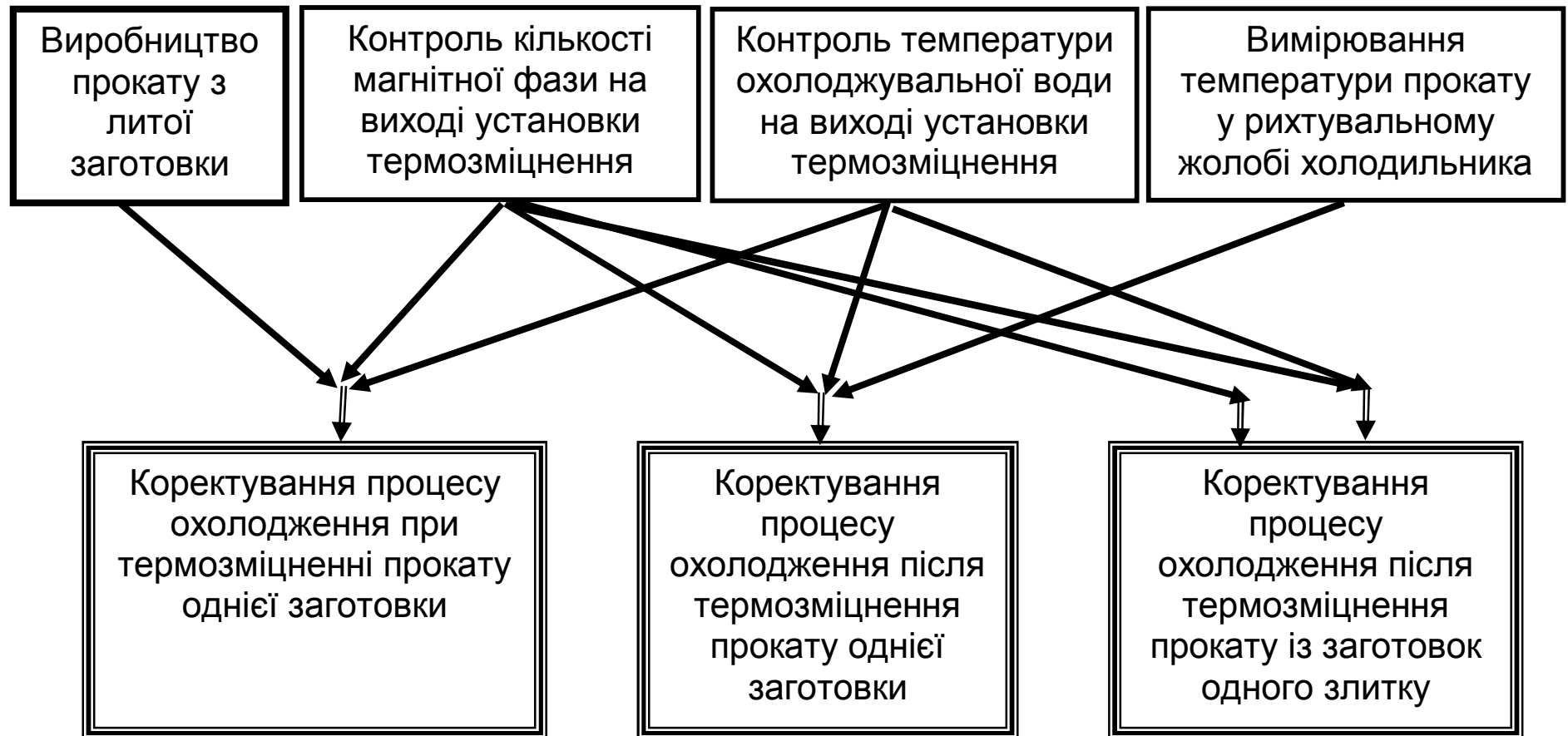


Рисунок 7.1 – Стратегії управління режимом термозміцнення арматурного прокату

Загальною задачею настроювання процесу термозміцнення арматурного прокату є вибір такого режиму термозміцнення, при якому нормовані параметри механічних властивостей товарного прокату знаходилися б в області припустимих, за умовами замовлення, значень.

Основними нормованими характеристиками механічних властивостей арматурного прокату є границя текучості (умовна границя текучості) σ_T , тимчасовий опір розриву σ_B і відносне подовження після розриву $\delta_{5(10)}$ [5], а область припустимих значень механічних властивостей може бути визначена системою нерівностей:

$$\sigma_{T_min_H} \leq \sigma_T, \quad (7.1)$$

$$\sigma_{B_min_H} \leq \sigma_B \leq \sigma_{B_max_H}, \quad (7.2)$$

$$\delta_{5(10)_min_H} \leq \delta_{5(10)}, \quad (7.3)$$

де $\sigma_{T_min_H}$ – нижня границя границі текучості, нормована замовленням (стандартом, технічними умовами), $\sigma_{B_min_H}$, $\sigma_{B_max_H}$ – нижня і верхня границі тимчасового опору розриву, нормовані замовленням (стандартом, технічними умовами), $\delta_{5(10)_min_H}$ – відносне подовження після розриву, нормоване замовленням (стандартом, технічними умовами).

Для арматурного прокату одного профілерозміру, класу по механічних властивостях, виробленого з однієї групи сталей (наприклад, низьковуглецевих низьколегованих сталей), залежності механічних властивостей від середньомасової температури прокату на виході установки термозміцнення в області, обумовленої нерівностями (1-3), можуть бути лінеаризовані і представлені у виді:

$$\sigma_T \approx \sigma_{T_b} - k_{\sigma_T}^{t_{cm}^0} \cdot (t_{cm}^0 - t_{cm_b}^0) + k_{\sigma_T}^{C_3} \cdot (C_3 - C_{3_b}), \quad (7.4)$$

$$\sigma_B \approx \sigma_{B_b} - k_{\sigma_B}^{t_{cm}^0} \cdot (t_{cm}^0 - t_{cm_b}^0) + k_{\sigma_B}^{C_3} \cdot (C_3 - C_{3_b}), \quad (7.5)$$

$$\delta_{5(10)} \approx \delta_{5(10)_b} + k_{\delta_{5(10)}}^{t_{cm}^0} \cdot (t_{cm}^0 - t_{cm_b}^0) - k_{\delta_{5(10)}}^{C_3} \cdot (C_3 - C_{3_b}), \quad (7.6)$$

де $t_{\text{см}}^0$ – середньомасова температура прокату на виході установки термозміцнення; C_3 – вуглецевий еквівалент хімічного складу сталі (згортка хімічного складу сталі по впливу хімічних елементів на механічні властивості, приведена до впливу вмісту вуглецю в сталі); $\sigma_{\text{т}_\text{б}}$, $\sigma_{\text{в}_\text{б}}$, $\delta_{5(10)_\text{б}}$ – базові значення $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$, $\delta_{5(10)}$, що відповідають базовим значенням середньомасової температури $t_{\text{см}_\text{б}}^0$ ($t_{\text{см}}^0 = t_{\text{см}_\text{б}}^0$) і вуглецевого еквівалента $C_{3_\text{б}}$ ($C_3 = C_{3_\text{б}}$).

Рівняння (7.4-7.6) дозволяють знайти проекцію області механічних властивостей, обумовлену нерівностями (7.1-7.3), на площину $C_3, t_{\text{см}}^0$:

$$t_{\text{см}}^0 \leq \left(\left(t_{\text{см}_\text{б}}^0 - \frac{k_{\sigma_{\text{т}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{т}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}} \right) + \frac{\sigma_{\text{т}_\text{б}} - \sigma_{\text{т}_\text{min}_\text{н}}}{k_{\sigma_{\text{т}}}^{t_{\text{см}}^0}} \right) + \frac{k_{\sigma_{\text{т}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{т}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}}, \quad (7.7)$$

$$t_{\text{см}}^0 \leq \left(\left(t_{\text{см}_\text{б}}^0 - \frac{k_{\sigma_{\text{в}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}} \right) + \frac{\sigma_{\text{в}_\text{б}} - \sigma_{\text{в}_\text{min}_\text{н}}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{t_{\text{см}}^0}} \right) + \frac{k_{\sigma_{\text{в}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}}, \quad (7.8)$$

$$t_{\text{см}}^0 \geq \left(\left(t_{\text{см}_\text{б}}^0 - \frac{k_{\sigma_{\text{в}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}} \right) - \frac{\sigma_{\text{в}_\text{max}_\text{н}} - \sigma_{\text{в}_\text{б}}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{C_3}} \right) + \frac{k_{\sigma_{\text{в}}}^{C_3}}{k_{\sigma_{\text{в}}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}}, \quad (7.9)$$

$$t_{\text{см}}^0 \geq \left(\left(t_{\text{см}_\text{б}}^0 - \frac{k_{\delta_{5(10)}}^{C_3}}{k_{\delta_{5(10)}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}} \right) - \frac{\delta_{5(10)_\text{б}} - \delta_{5(10)_\text{min}_\text{н}}}{k_{\delta_{5(10)}}^{t_{\text{см}}^0}} \right) + \frac{k_{\delta_{5(10)}}^{C_3}}{k_{\delta_{5(10)}}^{t_{\text{см}}^0}} \cdot C_{3_\text{б}}. \quad (7.10)$$

Нерівності (7.7-7.10) визначають, фактично, область режимів термозміцнення ($t_{\text{см}}^0$) у залежності від хімічного складу термозміцненої сталі (C_3). Крім цих нерівностей дана область обмежується праворуч максимальним значенням вуглецевого еквіваленту – C_{3_max} , обумовленого стандартом або технічними умовами, відповідно до яких виробляється арматурний прокат (див., наприклад, [5]):

$$C_3 \leq C_{3_\text{max}}, \quad (7.11)$$

а ліворуч і праворуч – граничними температурами фазових перетворень:

$$t_{\text{см}}^0 \leq t_{A_1}^0, \quad (7.12)$$

$$t_{\text{см}}^0 \geq t_{M_s}^0, \quad (7.13)$$

де $t_{A_1}^0, t_{M_s}^0$ – температури початку перлітних і мартенситних перетворень. У

[53] для низьковуглецевих низьколегованих сталей їх пропонується оцінювати рівняннями лінійної регресії:

$$t_{A_1} = \text{const}, \quad (^\circ\text{C}); \quad (7.14)$$

$$t_{M_s} = r_{0-t_{M_s}} - r_{1-t_{M_s}} \cdot C_{\%}, \quad (^\circ\text{C}). \quad (7.15)$$

Вид області робочих режимів охолодження для термозміцненого арматурного прокату класу А500С в координатах $C_{\%}, t_{\text{см}}^0$, побудованої на основі вихідних даних з [16,53,113], приведений на рис.7.2.

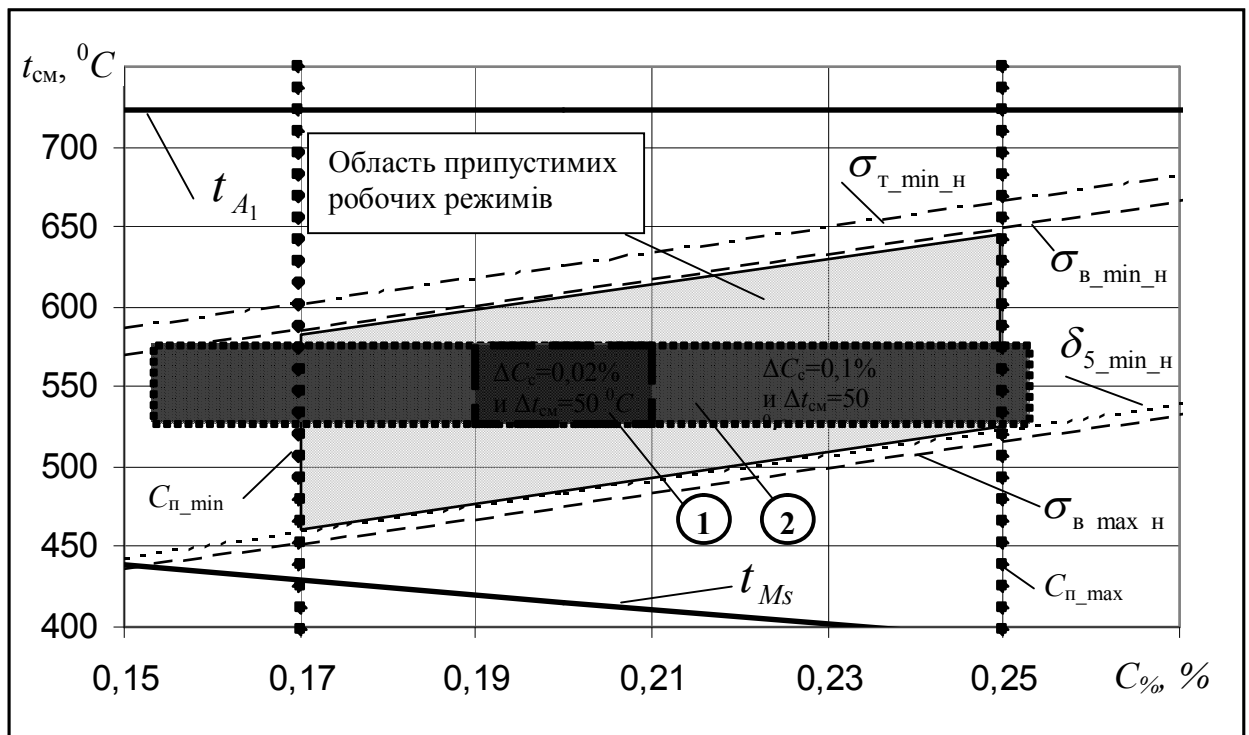


Рисунок 7.2 – Области робочих режимів термозміцнення при виробництві арматурного прокату класу А500С по ДСТУ 3760-98 (ΔC_c – граничне відхилення вмісту вуглецю в заготовках одного злитку; $C_{п_мін}$, $C_{п_макс}$ – мінімальний і максимальний вміст вуглецю):

1 і 2 – області варіацій робочої точки сталого режиму охолодження заготовок однієї плавки в площині $C_{\%}, t_{\text{см}}^0$ в наслідок нерівномірного охолодження прокату по довжині ($\Delta t_{\text{см}}=50$ °C) і коливань вмісту вуглецю в заготовках одного злитка ($\Delta C_c=0,02\%$ – область 1; $\Delta C_c=0,1\%$ – область 2)

З рис.7.2 видно, що границі нерівностей (7.7-7.10) проходять практично паралельно, тобто співвідношення $\sigma_B/\sigma_T/\delta_{5(10)}$ для сталі однієї марки (групи марок) при одній технологічній схемі термозміцнення залишаються приблизно постійними. Це дозволяє при аналізі напрямків підвищення точності настроювання режиму термозміцнення замість системи нерівностей (7.1-7.3) розглядати одне з нерівностей:

$$\sigma_{T_min} \leq \sigma_T \leq \sigma_{T_max} , \quad (7.16)$$

або

$$\sigma_{B_min} \leq \sigma_B \leq \sigma_{B_max} , \quad (7.17)$$

або

$$\delta_{5(10)_min} \leq \delta_{5(10)} \leq \delta_{5(10)_max} , \quad (7.18)$$

де $\sigma_{T_min} \geq \sigma_{T_min_H}$, $\sigma_{B_min} \geq \sigma_{B_min_H}$, $\sigma_{B_max} \leq \sigma_{B_max_H}$, $\delta_{5(10)_min} \geq \delta_{5(10)_min_H}$, а

точні границі нерівностей (7.16-7.18) при відомих співвідношеннях, наприклад,

$k_{\sigma_B/\sigma_T} = (\sigma_B/\sigma_T)_{C_{2_6}, t_{cm_6}^0}$ і $k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}} = (\sigma_B/\delta_{5(10)})_{C_{2_6}, t_{cm_6}^0}$, можуть бути визначені як:

$$\sigma_{T_min} \equiv \sup(\sigma_{T_min_H}, \sigma_{B_min_H}/k_{\sigma_B/\sigma_T}), \quad (7.19)$$

$$\sigma_{T_max} \equiv \inf(\sigma_{B_max_H}/k_{\sigma_B/\sigma_T}, \delta_{5(10)_min_H} \cdot (k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}}/k_{\sigma_B/\sigma_T})), \quad (7.20)$$

$$\sigma_{B_min} \equiv \sup(\sigma_{B_min_H}, \sigma_{T_min_H} \cdot k_{\sigma_B/\sigma_T}), \quad (7.21)$$

$$\sigma_{B_max} \equiv \inf(\sigma_{B_max_H}, \delta_{5(10)_min_H} \cdot k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}}), \quad (7.22)$$

$$\delta_{5(10)_min} \equiv \sup(\delta_{5(10)_min_H}, \sigma_{B_max_H}/k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}}), \quad (7.23)$$

$$\delta_{5(10)_max} \equiv \inf(\sigma_{B_min_H}/k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}}, \sigma_{T_min_H} \cdot (k_{\sigma_B/\sigma_T}/k_{\sigma_B/\delta_{5(10)}})). \quad (7.24)$$

З рис.7.2 також видно, що загальна задача настроювання процесу термозміцнення повинна вирішуватися в двох напрямках – у забезпеченні більш рівномірного охолодження прокату по його довжині й у виборі такої базової робочої точки, при якій область її варіацій завжди знаходилася би усередині області припустимих робочих режимів. Тобто, по-перше, у стабілізації швидкості руху прокату через охолоджувальні пристрої і, по-друге, у виборі такого режиму охолодження, при якому імовірність виходу

механічних властивостей за область припустимих значень, при поточному розкиді хімічного складу сталі й умов охолодження, була б мінімальною.

Перший напрямок припускає контроль охолодження прокату по довжині заготовки, а другий – як оцінку розкиду хімічного складу заготовки в злитках однієї плавки, так і корекцію режиму термозміцнення при переході до прокатки нової плавки таким чином, щоб механічні властивості прокату залишилися незмінними.

Основним вимірюваним параметром, використовуваним на більшості сучасних станів для контролю охолодження прокату, є температура його поверхні після установки примусового охолодження. Дана температура, як правило, контролюється на холодильнику – після її вирівнювання по перетину прокату [102]. При цьому, пірометр візується на прокат, що лежить у другому-третьому рихтувальному жолобі холодильника. У цьому випадку температура поверхні прокату практично відповідає його середньомасовій температурі – температурі основних фазових перетворень, що безпосередньо визначає механічні властивості товарного прокату.

Температура прокату на холодильнику контролюється в одній точці, що не дозволяє оцінити рівномірність охолодження прокату по його довжині. При прокатці профілерозмірів невеликих перетинів технічно складно забезпечити точність візування пірометра на прокат і, отже, достовірність виміру. На двониткових станах проблема контролю середньомасової температури збільшується складностями з розміщенням і важкими умовами експлуатації засобів контролю на холодильнику.

Існують варіанти контролю температури термозміцненого прокату перед холодильником. Таке розміщення пірометра дозволяє оцінити рівномірність охолодження прокату по його довжині. Однак, у цьому випадку вирівнювання температури прокату, як правило, не завершено, і температура поверхні залежить не тільки від середньомасової температури прокату, але й від відстані пірометра від останньої секції охолодження, швидкості прокатки, температури охолоджувальної води і від інших факторів. Тобто, при такому розміщенні

пірометра немає однозначної відповідності між обмірюваною температурою поверхні прокату і його середньомасової температурою.

Більш об'єктивна інформація про рівномірність охолодження прокату по його довжині може бути отримана з використанням засобів електромагнітного контролю кількості магнітної фази (товщини мартенситного шару) у прокаті, які встановлюються безпосередньо на виході установки примусового охолодження [141,42].

Відносна площа мартенситного шару в перетині прокату – s_m , зв'язана з температурою прокату і вмістом у ньому вуглецю залежністю (5.54):

$$s_m \approx \frac{486 - t_{пв} - 477 \cdot C_{\%}}{2 \cdot (t_{см} - t_{пв})}, \quad (7.25)$$

де $t_{пв}$ – температура поверхні прокату на виході установки термозміцнення.

Оскільки температура поверхні прокату на виході установки термозміцнення визначається, в основному, температурою охолоджувальної води (див. [48]), то при сталих умовах виробництва прокату (7.25) можна записати у виді:

$$s_m \approx A \cdot \frac{B - C_{\%}}{t_{см} - G}, \quad (7.26)$$

де A , B , G – постійні позитивні коефіцієнти, або, розкладаючи (7.26) у ряд Тейлора:

$$s_m \approx s_{m_{\bar{b}}} - A \cdot \frac{B - C_{\%_{\bar{b}}}}{(t_{см_{\bar{b}}} - G)^2} \cdot (t_{см} - t_{см_{\bar{b}}}) - \frac{A}{t_{см_{\bar{b}}} - G} \cdot (C_{\%} - C_{\%_{\bar{b}}}), \quad (7.27)$$

або

$$\Delta s_m = -k_{t_{см}}^{s_m} \cdot \Delta t_{см} - k_{C_{\%}}^{s_m} \cdot \Delta C_{\%}. \quad (7.28)$$

Зміна вмісту хімічних елементів по висоті злитка носить досить плавний характер. Тому зміна кількості магнітної фази в прокаті по довжині однієї заготовки характеризує, в основному, нерівномірність охолодженні прокату по його довжині.

Вибравши в якості базових значення відповідних величин математичні очікування (М.О.) цих величин для однієї, i -ої, заготовки (під М.О. тут і далі розуміється середнє значення по аналізованій вибірці):

$$C_{\%_{\bar{b}}} = C_{\%_{\bar{b}(i)}} = M_{z(i)}[C_{\%}] \quad , \quad t_{\text{см}_{\bar{b}}} = t_{\text{см}_{\bar{b}(i)}} = M_{z(i)}[t_{\text{см}}] \quad , \quad s_{\text{м}_{\bar{b}}} = s_{\text{м}_{\bar{b}(i)}} = M_{z(i)}[s_{\text{м}}] \quad ,$$

отримаємо для прокату i -ої заготовки $C_{\%(i)} - C_{\%_{\bar{b}(i)}} \approx 0$ і

$$\Delta s_{\text{м}(i)} \approx -k_{t_{\text{см}}}^{s_{\text{м}}} \cdot \Delta t_{\text{см}(i)} \quad . \quad (7.29)$$

Тобто, для кожної заготовки відхилення кількості магнітної фази від її М.О. по довжині прокату обернено пропорційно відхиленню середньомасової температури від її М.О.

Таким чином, домагаючись $\max|\Delta s_{\text{м}(i)}| \Rightarrow \min$, можна забезпечити рівномірність охолодження прокату по його довжині.

Нерівномірність руху прокату через охолоджувальні пристрої викликається двома основними причинами: ефектом гідротранспортування прутка прокату в пристрої і його прискоренні на рольгангу холодильника, що підводить. Тому нерівномірність охолодження прокату по довжині найбільш виражена на кінцевій ділянці заготовки після виходу прокату з випускної кліті – на довжині прокату, рівної відстані від випускної кліті до виходу з установки термозміцнення. Прискорення прокату викликає плавне підвищення середньомасової температури прокату на даній ділянці і, відповідно, падіння кількості магнітної фази в його перетині.

Для зменшення прискорення прокату необхідно домагатися мінімально можливого перевищення швидкості рольганга холодильника, що підводить, над швидкістю прокатки, насамперед для секцій, розташованих безпосередньо за установкою термозміцнення, а тиск води в останній(их) секції(ях) установки термозміцнення бажано підтримувати на мінімально припустимому, за умовами безаварійного проходження передньої ділянки прокату, рівні.

Електромагнітний контроль кількості магнітної фази в прокаті дозволяє також оцінити розкид хімічного складу заготовок у злитку (плавці).

Для i -ої заготовки справедливо

$$M_{3(i)}[\Delta s_M] = -k_{t_{cm}}^{s_M} \cdot M_{3(i)}[\Delta t_{cm}] - k_{C\%}^{s_M} \cdot M_{3(i)}[\Delta C\%]. \quad (7.30)$$

Виберемо в якості базових значення відповідних величин М.О. цих величин для всіх заготовок одного, k -го, злитка: $C_{\%_б} = M_c[C\%]$, $t_{cm_б} = M_c[t_{cm}]$, $s_{M_б} = M_c[s_M]$.

Тоді з (7.30) випливає:

$$\begin{aligned} M_{3(i)}[s_M] - M_c[s_M] = \\ = -k_{t_{cm}}^{s_M} \cdot M_{3(i)}[t_{cm}] + k_{t_{cm}}^{s_M} \cdot M_c[t_{cm}] - k_{C\%}^{s_M} \cdot M_{3(i)}[C\%] + k_{C\%}^{s_M} \cdot M_c[C\%]. \end{aligned} \quad (7.31)$$

При незмінному режимі термозміцнення для заготовок одного злитка маємо $M_{3(i)}[t_{cm}] \approx M_c[t_{cm}]$ і тоді:

$$M_{3(i)}[s_M] - M_c[s_M] \approx -k_{C\%}^{s_M} \cdot M_{3(i)}[C\%] + k_{C\%}^{s_M} \cdot M_c[C\%], \quad (7.32)$$

тобто відхилення М.О. кількості магнітної фази в окремій заготовці злитку від її М.О. для всіх заготовок злитку обернено пропорційно відхиленню М.О. вмісту вуглецю (вуглецевого еквіваленту) у заготовці від М.О. вмістові вуглецю у злитку.

Оскільки М.О. вмісту вуглецю у злитку відповідає вмістові вуглецю в плавці ($M_c[C\%] \approx M_{п}[C\%] = C_{п}$), то за результатами електромагнітного контролю заготовок попереднього злитку можна судити про поточне відхилення хімічного складу термозміцненої заготовки від плавочного хімічного складу.

Таким чином, електромагнітний контроль магнітної фази в прокаті на виході установки термозміцнення дозволяє оцінити область варіацій робочої точки сталого режиму примусового охолодження заготовок однієї плавки в площині $C\%$, t_{cm}^0 через нерівномірне охолодження прокату по довжині і коливань вмісту вуглецю в заготовках одного злитку, плавки.

Виберемо в якості базових довільні значення $C_{\%_б}$, $t_{cm_б}$ і $s_{M_б}$ з області робочих значень, характерних для виробництва арматурного прокату даного класу по механічних властивостях з даної групи сталей. Для М.О. величин, що входять у (7.28), по вибірці злитка маємо:

$$M_c[s_M] = -k_{t_{CM}}^{s_M} \cdot M_c[t_{CM}] + k_{t_{CM}}^{s_M} \cdot t_{CM_б} + s_{M_б} - k_{C\%}^{s_M} \cdot M_c[C\%] + k_{C\%}^{s_M} \cdot C\%_{_б}, \quad (7.33)$$

або

$$M_c[s_M] = -k_{t_{CM}}^{s_M} \cdot M_c[t_{CM}] + D_{\Pi},$$

де $D_{\Pi} = k_{t_{CM}}^{s_M} \cdot t_{CM_б} + s_{M_б} - k_{C\%}^{s_M} \cdot C_{\Pi} + k_{C\%}^{s_M} \cdot C\%_{_б}$ – постійна для даної плавки величина.

Тоді $M_c[s_M]$ обернено пропорційно М.О. середньомасової температури прокату заготовок одного злитка, що дозволяє, при відомій величині C_{Π} , оцінити положення області варіацій робочої точки постійного режиму примусового охолодження заготовок однієї плавки в площині $C\%, t_{CM}^0$.

Якщо ж, прив'язати результати механічних іспитів проби до результатів електромагнітного контролю відповідної ділянки прокату, то можна оцінити і можливу область варіацій механічних властивостей термозміщеного прокату.

7.3 Технічне забезпечення електромагнітного контролю магнітної фази в прокаті на виході установки термозміщення

Контроль кількості магнітної фази в прокаті здійснюється індикатором магнітної фази (ІМФ). Використовуваний у приладі принцип контролю запропонований Інститутом чорної металургії [60, 137]. Він є більш прийнятним, у порівнянні з описаним у [119], по сукупності таких параметрів, як селективність і повнота контролю феромагнітної фази по перетину прокату, можливість одержання додаткової інформації про процес, низьке енергоспоживання і ряду інших.

Перші зразки технічних засобів ІМФ були розроблені Інститутом чорної металургії і „Нииачерметом”, а останні зразки – у Національному гірничому університеті.

ІМФ (рис.7.3) складається з прохідного індукційного датчика (датчика магнітної фази - надалі ДМФ), розташованого безпосередньо за останньою секцією установки термозміщення УТЗ, і контролера магнітної фази (КМФ), розташованого на посту управління або у приміщенні АСУ ТП стану. До

КМФ підключають ПЕОМ і/або індикатори і реєструючі прилади.

Датчик магнітної фази – прохідний, обладнаний двома магнітними системами – намагнічування (СН) і електромагнітного зчитування (СЕЗ). СН живиться від КМФ і намагнічує прокат, що проходить крізь ДМФ, імпульсним магнітним полем. Величина намагніченості прокату зчитується СЕЗ, на виході якої виникає Е.Д.С., пропорційна кількості феромагнітних структур у перетині прокату, що утворюються в процесі його прискореного охолодження. Конструктивні параметри датчика вибираються таким чином, щоб забезпечити високу чутливість, стабільність контролю кількості феромагнітних структур у всьому діапазоні сортаменту і швидкостей прокатки конкретного стану.

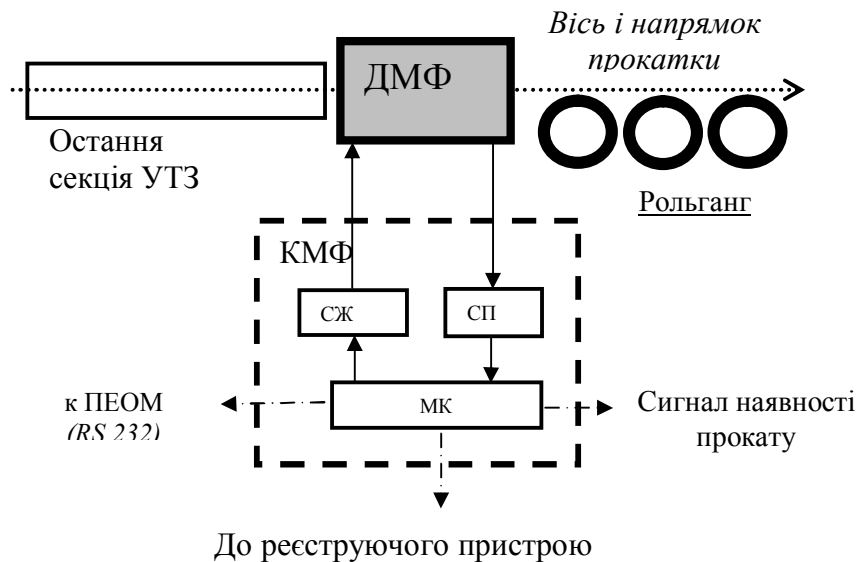


Рисунок 7.3 – Структурна схема індикатора магнітної фази
ДМФ – датчик магнітної фази; **КМФ** – контролер магнітної фази;
СЖ – схема живлення системи намагнічування; **СП** – схема підсилення; **МК** – модуль контролера

Датчик магнітної фази встановлюється наприкінці короба останньої секції примусового охолодження за охолоджувальними трубами. Перед входом у датчик і на його виході встановлені направляючі конусні втулки для утримання прокату на вісі датчика і запобігання внутрішнього зносу його труби

7.4 Оцінка енергозбереження при автоматичному управлінні процесом термозміцнення арматурного прокату

Використання системи контролю і управління процесом термозміцнення арматурної сталі на основі контролю величини магнітної фази дозволяє зменшити розкид середньомасової температури прокату при коливаннях плавочного хімічного складу сталі і його сегрегації по висоті злитка. Відповідно, підвищується стабільність механічних властивостей готової арматурної сталі, як у партії прокату, так і по довжині кожної заготовки.

При виробництві, наприклад, арматурного прокату класу А 500С, середньомасова температура може коливатися в діапазоні 500-600⁰С. Система контролю дозволяє підвищити середньомасову температуру на 50⁰С, що дозволить змістити в області допустимих режимів механічні властивості прокату убік нижньої границі. При цьому, витрати енергії на охолодження прокату знизяться за рахунок зменшення витрати охолоджувальної води, яка подається насосами високого тиску.

Гідравлічна потужність P_{Γ} потоку охолоджувальної води, що розвивається насосами установки примусового охолодження:

$$P_{\Gamma} = p \cdot q,$$

де p - тиск води; q - витрата води.

Усереднено по сортаменту арматурної сталі від №12 до №30 при виробництві, наприклад, арматури класу А500С можна прийняти:

$$p = 1, \text{МПа} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \quad q = 300 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

$$\text{Тоді } P_{\Gamma} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 300 \cdot \frac{1}{3600} = 125 \text{кВт}.$$

При охолодженні прокату від температури кінця прокатки 1050⁰С до середньомасової 550⁰С, перепад складає $\Delta T = 500^0 \text{С}$. Передбачуване підвищення середньомасової температури на 50⁰С складає 10% цього перепаду.

Прийнявши допущення, що зменшення потужності потоку води в робочому діапазоні охолодження пропорційно збільшенню середньомасової температури прокату, одержимо зменшення потрібної потужності насосів:

$$\Delta P_{\Gamma} = 125 \cdot 0,1 = 12,5 \text{кВт}.$$

Для двох ниток стану зменшення потужності складе $\Delta P_{\Gamma} = 25 \text{кВт}$.

Для дрібносортих станів по нормативу кількість робочих годин складає 8000 у рік, отже, річне зменшення витрат енергії на охолодження складе для стану:

$$25 \cdot 8000 = 200000 \text{кВт} \cdot \text{год}$$

За даними на кінець 2011 року відпускна ціна на електроенергію складає 0,852 грн за 1 кВт·год.

Таким чином, річна економія витрат на споживану насосами електроенергію складе:

$$200000 \cdot 0,852 \cong 170000 \text{грн}$$

8 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО ВИБОРУ РЕЖИМУ РОЗКРОЮ ПРОКАТУ

Методика вибору режиму розкрою прокату є, насамперед, методикою вибору розкрійного плану, що забезпечує максимум критерію (3.37). Однак, між операцією розкрою і кінцевими товарними якістьми прокату, що входять у (3.37), лежить низка операцій, як-то: укладання прутків прокату на настил холодильника, формування пакетів прутків, розрізання пакетів прутків на пачки стрижнів з наступним формуванням з пачок стрижнів, що утворюються після порізани пакету прутків, пачок товарних стрижнів.

Тому, по-перше, потрібно визначити з методикою вибору оптимальних режимів управління для цієї всієї низки операцій, а, по-друге, перейти від техніко-економічного критерію (3.37) до технічного критерію (технічних критеріїв), що дозволяють вирішувати задачу оптимізації управління виробництвом прокату у стрижнях.

8.1 Методика оптимізації розкрою прокату як потокового однолінійного процесу

8.1.1 Аналіз особливостей оптимізації потокового лінійного технологічного процесу

Багатоопераційні потокові технологічні процеси характеризуються послідовним перетворенням вихідної сировини, що визначається вектором параметрів \bar{X} , у кінцеву продукцію, що визначається вектором параметрів \bar{Y} :

$$\bar{Y} = F(\bar{X}).$$

Кожне з перетворень здійснюється i -ю операцією або групою операцій і характеризується вектором параметрів вихідного продукту \bar{Z}_n і вектором параметрів кінцевого продукту \bar{Z}_k :

$$\bar{Z}_{k,i} = f(\bar{Z}_{n,i}).$$

Для двох послідовних операцій маємо:

$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_{k,i} = \bar{Z}_{n,i+1} \tag{8.1}$$

і, відповідно, для перших і останньої, n -ї, операцій:

$$\bar{Z}_0 = \bar{X} ;$$

$$\bar{Z}_n = \bar{Y} .$$

Підхід до оптимального управління будь-якого об'єкта базується на двох основних компонентах: моделі об'єкта і критерії оптимізації.

Моделі об'єктів багатоопераційних потокових технологічних процесів обмежують область рішення задач оптимального управління окремими операціями або групами операцій, що здійснюють перетворення продукту.

Не менш складно обстоїть питання з другим компонентом задачі оптимізації – критерієм оптимізації. Обґрунтування вибору критерію оптимізації знаходиться поза рамками теорії оптимальних систем, і цією теорією не обговорюється [124]. Такий вибір базується на розумінні загальних цілей дослідження, знань конкретної виробничої обстановки і техніко-економічних умов [79,124], тобто носить досить суб'єктивний характер.

Об'єктивні оцінки ефективності виробничої системи ґрунтуються на економічних критеріях [30,79,90]. Зокрема [46], як критерій ефективності завершеного технологічного процесу може бути прийнятий критерій Q виду:

$$Q = C - M - Z \Rightarrow \max , \quad (8.2)$$

де C – ціна продукції; M – питомі витрати на вихідну сировину (на одиницю продукції), Z – питомі витрати на виробництво готової продукції (без витрат на вихідну сировину).

Безпосередньо використовувати критерій (8.2) для оптимізації не можна, тому що він у явному виді не містить у собі параметри, що характеризують технологічний об'єкт.

Для питомих витрат на вихідну сировину M і ціни кінцевого продукту C такий зв'язок очевидний через вектор параметрів сировини \bar{X} і вектор параметрів продукції \bar{Y} , тобто:

$$M = M(\bar{X}) ; \quad (8.3)$$

$$C = C(\bar{Y}) \quad (8.4)$$

У свою чергу, у загальному випадку витрати на виробництво продукції зв'язані з векторами станів робочого тіла $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$, вектором стану об'єкта \bar{S} , вектором управління \bar{U} і часом перетворення вихідної сировини в кінцеву продукцію t :

$$Z = Z(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{S}, \bar{U}, t) . \quad (8.5)$$

Однак задача висновку аналітичного вираження (8.5) не менш складна, ніж одержання узагальненої моделі технологічного процесу. Істотно полегшується задача одержання аналітичної залежності виду (8.5) для окремої операції (групи операцій):

$$Z_i = Z_i(\bar{Z}_{n,i}, \bar{Z}_{k,i}, \bar{S}_i, \bar{U}_i, t) . \quad (8.6)$$

Залежність виду (8.6) може бути встановлена або безпосередньо по робочих характеристиках агрегатів, або отримана в процесі дослідження технологічного процесу, наприклад, за методикою, запропонованою в [98].

Одним з напрямків рішення задачі оптимального управління багатоопераційними потоковими технологічними процесами – перехід від задачі оптимального управління процесом в цілому до взаємозалежних задач оптимального управління окремими операціями. Такий перехід можливий, якщо будуть отримані обґрунтовані залежності виду (8.3,8.4) щодо векторів стану продукту до і після окремої операції (групи операцій), що здійснюють кінцеве перетворення продукту.

Розглянемо один з можливих підходів до рішення задач даного типу.

8.1.2 Постановка задачі оптимізації потокового лінійного технологічного процесу

Маємо багатоопераційний потоковий технологічний процес (рис.8.1), що складається з ряду послідовних операцій так, що виконується рівняння (8.1).

Кожна з операцій описується оператором об'єкта $F_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i, \bar{S}_i, \bar{U}_i, t)$ та оператором витрат $Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i, \bar{S}_i, \bar{U}_i, t)$. Відомі також залежності (8.3,8.4), що

зв'язують як вартість сировини, так і ціну кінцевого продукту з їхніми векторами параметрів.

Необхідно знайти таку траєкторію перетворення продукту з початкового стану \bar{X} в кінцевий стан \bar{Y} , щоб функціонал (8.2) приймав би максимально можливе значення.

8.1.3 Методи рішення задачі оптимізації потокового лінійного технологічного процесу

Розглянемо довільну i -ту операцію. Будемо вирішувати задачу перетворення продукту з вектором стану \bar{Z}_{i-1} в продукт із вектором стану \bar{Z}_i так, щоб:

$$Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i, \bar{S}_i, \bar{U}_i, t) \Rightarrow \min . \quad (8.7)$$

Усі вихідні дані для рішення даної оптимізаційної задачі маються.

Припустимо, що рішення кожної такої приватної задачі існує, тому що в протилежному випадку загальна задача оптимізації тим більше не має рішення.

Отже, для кожної пари елементів безлічей \bar{Z}_{i-1} , \bar{Z}_i рішенням може бути визначений і поставлений у відповідності один елемент безлічі $Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i)$ такий, що задовольняє умові (8.7), або дана задача не має рішення в силу обмежень, що накладаються на об'єкт управління. В останньому випадку будемо приймати:

$$Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i) = \infty .$$

Наступним етапом рішення є прив'язка параметрів стану продукту до вартісних показників, наприклад, кінцевого продукту.

Таку прив'язку здійснимо шляхом підсумовування вартості кінцевого продукту з витратами на перетворення в останній (n -й) операції:

$$Q_{n,n}(\bar{Z}_{n-1}, \bar{Y}) = C(\bar{Y}) - Z_n(\bar{Z}_{n-1}, \bar{Y}) . \quad (8.8)$$

Для $n-1$ -ї операції будемо мати:

$$Q_{n-1,n}(\bar{Z}_{n-2}, \bar{Y}) = Q_{n,n} - Z_{n-1}(\bar{Z}_{n-2}, \bar{Z}_{n-1}) , \quad (8.9)$$

а для i -ї операції, відповідно:

$$Q_{i,n}(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Y}) = Q_{i+1,n} - Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i) . \quad (8.10)$$

У кінцевому випадку маємо:

$$Q_{1,n}(\bar{X}, \bar{Y}) = Q_{2,n} - Z_1(\bar{X}, \bar{Z}_1) . \quad (8.11)$$

Підстановка (8.11) і (8.3) у (8.2) дає нам функціонал максимуму глобального критерію оптимізації технологічного процесу:

$$Q_{\max}(\bar{X}, \bar{Y}) = Q_{1,n}(\bar{X}, \bar{Y}) - M(\bar{X}) . \quad (8.12)$$

Оскільки оптимальна траєкторія перетворення продукту зі стану, що визначається вектором \bar{Z}_{i-1} , у стан, що визначається вектором \bar{Z}_i , нам відома, то задача оптимізації технологічного процесу зводиться до визначення оптимальних векторів проміжних станів продукту при заданих векторах \bar{X} і \bar{Y} .

Визначення оптимальних проміжних станів будемо здійснювати, починаючи з першої операції, шляхом перебору безлічі значень функціонала максимуму проміжного критерію оптимізації, виходячи з умови:

$$\left(Q_{i+1,i}(\bar{Z}_i, \bar{Y}) \Rightarrow \max \right) \wedge \left(Z_i(\bar{Z}_{i-1}, \bar{Z}_i) \neq \infty \right), \quad (8.13)$$

при заданому векторі \bar{Z}_{i-1} .

Перша умова в (8.13) є умовою існування оптимальної траєкторії перетворення продукту зі стану, що визначається вектором \bar{Z}_{i-1} , у стан, що визначається вектором \bar{Z}_i , а друга дає мінімум витрат на такі перетворення при існуванні оптимальної траєкторії наступного перетворення продукту зі стану \bar{Z}_i в кінцевий продукт із вектором стану \bar{Y} .

Таким чином, заключний етап рішення задачі оптимізації багатоопераційних поточкових технологічних процесів зводиться до визначення елементів безлічей $Q_{i,n}$ $i = 1 \dots n$, що задовольняють умові (8.13).

При наявності двох і більш елементів, що задовольняють умові (8.13), може бути проведене пророблення альтернативних варіантів перетворення

продукту або обраний варіант, для якого \bar{Z}_i найбільш близький до розрахункових характеристик кінцевого продукту для даної операції.

Очевидні варіації умов оптимізації, таких як завдання окремих параметрів векторів вихідної сировини $\bar{X} \in \bar{X}' \subset \bar{X}$ і кінцевої продукції $\bar{Y} \in \bar{Y}' \subset \bar{Y}$, припускають додатковий перебір безлічі Q_{\max} на підмножинах \bar{X}' , \bar{Y}' безлічей \bar{X} , \bar{Y} усіх можливих значень векторів \bar{X} і \bar{Y} , відповідно, і визначення елементів цих безлічей \bar{X}' і \bar{Y}' для яких:

$$Q_{\max}(\bar{X}', \bar{Y}') = \max\{Q'_{\max}\}, \quad (8.14)$$

де Q'_{\max} – підмножина безлічі Q_{\max} ($Q'_{\max} \subset Q_{\max}$), визначене на підмножинах \bar{X}' і \bar{Y}' .

8.1.4 Результати рішення задачі оптимізації потокового лінійного технологічного процесу

Результатом рішення задачі оптимізації в загальному виді є:

- безлічі значень глобального критерію оптимізації багатоопераційного потокового технологічного процесу Q_{\max} $i = 1 \dots n$ як функція елементів безлічей стану вихідної сировини \bar{X} і кінцевого продукту \bar{Y} в області їхніх припустимих значень;
- безлічі проміжних критеріїв оптимізації операцій Q_i як функція елементів безлічей стану вихідного продукту \bar{Z}_{i-1} і кінцевого продукту \bar{Y} ;
- безлічі витрат на оптимальне перетворення продукту \bar{Z}_i $i = 1 \dots n$ в процесі i -ої операції як функцію елементів безлічі параметрів продукту перед i -ої операцією \bar{Z}_{i-1} і після неї \bar{Z}_i .

Дані результати дозволяють визначити оптимальні проміжні стани продукту \bar{Z}_i $i = 1 \dots n$ для будь-якої пари векторів \bar{X} і \bar{Y} .

При завданні областей припустимих значень векторів $\bar{X}' \subset \bar{X}$ і $\bar{Y}' \subset \bar{Y}$ запропонована методика забезпечує також вибір оптимальних параметрів як сировини (вектор \bar{X}), так і кінцевого продукту (вектор \bar{Y}).

Досвід використання запропонованого підходу для оптимізації управління конкретними технологічними процесами [44,148] показав доцільність її модифікації. Зокрема, сполучення рішення задачі оптимального перетворення продукту з обґрунтуванням приватного критерію оптимізації для попередньої операції найчастіше, як у [44], дозволяє обґрунтувати критерії оптимізації для кожної операції.

У результаті ми маємо систему взаємозалежних критеріїв оптимізації для кожної операції (групи операцій) і технологічного процесу в цілому, що забезпечує оптимізацію всього технологічного процесу при оптимізації кожної з операцій відповідно до її приватного критерію.

8.2 Формування технічних критеріїв оптимізації управління розкромом прокату

Формування пачок товарних стрижнів здійснюється на стадії збирання й обробки і має два відділення обробки прокату. Пачки стрижнів, що містять товарний прокат зі стрижнями однієї сортності по довжині, направляють безпосередньо на обв'язку й упакування, а пачки, що містять прокат з різносортними товарними довжинами стрижнів, піддають додатково сортуванню. Очевидно, що сортування пачок стрижнів вимагає додаткових витрат.

Стратегія управління на стадії збирання й обробки полягає у виборі маршруту обробки окремих пачок і правил комбінування вихідних пачок прутків у партії товарної продукції.

Пошук оптимальної стратегії управління на стадії збирання й обробки визначимо, спираючись на принцип оптимальності, сформульований Р. Беллманом [8]: оптимальне поводження має таку властивість, що, якими б ні були первісний стан і рішення в початковий момент, наступні рішення повинні складати оптимальне поводження щодо стану, що настає у результаті першого рішення.

Тому операцію формування пачок товарної продукції можна розглядати як поділ стрижнів по групах довжин з наступним комбінуванням їх у пачки з визначеними довжинами стрижнів у пачках. І для останньої операції зовсім не важливо, чи пройшли стрижні попередньо сортування або надійшли в пачках безпосередньо з приймальних карманів рольганга холодильника, що відводить, безпосередньо після операції збирання.

Стратегія управління комбінуванням стрижнів у пачки є залежною від того, відповідно до якого стандарту виконується поточне замовлення.

При виробництві стрижневого арматурного прокату у відповідності зі стандартом України ДСТУ 3760-98 можна виділити три основні групи довжин стрижнів:

- мірна довжина стрижнів – довжина, задана умовами замовлення;
- немірна довжина стрижнів – стрижні довжиною від 6м до 12м;
- короткі стрижні довжиною менш 6 м.

Перші дві групи є товарними, а третя поєднує стрижні некондиційної довжини.

У стандарті зазначені рекомендовані довжини стрижнів мірного прокату – від 6м до 12м, тобто пачки стрижнів немірної довжини можуть містити в собі і стрижні мірної довжини, але в цьому випадку такі стрижні вважаються все одно немірним прокатом.

Очевидно, що включення в немірний прокат стрижнів мірної довжини може мати місце, якщо пачка стрижнів надходить на обв'язку безпосередньо після операції збирання готового прокату – минаючи операцію сортування. Така пачка не повинна мати коротких стрижнів, адже, у протилежному випадку, вона зобов'язана бути відправлена на сортування для відділення товарної продукції від некондиційного прокату.

Таким чином, при виробництві стрижневого арматурного прокату у відповідності зі стандартом України ДСТУ 3760-98 задача оптимального шляху обробки пачки стрижнів має місце тільки для пачок з довжинами стрижнів від 6м до 12м, що мають у своєму складі стрижні мірної довжини.

Якщо така пачка не піддавалася сортуванню, то критерій (3.37) для неї запишеться у виді:

$$Q_{\text{hc}} = -\frac{D_{\text{н}}}{\Pi_{\text{м}}} \cdot (g_{\text{н}} + g_{\text{м}}) = -\frac{D_{\text{н}}}{\Pi_{\text{м}}},$$

а, у протилежному випадку:

$$Q_{\text{с}} = g_{\text{м}} - \frac{D_{\text{н}}}{\Pi_{\text{м}}} \cdot g_{\text{н}} - \frac{3_{\text{с}}}{\Pi_{\text{м}}}.$$

Тоді умова доцільності напрямку пачки стрижнів на сортування запишеться як $Q_{\text{с}} > Q_{\text{hc}}$ або, після розкриття і перетворення цієї нерівності:

$$g_{\text{м}} \cdot \left(1 + \frac{D_{\text{н}}}{\Pi_{\text{м}}}\right) > \frac{3_{\text{с}}}{\Pi_{\text{м}}}. \quad (8.15)$$

Проаналізуємо тепер умову (8.15).

На сучасний момент приплата до ціни за мірність продукції складає 17% від ціни немірного прокату, що, зрозуміло, вище собівартості. Як видно з рис.3.2, усі витрати на виробництво арматурного прокату за винятком вартості вихідної заготовки не перевищують 8% вартості заготовки. А це означає, що чисельне значення вираження в правій частині (8.15) досить близько до нуля. Тоді умова (8.15) виконується завжди, а це означає, що всі пачки, що містять як стрижні мірної довжини, так і стрижні інших довжин, повинні піддаватися сортуванню.

У результаті ми одержуємо оптимальні стратегії обробки пачок стрижнів на стадії обробки і збирання, представлені на рис.8.1.

Очевидно, що, у силу відносної малості витрат на сортування пачок стрижнів, критерій (3.37) для пачок стрижнів, що надходять на ділянку збирання, може бути переписаний у виді:

$$Q = g_{\text{м}} - \frac{D_{\text{н}}}{\Pi_{\text{м}}} \cdot g_{\text{н}} - \frac{(C_{\text{н}} - C_{\text{к}})}{\Pi_{\text{м}}} \cdot g_{\text{к}} \Rightarrow \max. \quad (8.16)$$

Однак, безпосередньо використовувати критерій (8.16) для визначення оптимальної стратегії управління операцією порізки пакета прутків на пачки стрижнів – заключної операції стадії виробництва прокату – важко, оскільки він

абстрагований від результатів порізки конкретного пакета прутків на стаціонарних ножицях холодильника. Для пакета прутків критерій (8.16) означає не що інше, як сумарну відносну вартість стрижнів, що містяться у всіх пачках, які викроюються з пакета прутків:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P B_{i,j} \cdot l_{i,j} \Rightarrow \max . \quad (8.17)$$

Тут N – кількість пачок стрижнів, що викроюються з пакета прутків; P – кількість прутків у пакеті; $l_{i,j}$ – довжина стрижня в i -й пачці, відокремленого від j -го прутка, а $B_{i,j}$ – його питома відносна ціна.

Для стрижня мірної довжини

$$B_m = 1 , \quad (8.18)$$

– немірної довжини:

$$B_n = -\frac{D_n}{\Pi_m} , \quad (8.19)$$

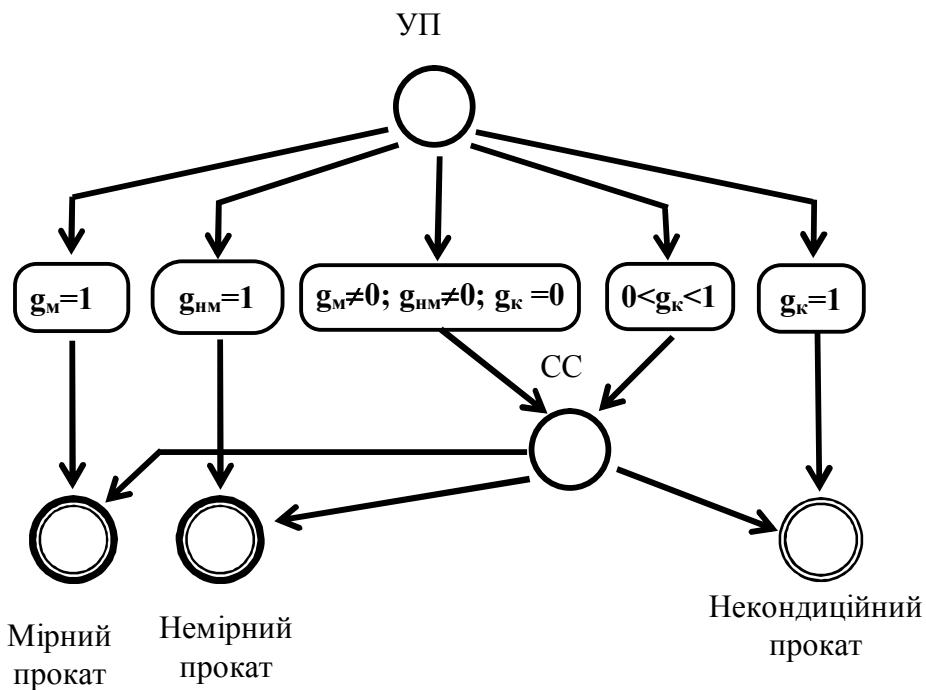


Рисунок 8.1 – Оптимальна стратегія обробки пачок стержнів на стадіях збирання і обробки

а для коротких стрижнів:

$$B_k = -\frac{(C_H - C_K)}{P_M} \quad (8.20)$$

При виробництві прокату відповідно до закордонних стандартів, що передбачають постачання тільки мірного прокату, критерій (8.17) прийме вид:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N l_M \cdot n_{M,i} \Rightarrow \max \quad (8.21)$$

де l_M – мірна довжина (за умовами замовлення); $n_{M,i}$ - кількість мірних стрижнів у i -ій пачці.

Критерій (8.21) вимагає забезпечити при розкрої пакета прутків на пачки стрижнів максимальну кількість стрижнів мірної довжини у всіх пачках, що викроюються з пакета. Цей критерій доцільно використовувати і при визначенні оптимальної стратегії розкрою пакета прутків на стаціонарних ножицях холодильника, і при виробництві прокату в стрижнях, оскільки дисконтні втрати при реалізації немірного прокату погано прогнозовані, а різниця в ціні на мірний і немірний прокат істотна.

Критерій (8.20) має на увазі, що процес сортування пакетів стрижнів не створює труднощів і затримок виробництва. Це твердження достатнє справедливо для сучасних станів, що передбачають масове виправлення стрижнів у потоці виробництва прокату [67], що дозволяє одночасно організувати і масове сортування стрижнів. Але і для цих станів варто враховувати, що правильні машини є вузьким місцем ад'юстажу, і ритмічність їхньої роботи найчастіше визначає продуктивність стану. Для вітчизняних же станів організація сортування пачок стрижнів є серйозною проблемою, як через відсутність відповідного устаткування, так і – місця для його розміщення. Вплив цієї проблеми на вибір стратегії управління операціями, що забезпечують одержання прокату в стрижнях, для її практичного використання, зокрема, стратегії управління порізкою прокату летучими ножицями, відзначається в роботі [31]. Проблема із сортуванням є актуальною,

насамперед, для пачок, що містять стрижні мірної довжини – стрижні необхідні для виконання поточного замовлення. Пачки ж, які не містять таких стрижнів, можуть бути вилючені з потоку виробництва для наступного сортування без збитку термінам виконання замовлень.

Формалізувати цю особливість вітчизняних станів можна, зажадавши, що б при розкрої пакета прутків максимальна кількість стрижнів мірної довжини була б у пачках, що містять стрижні тільки мірної довжини:

$$F = \sum_{i=1}^N (l_m \cdot n_{m,i}) \cdot I(g_{m,i} = 1) \Rightarrow \max ; \quad (8.22)$$

де $I()$ – індикатор події, у даному випадку – події присутності в пачці стрижнів тільки мірної довжини.

Таким чином, ефективність розкрою пакета прутків дрібносортового прокату можна охарактеризувати трьома основними критеріями – (8.17), (8.21) і (8.22), отже, задача оптимального управління операціями виробництва прокату в стрижнях є багатокритеріальною з очевидною пріоритетністю критеріїв. При наявності можливості масового сортування стрижнів прокату лексикографічна послідовність критеріїв має вигляд (8.21), (8.22), (8.17), а при відсутності – (8.22), (8.21), (8.17).

При обґрунтуванні критеріїв (8.17), (8.21) і (8.22) не приведений аналіз стратегії управління на ділянці збирання й обробки прокату при виробництві стрижневого арматурного прокату відповідно до ДСТ 10884-94, оскільки він цікавий тільки для тих країн СНД, де така товарна продукція, як мірний прокат із залишком, є предметом замовлення.

8.3 Оцінка енергозбереження при автоматизації розкрою прокату

Використання систем автоматизації процесу розкрою прокату й оптимізації розкрійних планів дозволяє підвищити вихід мірного прокату і знизити величину немірної обрізі.

Немірний прокат, що утворюється при розкрої, також реалізується як товарний (за меншою ціною) і тому енергетичні витрати на його виробництво входять у калькуляцію.

Економію енергетичних витрат при розкрої можна одержати тільки за рахунок зменшення немірної обрізі, тому що її обсяг не входить у загальний обсяг виробленого товарного прокату, на який складається калькуляція собівартості.

Оціночно, система автоматизації розкрою дозволить скоротити кількість немірної обрізі з 3% до 2%, що дасть економію перемінної частини енергетичних витрат (3%/т, див. п.6.5) на 1% (відносний), тобто на 0,03 %/т.

При собівартості арматурного прокату 5000грн./т (див. п.6.5) і річному обсязі виробництва дрібносортового стану 800 000 т, економія складе

$$5000 \cdot 0,03 \cdot 10^{-2} \cdot 800\,000 = 1\,200\,000 \text{ грн}$$

ВИСНОВКИ

Прокатні стани, що виробляють сортовий прокат, класифікуються у відповідності до продукції, яку вони виробляють, та за конструктивними особливостями станів.

Системний аналіз процесу виробництва сортового прокату встановив, що при всієї різноманітності типів станів та видів прокату, який на них виробляється, вони мають достатньо строгую послідовність технологічних операцій, що забезпечують потрібні властивості товарної продукції.

У вимогах стандартів та технічних умов щодо прокату нормують геометричні параметри його перетину, механічні властивості прокату та, при виробництві прокату у стрижнях, довжину стрижнів товарного прокату.

Якщо зіставити нормовані параметри прокату з процесом його виробництва, то можливо встановити взаємозв'язок між параметрами та групою операцій, які є визначальними для формування відповідного параметру.

Процес виробництва сортового прокату може бути зображено як послідовність операцій, які включають підготовку заготовки до прокатки – завантаження її у нагрівальну піч та нагрів до потрібної температури, обробка заготовки тиском – прокатка, що формує геометричні параметри перетину прокату, підохолодження (дроту, дрібносортового і, частково, середньосортного прокату) чи термозміцнення (арматурного прокату), що формує механічні властивості прокату, розрізання прокату на заказні довжини, що формує стрижні товарного прокату, чи змотування прокату у мотки (дротового прокату та на деяких станах дрібносортового і, частково, середньосортного круглого прокату).

Аналіз обсягів виробництва прокату на станах різних типів та їх продуктивності виявив, що на безперервних станах виробляють абсолютно більшу долю сортового прокату, ніж на станах всіх інших типів разом. Такі стани мають більш високу продуктивність. Сучасні сортопрокатні стани, як правило, безперервні.

Загальною ознакою безперервних станів є те, що прокатка заготовки здійснюється одночасно в декількох клітках, які розташовані послідовно. Ці

властивості стана, з одного боку, забезпечують їх високу продуктивність, а з іншого – завдають додаткові труднощі в настроюванні режиму безперервної прокатки і забезпеченні стабільних розмірів перетину прокату за його довжиною.

Тому подальші дослідження були зосереджені на процесах виробництва сортового прокату саме на безперервних станах.

Для оцінювання результатів виробництва сортового прокату була сформульована загальна система критеріїв. А саме:

1.Узагальненим технічним критерієм є одночасне і безумовне виконання багатопараметричного комплексу вимог до технічних характеристик готового прокату, які наведені у вітчизняних та міжнародних стандартах, технічних вимогах та в іншій нормативно-технічній документації щодо кожної одиниці сортаменту прокатної продукції.

При цьому визначаються такі параметри, як то: хімічний склад сталі, комплекс механічних та службових властивостей готового прокату, геометричні розміри перетину прокату, маса погонного метру та допуски на розміри в залежності від потрібного класу точності. Окремо обумовлюються параметри виготовлення готового прокату, як то: мірна довжина стрижнів, маса пакетів стрижнів, маса та розміри мотків сортового прокату або дроту.

Математичним виразом технічного критерію є система двох груп односторонніх та двосторонніх обмежень параметрів: перша група узагальнює параметри самого прокату, а друга група узагальнює взаємопов'язані параметри технологічного процесу, які обумовлюють виконання обмежень першої групи.

2.Узагальненим критерієм виконання замовлення є безумовна відповідність готового прокату усім вимогам замовлення не тільки у відношенні комплексу технічних і службових характеристик прокату та умов його пакування, але й, що не менш важливо, одночасне виконання обсягів та строків поставки прокату замовнику.

В теперішній час, з розвитком ринкових відносин, значної чинності набуває виконання вигідних термінових поставок малотоннажних партій прокату

різноманітного сортаменту. Це вимагає удосконалення технології та обладнання станів для швидкого та гнучкого реагування на такі вимоги.

Вираженням критерію виконання замовлення є показник допустимих економічних дисконтних втрат в разі невідповідності технічних характеристик готового прокату умовам замовлення і переведення партії прокату в інший клас або групу продукції.

3. Узагальненим економічним критерієм виробництва сортового прокату є мінімізація його собівартості. Для зменшення величини собівартості необхідно послідовно прикладати технічні та організаційні зусилля по скороченню її складових, як то: зменшенню вартості прокатної заготовки; економії енергоресурсів; скороченню непродуктивних втрат металу в процесі виробництва прокату; технічному і технологічному вдосконаленню процесу прокатки та його автоматизації для підвищення продуктивності; скороченню часу планових простоїв та ремонтів.

Математичним вираженням економічного критерію є рівняння мінімуму функціонала собівартості виробництва прокату в області варіювання параметрів, які його визначають. Цей узагальнений критерій може бути декомпозовано на групу критеріїв, кожний з яких мінімізує відповідну складову собівартості. Окремою складовою зниження собівартості може бути реалізація супутньої продукції меншої вартості, яка утворюється внаслідок особливостей технології виробництва основної замовленої продукції. До такої супутньої продукції можна віднести, наприклад, стрижні незамовленої довжини, які виникають при розкрій прокату на замовлену довжину; мотки прокату або дроту з невідповідною масою або розмірами; недокати після аварійної порізки, тощо.

В рамках цього критерію знаходиться і енергозаощаджувальна автоматизація технологічних процесів виробництва сортового прокату, засади якої розробляються в даній роботі.

Виходячи з узагальненої системи критеріїв для оцінювання результатів виробництва сортового прокату, системи критеріїв для оцінювання якості

управління окремими процесами виробництва сортового прокату розподіляються на основні та допоміжні, а кожен з цих критеріїв є відображенням відповідного критерію оцінювання результатів виробництва сортового прокату.

Відповідно до структури виробництва сортового прокату, було виділено три системи критеріїв, як-то: система критеріїв оцінювання якості управління швидкісним режимом прокатки, система критеріїв управління прискореним охолодженням (термозміцненням) прокату, система критеріїв управління виробництвом прокату у стрижнях.

На основі відображення узагальнених критеріїв для оцінювання якості управління окремими процесами виробництва сортового прокату на відповідні виробничі процеси були обґрунтовані наступні системи критеріїв для цих процесів.

Для управління швидкісним режимом прокатки основним критерієм є забезпечення стабільності поперечних розмірів прокату по його довжині – розмах змінної складової кожного з нормованих розмірів повинен лежати в межах розмаху відповідного поля допуску, що забезпечує виконання поточного замовлення. Додатковим критерієм управління швидкісним режимом прокатки, пов'язаним з точністю поперечних геометричних розмірів, є мінімум розкиду поперечних розмірів прокату по його довжині. Другим додатковим критерієм є мінімізація часу налаштування режиму безперервної прокатки, що задовольняє основному критерію, який мінімізує витрати часу, енергоресурсів і металу на його налаштування.

Для управління режимом прискореного охолодження (термозміцнення) основним критерієм є набуття механічних властивостей готового прокату відповідно до вимог замовлення в межах встановлених даними вимогами граничних значень. Додатковим критерієм є мінімізація розкиду механічних властивостей по довжині прокату однієї заготовки. Другим додатковим критерієм є мінімізація розкиду механічних властивостей у вироблюваній партії прокату. Третім додатковим критерієм є мінімізація часу налаштування режиму прискореного охолодження, що задовольняє основному критерію.

Для управління процесом виробництва прокату в стрижнях запропоновано три критерії: максимальний вихід стрижнів товарних довжин, максимальний вихід стрижнів мірної довжини і максимальний вихід стрижнів мірної довжини в пачках, що містять лише мірний прокат. Пріоритетність даних критеріїв визначається структурою замовлень на конкретний вид товарної продукції.

Дослідження взаємозв'язку параметрів, що входять в узагальнені системи критеріїв оцінювання якості управління окремими процесами виробництва сортового прокату, дозволило відобразити їх на множину технологічних параметрів, які їх визначають і піддаються управлінню.

Так встановлено, що для основного критерію якості управління швидкісним режимом прокатки – забезпечення стабільності геометричних розмірів перетину прокату по його довжині і підтримки їх в межах поля допусків основним вихідним параметром є міжклітьовий натяг прокату. Для основного критерію управління режимом прискореного охолодження – забезпечення стабільних механічних властивостей прокату по його довжині і підтримки їх в межах поля допусків – основними вихідними параметрами є середньомасова температура прокату після завершення прискореного охолодження і хімічний склад сталі прокату. Для основного критерію управління процесом виробництва стрижнів мірної довжини – забезпечення довжини стрижнів у межах допуску – основними вихідними параметрами є точність встановлення механізованого упору і точність розрізання прокату стаціонарними ножицями. Тобто, цей основний критерій не залежить від якості управління операціями в ході технологічного процесу. Але кількість (відсоток) виходу мірної продукції – показник, що входить у допоміжні техніко-економічні критерії, суттєво залежить від операцій, що формують пакет прутків якій поступає на стаціонарні ножиці для розрізання.

Таким чином, в результаті досліджень зроблено перехід від узагальнених техніко-економічних показників виробництва сортового прокату на прокатних станах до параметрів окремих операцій або груп операцій, що визначають ці показники.

Аналіз зв'язку параметрів, що можуть спостерігатися, з величиною між клітьового натягу прокату, показав що такими параметрами є: струми навантаження прокатних двигунів, зусилля прокатки, величина прогину прокату між клітьями, різниця у часі проходження переднього і заднього торців заготовки через міжклітьовий проміжок, а для багатониткових станів – кількість ниток, по яким одночасно прокатуються заготовки.

Для початкового настроювання швидкостей клітей використовується інформація з таблиць калібровки профілерозміру, який прокатується, і дані про фактичний діаметр прокатних валків, встановлених у кліті. Щоб запобігти розрахункових помилок перед початком прокатки встановлюється розбіжність швидкостей клітей на рівні 2-2,5%.

Для коректування початкової розбіжності до потрібного рівня використовуються параметри процесу прокатки, що вимірюються або спостерігаються.

В чорнових та проміжних групах клітей використовується вимірювана зміна статичного струму навантаження прокатних двигунів суміжних клітей в процесі заповнення та звільнення групи прокатною заготовкою. При цьому для підвищення точності настроювання може використовуватись статистичний аналіз відхилень струмів при фактичних збуреннях процесу прокатки.

В чистових групах клітей використовується вимірювані прогин прокату в міжклітьових проміжках або величина петлі між клітьями та групами клітей. При цьому розраховується і встановлюється не тільки рівень розбіжності швидкостей клітей в процесі прокатки, а й початковий рівень розбіжностей при захваті наступної заготовки.

Для багатониткових станів додатково використовується інформація, що спостерігається, про кількість заготовок, що одночасно прокатується в чорнових та проміжних групах клітей. В залежності від конфігурації розташування різних заготовок по групах розраховується та коректується як загальна групова швидкість клітей щоб запобігти петлеутворенню (або натягу) між групами, так і розбіжність швидкостей клітей усередині групи щоб компенсувати зміну перетину прокату

внаслідок пружності попередніх клітей. При цьому слід прагнути до мінімізації відхилення швидкості прокатки в останніх клітях чистових груп щоб запобігти помилок при розкроюванні прокату.

Аналіз зв'язку параметрів, що можуть спостерігатися, з середньомасовою температурою прокату і хімічним складом сталі, показав, що параметрами, які пов'язані з середньомасовою температурою є: температура поверхні прокату, кількість магнітної фази в прокаті на виході установки прискореного охолодження, довжини активної частини установки прискореного охолодження, тиск води на входах секції охолодження, температура води, що охолоджує, витрати води через секції охолодження, швидкість руху прокату, температура прокату за випускною кліттю. Параметром, що пов'язаний з хімічним складом сталі є кількість магнітної фази в прокаті на виході установки прискореного охолодження.

Початкова величина витрати води встановлюється термістом стану згідно з технологічною інструкцією виробництва термозміцненого прокату заданого діаметру, марки сталі та класу міцності таким чином, щоб забезпечити потрібну середньомасову температуру прокату.

Корегування витрати охолоджувальної води в процесі прокатки здійснюється шляхом безперервного безконтактного вимірювання відносної величини магнітної фази (мартенситу) в поперечній площині прокату на виході з установки примусового охолодження і розрахунку потрібної величини витрати води на основі розробленої регресивної моделі зв'язку магнітної фази з середньомасовою температурою, вуглецевим еквівалентом сталі і механічними властивостями готового прокату.

Модель статистично адаптується до сортаменту прокату та технологічних умов виробництва і дозволяє прогнозувати можливі коливання механічних властивостей в залежності від неконтрольованих коливань фактичного хімічного складу сталі та інших збурень і, шляхом управління витратою води за допомогою швидкодіючих гідравлічних клапанів, забезпечити утримання властивості прокату як в плавці, так і по довжині прутків злитка, що прокатується, в необхідних границях відповідно до стандарту на дану продукцію.

Аналіз зв'язку параметрів, що можуть спостерігатися, з виходом мірного прокату, показав, що такими параметрами є: довжина вихідної заготовки, довжини прутків, на які розрізається прокат за випускною кліттю летучими ножицями, розкид торців прутків на холодильнику, стратегія розкроювання прокату на стаціонарних ножицях холодильника на стрижні заданої довжини.

Операцію формування пачок стрижнів товарної продукції можна розглядати як поділ стрижнів по групам довжини з наступним комбінуванням їх у пачки з визначеними довжинами стрижнів у пачках. Стратегія управління комбінування стрижнів у пачки залежить від стандартів, згідно з якими виконується поточне замовлення.

Оцінка енергозбереження при застосуванні автоматизації швидкісного режиму прокатки, режиму термозміцнення арматурного прокату та використанні оптимальної стратегії розкроювання прокату на товарні стрижні показала можливість зменшення собівартості виробництва товарного прокату тільки на одному дрібносортному стані потужністю 800 тис. тон/рік орієнтовно на 1,5-2 млн. грн. за рік.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Автоматизация непрерывных мелкосортных станов / Праздников А.В., Егоров В.С., Гринберг С.Д. и др. – М.: Металлургия, 1975. – 216 с.
2. Акоф Р., Сасиени М. основы исследования операций. М.: Мир, 1971. – 534 с.
3. Альмен И.А., Брайт А.С. Работа холодильников мелкосортных станов при повышенных скоростях прокатки // Сталь. – 1965. – №5 – С. 438-441.
4. Ассер Я.Е., Шапиро М.М., Шейман Э.Л. Настройка непрерывных проволочных и мелкосортных станов. – М.: Металлургия, 1966. – 110 с.
5. Арматурный прокат для железобетонных конструкций. Справочник-каталог / Дубина О.В., Худик Ю.Т., Большаков В.И. и др. – Днепропетровск: НИИИММ, 2000. – 88 с.
6. Бахтинов В.Б. Прокатное производство: Учебник для техникумов. – М.: Металлургия, 1987. – 416 с.
7. Бахтинов В.Б., Бахтинов Ю.Б. Производство экономичных видов проката. – М.: Металлургия, 1984. – 328 с.
8. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
9. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 856 с.
10. Бернштейн М.А., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
11. Бокштейн С.З. Структура и механические свойства легированной стали – М.: Гос. науч.–техн. изд
12. Ван Хюллен П., Амерлинг В-Ю. / Проект модернизации сортового прокатного стана // Черные металлы. - 2004. - №4. – С. 40-45.

13. Венцель Е.С. Исследование операций: задачи принципы, методология.-2-е изд., стер. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. л-ры., 1988, 208 с.
14. Влияние прерывистого охлаждения при термическом упрочнении стержневой арматурной стали на формирование структуры и свойств. / Сидоренко О.Г., Федорова И.П., Евсюков М.Ф., Волков К.В. // Metallurgical and Mining Industry. – 1998. – №3. – С. 59-61.
15. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. – М.: Metallurgy, 1970. – 456 с.
16. Высокопрочная арматурная сталь. / Кугушин А.Л., Узлов И.Г., Калмыков В.В., Мадатян С.А., Ивченко А.В. М.: Metallurgy, 1986. – 272 с.
17. Глуховский Е.С. Новые технологические решения в проектах сортопрокатных цехов // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». М., 1999. Вып. 7-8. С. 40-47
18. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 25с.
19. ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упрочненная. Технические условия. – К.: Госстандарт Украины, 1996. – 25 с.
20. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. – М.: ИПК стандартов, 1983. – 63с.
21. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов. – М.: Metallurgy, 1988. – 240 с.
22. Губарь Е.Н., Жилиев К.И. Гродневский В.И. Производство и сдача проката по теоретическому весу. – К.: Техніка, 1974. – 252 с.
23. Губинский В.И., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. Уменьшение окалинообразования при производстве проката. – К.:Техніка,1982. – 134 с.

24. Гудермон Э. Специальные стали. – 2-е изд. Сокращен. и перераб.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1966. т.1. – 736 с.
25. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
26. Двухручьева прокатка-разделение арматурной периодической стали / Шульгин Г.М., Гладуш В.Д., Костюченко М.И., Нечепоренко В.А., Сеница И.И., Нестеров Ю.А. // Черная металлургия, 1986. – № 24. – С.20-21.
27. Двухручьева прокатка-разделение арматурной стали в валках / Шульгин Г.М., Нечепоренко В.А. и др. // Сталь. – 1998. – №4 – С.39-42.
28. Демченко А.Т., Доцекко П.Ф. Ремонт механического оборудования мелкосортных и проволочных станов. – М.: Металлургия, 1978. – 216 с.
29. ДСТУ 3760-98. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. – К.: Держстандарт України, 1998. – 20 с.
30. Думлер С.А. Управление производством и кибернетика. – М.: Машиностроение, 1971. – 421 с.
31. Егоров В.С. Оптимизация технологических операций на непрерывных мелкосортных станах для перехода к массовому производству мерного проката: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05 / МИСиС. – М.: 1988. – 47 с.
32. Ериклинцев В.В., Фридман Д.С., Розенфельд В.Х. Оптимизация раскроя проката. – М.: Металлургия, 1984. – 159 с.
33. Ёльштёттер Г., Еккель И. Влияние продольного натяжения при непрерывной прокатке на форму и размеры сортового проката // Черные металлы. – 1992. – №4. – С.50-58.
34. Зависимость между магнитными и механическими свойствами термически упрочненной арматурной стали / Диниц Г.С., Кукушкин О.Н., Лисняк

- А.Г., Лошкарёв В.И., Пирогов В.А. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – К.: Наукова думка, 1995. – С.203-206. – /Тр. ИЧМ НАНУ/
35. Инструкция по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на предприятиях черной металлургии. Общая часть. – М.: Минчермет СССР, 1974. – 176 с.
36. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – 2-е. изд. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
37. Исследование качества катанки, прокатанной на стане 150 с использованием низкотемпературного блока клетей / А.А. Горбанев и др. // *Производство проката.* – 2000. – №2. – С. 20-27.
38. Исследование и корректировка технологии термического упрочнения арматурной стали в условиях мелкосортных станов комбината «Криворожсталь» с целью снижения неоднородности и повышения уровня механических свойств; Отчет о НИР / Днепропетровский металлургический институт / ДМетИ/; Руководитель В.Т. Худик. – Инв. № Х 603090005. – Днепропетровск, 1986. – 93 с.
39. Исследование колебаний межклетевых усилий на среднесортном стане 450 / Казырский О.Л., Карпинский Ю.П., Лаптев Л.П. и др. // *Сталь.* – 1985. - №11. – С.47-48.
40. Исследование производства арматурного проката на стане 250 Западно-Сибирского меткомбината / А.А. Кугушин, Ю.Т. Худик, Ю.А. Попов и др. – *Сталь.* – 1981. – №9. – С. 70-73.
41. Комбинированный раскрой пакета мелкосортной полосовой стали / Шеремет В.А., Бабенко М.А., Смияненко И.Н., Курочкин А.Ф., Костюченко М.И., Кузнецов Г.В., Куваев В.Н. // *Черная металлургия.* – 2000. – № 3-4(1203-1204). – С.50-52.

42. Контроль процесса термомеханической обработки арматурной стали в потоке мелкосортного стана / Чигринский В.А., Пирогов В.А., Куваев В.Н. и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1999. - №6. – С.42-44.
43. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов. – М.: *Металлургия*, 1987. – 480с.
44. Куваев В.Н. Основы управления массовым производством мелкосортного проката мерной длины на базе компьютерных технологий НГАУ // *Компьютерные технологии в обучении, научных исследованиях и промышленности*. – Днепропетровск, 1998. №4. – С.117-121. – /Тр. НГАУ/.
45. Куваев В.Н. Рациональная организация резки пакетов мелкосортного проката на стационарных ножницах // *Сталь*. – 2001. – №2. – С.33-35.
46. Куваев В.Н. Экономический критерий оценки эффективности производства пруткового проката // *Економічний вісник Національної гірничої академії України*. — 1999. №4. – С.25-27.
47. Куваев В.Н. Иванов Д.А. Микро ОС для однокристалльных ЭВМ // *Науковий вісник Національної гірничої академії України*. – 2000. – №5. – С.79-83.
48. Куваев В.Н. Иванов Д.А., Чигринский В.А. Исследование влияния технологических факторов на взаимосвязь количества магнитной фазы в прокате со среднемассовой температурой проката на выходе установки термоупрочнения // *Теория и практика металлургии*. – 2007. - №2-3 (57-58). – С.92-97.
49. Куваев В.Н., Раздобреев В.Г., Иванов Д.А. Математическое моделирование мартенситных превращений в низкоуглеродистых сталях при закалке с самоотпуском // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – К.: *Наукова думка*, 2003. – С.319-325. – /Тр. НЧМ

НАНУ/.

50. Куваев В.Н., Политов И.В., Чигринский В.А. Система управления режимом непрерывной прокатки мелкосортной группы клетей стана 350/250 АО«Электросталь» // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1998. – №4. – С.87-91.
51. Куваев В.Н., Коротенко Л.М. Исследования возмущений скоростного режима прокатки с прогибом проката между клетями // *Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.техн.зб.* – 1998. - №1(60). – С.125-132.
52. Куваев В.Н., Смяненко И.Н., Реутенко С.И. Статистическая оценка конфигурации пакета полос мелкосортного проката // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2002. – №9. – С.38-42.
53. Куваев В.М., Чигринский В.О., Иванов Д.О. Розрахункова модель основних характеристик механічних властивостей арматурної сталі // *Вісті академії інженерних наук України.* – 2010. . №1(40). – С.24-30.
54. Кузьменко А.Г. Калинин В.П. Анализ разброса положения и длин прокатанных полос на холодильниках мелкосортных станов // *Конструирование и исследование современных прокатных станов.* – М.,1985. – С.132-147.
55. Кузьменко А.Г. Мелкосортные станы. Состояние, проблемы, перспективы. – М.: Металлургия, 1996. – 368 с.
56. Кузьменко А.Г. Производство мерного проката на непрерывных мелкосортных станах. – М.: Металлургия, 1997. – 310 с.
57. Кузьменко А.Г. Разработка, исследование и внедрение машин принудительного торможения термически упрочненного проката для холодильников высокоскоростных мелкосортных станов: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. – Москва, 1977.

58. Кузьменко А.Г. Электромагнитное торможение термически упрочненного мелкосортного проката // Тр. ин-та. / ВНИИМетМаш. – 1978. – С.122-129.
59. Кукушкин В.В. Влияние технологии и оборудования мелкосортного стана на выход прутков заданной длины при раскросе проката: Автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.04.04. – Днепропетровск, 1973.
60. Кукушкин О.Н., Лошкарев В.И., Чигринский В.А. Автоматизированное управление термоупрочнением арматурной стали в потоке непрерывного стана // Металлы и литье Украины. – 1995. – С.28-29.
61. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – Л.:М.: Госэнергоиздат, 1955. – 414 с.
62. Липухин В.А. Современные среднесортные и мелкосортные станы за рубежом // Прокатное производство. / ЦНИИТЭИЧермет. – 1973. – Сер. 7. Вып. 6. – 29 с.
63. Логинов А.В. Совершенствование процесса термомеханического упрочнения при прокатке арматурных профилей с применением структурно-математического моделирования: Автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.16.05. – Магнитогорск, 2004.
64. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит. – 2000. – 256 с.
65. Малокремнистые арматурные стали повышенной прочности / Вихлевщук В.А., Омесь Н.М., Нечепоренко В.А. и др. – К.: Наукова думка, 1999. – 151 с.
66. Матвеев Б.Н. Методы повышения качества сорта и катанки // Производство проката. – 2001. – №1. – С.40-47.
67. Матвеев Б.Н. Некоторые особенности современных мелкосортных станов // Сталь. – 1998. – №6. – С.35-41.
68. Матвеев Б.Н. Новое в производстве балок и сортовых профилей // Сталь. –

- 1999.– №3. – С.35-40.
69. Матвеев Б.Н. Расширение сортамента и повышение качества проката – основные направления модернизации сортовых и проволочных станов за рубежом //Черная металлургия. – 2001. – №10. – С. 9-17.
70. Математическое описание закономерностей превращения аустенита в изотермических условиях в низкоуглеродистых и низколегированных сталях / Ноговицын А.В., Богачева А.В., Евсюков Н.Ф., Лошкарев Д.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – К.: Наукова думка, 1999. вып.3. – С.285-291.
71. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. Том 1 / Под ред. Берштейна М.Л. и Рахштадта А.Г. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во л-ры по черной и цветной металлургии, 1961. – 747 с.
72. Метс А. Организация производства в прокатных цехах. – М.:Металургия, 1969. – 352с.
73. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 220 с.
74. Мулинарис Ф., Моттес Л., Ригини П. Первый в России мини-завод по выпуску специальных сталей // Черные металлы. – 2007.– ноябрь. –С. 53-59.
75. Научные и технологические основы производства арматурных сталей нового поколения / Вихлевщук В.А., Дубина О.В., Поляков В.А., Сокуренок А.В. и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 158 с.
76. Нетрадиционный подход к производству сортового проката общего назначения / В.Н Хлопонин, Б.А. Романцев, С.П. Галкин, А.В. Гончарук // Производство проката. – 2001. – №3. – С. 38-43
77. Нечитайло В.М. Управление сбросом полос на холодильник сортового стана // Теоретические и прикладные вопросы проектирования АСУ. – К.,

1983. – С.146-151.
78. Олевский А.Б. Разработка, исследование и внедрение систем оптимального управления непрерывным мелкосортным станом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1981. – 28с.
79. Оптимизация прокатного производства. / Скороходов А.Н., Полухин П.Н., Селюкович Б.М., и др. – М.: Metallurgy, 1983. – 432 с.
80. Оратовский Е.Л., Никулин А.Н. Прокатное оборудование для мини-заводов за рубежом // Черная металлургия. – 1984. – №20. – С.26-37.
81. Организация и планирование производства на металлургических предприятиях / И.А. Медведев, Б.П. Бельгольский, Э.С. Гликман, Х.П. Зайцев – К.: Вища школа, 1975. – 448 с.
82. Освоение системы управления скоростным режимом прокатки в линии стана 350/250. / Калинин В.И., Кофман М.Е., Веселов В.Ф., Куваев В.Н., Карпинский Ю.П., Политов И.В., Чигринский В.А. // Сталь. – 2003. – №2. – С.59-62.
83. Повышение производительности мелкосортных станов при прокатке термоупрочненного металла / Кузьменко А.Г., Калинин В.П., Макеев С.М. и др. // Сталь. – 1982. – №6. – С.50-52.
84. Пиккеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей: Пер. с англ. – М.: Metallurgy, 1982. – 184 с.
85. Пилюшенко Л.В., Ноговицын А.В. Феноменологическая модель механических свойств проката из низкоуглеродистой микролегированной стали // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии – К.: Наукова думка, 1995. – С.206-219. – /Тр. НЧМ НАНУ/.
86. Прокатка на мелкосортных станах / Чекмарев А.П., Гречко В.П., Гетманец В.В., Ховрин Б.В. – М.: Metallurgy, 1967. – 363 с.
87. Разработка и освоение технологии разлива спокойной стали в

- изложницы, уширенные к низу, с применением теплоизоляционных плит для утепления головной части слитка / Крупман Л.И., Синяговский Б.П., Петик А.С. и др. // Разливка стали в слитках и их качество.: Тематич. отраслевой сб. №1 Мин-ва черной металлургии СССР. – М.: Металлургия, 1972. – С. 3-7.
88. Рациональный режим электромагнитного торможения полос термоупрочненного проката на холодильнике мелкосортного стана / Гвоздев Р.В., Егоров А.П., Егоров В.С., Потап О.Е., Стахно В.И., Ткачев В.С. // Сталь. – 1989. – №4. – С. 59-60.
89. Рит В., Аппель М. Ориентированный на перспективу сортовой стан для прокатки специальных качественных и легированных сталей // Обзорная информация. Ин-т «Черметинформация», 1992. – 74 с.
90. Ройзман И.И. Эффективность производственной деятельности промышленного предприятия. Экономическое содержание и обобщающий измеритель. – Кишинев: Штиница, 1977. – 188 с.
91. Рушио Э., Мартинис А., Горза М. Новый металлургический комплекс в Абу-Даби, включающий мини-цехи и установку прямого восстановления железа // Металлургическое производство и технология. – 2007. – №2. – С. 48-57.
92. Рыбалов А.А., Губинский В.И. К расчету коэффициента теплоотдачи в процессе ускоренного охлаждения арматурного проката // Металлургическая теплотехника. – Сб. науч. тр Национальной металлург. Академии Украины. Том 8. – Днепропетровск: НметАУ, 2002. – С.178-183.
93. Сапожников А.Я. Мелкосортные станы конструкции ВНИИМЕТМАШ для мини-заводов // Сталь. - 1999. - №6. - С.61-62.
94. Сапожников А.Я., Кривенцов А.М., Милютин С.П. Мини-комплекс для производства мелкого сорта на основе совмещения винтовой и

- продольной прокатки // Труды третьего конгресса прокатчиков. - М.: АО "Черметинформация". - 2000. - С.314-315.
95. Свейковский У. Привязка УНРС к мелкосортным или проволочным станам // МРТ. – 1993. – С. 56-62.
96. Сивак Б.А., Ротов И.С. Литейно-прокатные агрегаты для металлургических мини-заводов // Ин-т "Черметинформация". - Бюл. "Черная металлургия". - 2001. - №3. - С.7-15.
97. Система автоматизированного управления раскромом раскатов на стане 250 / Егоров В.С., Потап О.Е., Куваев В.Н. и др. // Сталь. – 1992. – №11. – С.48-50.
98. Система расчета затрат на производство проката / Кузнецов Л.А., Корнеев А.М., Евсюков Р.Г., Степанюк И.В.// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. – №9. – С. 72-76.
99. Системы регулирования межклетьевых усилий однопиточных сортовых прокатных станов / Пустыльник М.П., Куваев В.Н., Стахно В.И., Егоров А.П. // АСУ ТП и средства автоматизации черной металлургии на базе микропроцессорной техники. – М.: Металлургия. – 1986. – С.74-79.
100. Система управления скоростным режимом прокатки сортовой линии мелкосортно-проволочного стана 250/150 ОАО «КГМК «Криворожсталь» / Шеремет В.А., Бабенко М.А., Щур В.А., Скляр А.В., Куваев В.Н., Политов И.В., Карпинский Ю.П., Чигринский В.А. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №3. – С.104-110.
101. Совершенствование калибровки валков чистовых блоков стана 150 Белорецкого металлургического комбината / В.М. Беленко и др. // Производство проката. – 2000. – №11. – С. 24-28.
102. Совершенствование процесса термоупрочнения арматурного проката / Богданов Н.А., Сычков А.Б., Ласков В.П. и др. // Сталь. – 1992. - №5. –

- C.65-69.
103. Совершенствование режимов термоупрочнения стержневой арматурной стали / Быхин Б.Б., Канаев А.Т., Кагушак А.Ф. и др. // Сталь. – 1998. – №12. – С.46-48.
 104. Соколовский П.И. Арматурные стали. – М.: Металлургия, 1964. – 208 с.
 105. Средства контроля и управления точностью сортового проката / Клименко В.М., Кашаев В.М. и др. – К.: Техніка, 1983. – 174 с.
 106. Сопротивление материалов: Учебник для вузов / Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л., Попов В.Г., Уманский Э.С. / Под общ.ред. Г.С. Писаренко. – 4-е изд. перераб. и доп. // К.: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.
 107. Сталь. Термины и определения. ОСТ 14-1-142-84. – М.: Черметинформация, 1984. – 18 с.
 108. Сталь углеродистая обыкновенного качества и низколегированная./Сборник стандартов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 168 с.
 109. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во л-ры по черной и цветной металлургии, 1962. – 567 с.
 110. Теоретические и экспериментальные исследования процесса непрерывной прокатки на сортовых станах: Отчет по НИР. - № ГР 76063444; Инв.№Б521425. – Челябинск, 1975. – 113 с.
 111. Теория и практика прокатки малокремнистых арматурных сталей / Вихлевщук В.А., Дубина О.В., Ноговицын А.В. и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 139 с.
 112. Теория прокатки: Справочник / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
 113. Термическое упрочнение проката / Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Савенков

- В.Я. и др. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
114. Технология термической обработки стали / Рейхард Б., Зигфрид Б., Гюнтер Г. и др.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.
 115. Технология производства катанки на стане 150 из заготовок с пониженным теплосодержанием / А.А. Горбанев и др. // Сталь. – 1999. – №5. – С. 52-54.
 116. Точность электромагнитного торможения полос на холодильнике мелкосортного стана / Смияненко И.Н., Бабенко М.А., Курочкин А.Ф., Вернигоров В.П., Куваев В.Н., Ермократьев В.А., Егоров В.С., Кононов Д.А. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2003. – №5. – С.74-76.
 117. Увеличение выхода мерного проката при производстве арматурных профилей / Юрьев А.Б., Погорелов А.И., Кузнецов И.С. и др. // Сталь. – 2003. – С.63-64.
 118. Узлов И.Г., Савенков В.Я., Поляков С.Н. Термическая обработка проката. – К.: Техніка, 1981. – 159 с.
 119. Управляемое термическое упрочнение проката / Узлов И.Г., Парусов В.В., Гвоздев Р.В., Филонов О.В. – К.: Техніка, 1989. – 118 с.
 120. Устройства и механизмы подравнивания проката по концам на речных холодильниках / Кузьменко А.Г., Калинин В.П., Сапожников А.Я. и др. // Оборудование для прокатного производства / НИИИнформТяжМаш. – 1975. – №1-75-11. – С.12-20.
 121. Устройство автоматического управления скоростью транспортировки проката: А.с. 498053 СССР, МКИ В21В 39/00. / Олевский А.Б., Андрианов Ю.Г., Ямпольский Л.Е. и др. (СССР). – №1882669/22-2; Заявлено 16.02.73; Оpubл. 1976, Бюл.№1. – 4 с.
 122. Устройство для автоматического управления механизмами сброса прутков

- на холодильник мелкосортного стана: А.с. 774644 СССР. МКИ В21В 37/00. / Нечитайло В.М., Баллон Д.И., Спивак А.Л. и др. (СССР); №2718111/22-02; Заявлено 09.11.78; Опубл. 1980. Бюл.№40. – 4 с.
123. Устройство для управления сбрасывателем полосы на холодильник мелкосортного стана: А.с. 1196055 СССР, МКИ В21В 37/00. / Стахно В.И., Егоров В.С., Егоров А.П., Потап О.Е. (СССР); – №3770408/02; Заявлено 05.07.84; Опубл. 1985г., Бюл.№45. – 5 с.
124. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматизированных систем. – М.:Физматгиз,1966. – 623 с.
125. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
126. Целиков А.И., Зюзин В.И. Современное развитие прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 399 с.
127. Целиков А.И.. Основы теории прокатки – М.: Металлургия, 1965. – 247 с.
128. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1958. – 432 с.
129. Чекмарев А.П., Борисенко Г.П. Исследование натяжения на непрерывном сортовом стане // Обработка металлов давлением: Сб.научн.тр. Днепропетровского металлургического ин-та: Т.48 – М.: Металлургия, 1962. – С.108-121.
130. Чекмарев А.П., Гречко В.П., Куцыгин М.Д. Влияние натяжения на прокатку в калибрах // Прокатное производство. – М.: Металургия, 1965. – Т.ХХI. – С. 237-249.
131. Чекмарев А.П., Побегайло Г.Г. Точная прокатка сортовых профилей. – М.: Металлургия, 1968. – 236 с.
132. Чекмарев А.П., Топоровский М.П. Взаимосвязь клетей и промежутков между ними при прокатке на непрерывном мелкосортном стане //

- Прокатное производство. – М.:Металлургия, 1967. – Т.ХХІІ. – С. 5-64.
133. Чекмарев А.П., Топоровский М.П. Исследование переходных процессов в трех клетях непрерывного стана // Прокатное производство. Труды ИЧМ: Т. XXI. – М.: Metallurgy, 1965. – С.81-119.
134. Чекмарев А.П., Чернобривенко Ю.С., Биба В.И. Техничко-экономическая эффективность производства точного сортового проката // Обработка металлов давлением.: Сб. науч. тр. / Днепропетровский металлургический ин-т, т.57 – М.: Metallurgy, 1971. – С.7-11.
135. Чигринский В.А. Исследование и разработка некоторых систем автоматического регулирования режима прокатки на непрерывном мелкосортном стане // Прокатное производство. Труды ИЧМ т. XXII // М.: Metallurgy, 1967. – С.141-165.
136. Чигринский В.А., Чернышев А.Н., Силич А.Н. Влияние скорости прокатки на прогиб раската между клетями непрерывного мелкосортного стана // Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов: Сб. науч. тр-ов Ин-та черной металлургии: Т.27 – М.: Metallurgy, 1967. – С.70-80.
137. Чигринский В.А. Пирогов В.А., Черненко В.Т. Контроль процесса термомеханического упрочнения арматурной стали // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, вып.2 // Киев, «Наукова думка», 1998, С.400-405.
138. Шеремет В.А. Научные основы продольно разделенной арматуры: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Национальная металлургическая академия – Днепропетровск., 2003. – 18 с.
139. Шор С.М. Новейшие разработки по технологии редуционно-калибровочных станов // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. – 1999. – С.52-58.

140. Эксплуатация непрерывных мелкосортных станов / В.В. Гетманец, В.А. Сапкий, И.А. Альмен, М.М. Шапиро. – М.: Metallurgy, 1965. – 143 с.
141. Электромагнитный контроль процесса термоупрочнения проката крупных сечений / Шеремет В.А., Бабенко М.А., Кекух А.В., Костюченко М.И., Кокшаров А.Н., Кузнецов Г.А., Куваев В.Н., Чигринский В.А., Иванов Д.А., Карпинский Ю.П. // Metallurgical and Mining Industry. – 2004. – №6. – С.102-105.
142. Anabuki Y., Goto Y. On-line size and shape measurement techniques for hot steel rolling process // Kawasaki Steel Techn. Report. 2000. №43. P. 75-80.
143. Amano K., Hoshino T., Kawabata F. Recent activities in research of shapes, bars and wire rods // Kawasaki Steel Techn. Report. 1999. №41. P. 52-54.
144. Cascade Steel adds hot-mill gauge to measure rod/bar diameters // Metalproducing. 2001. 33. №3. P. 37-38.
145. Chiang Y.J., Palzer O. Automatic size control – a new sizing technology in the China Steel Corporation №2 steel bar mill // Metallurgical Plant and Technology Int. 1999. 22. №1. P. 82-89.
146. Greis P., Stein-Versen R. Innovative technologies for producing long and flat products // MPT Int. 2000. 23. №6. P. 82-92.
147. Kohlmann R., Kruse M., Meyer M., Plociennik U. Optimization of material properties for bars and wire rod // MPT Int. 2000. 23. №2. P. 56-62.
148. Kuznetsov G.V., Kuvayev V.N., Kuvayev Y.G. Operational modes optimization fundamentals of Iron ore enrichment section // Mine Planning and Equipment Selection 1999 & Mine Environmental and Economical Issues 1999, National Mining University of Ukraine, Dnipropetrovsk. – 1999. - P. 863-867.
149. Lestani M., Salvador G., Bordignon G. New technologies to increase output and quality of coiled wire rod and bundled bar // Int. 1999. 22/ №1. P. 48-53.
150. Rains J., Fabro M. New super-flexible structural mill at SMI Steel-South

- Carolina // Ibid. 2001. 78. №3. P. 29-33.
151. Samways N.L. New 850,000-ton rolling mill expands production at SMI Steel-South Carolina // AISE Steel Technol. 2000. 77. №3. P. 55-57.
 152. Sollander D.N. Results from looperless rolling in profile mills with interstand dimension control mills // AISE Steel Technol. 2001. 77. №3. P. 26-28.
 153. Sollander D.N. Upgrading rod and bar mills with open control // Steel Times. 2000. 228. №2. P. 49-50.
 154. Von der Heiden J. Rolling high precision bar using 3-roll blocks // Metal Bull. Mon. 2000. Nov. P. 39.

ДОДАТКИ

Державний вищий навчальний заклад
„НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи,
д.т.н., проф.



[Signature] О.С. Бешта

11 2011 р.

ЗВІТ
про патентні дослідження

№ _____

(дата)

по НДР: **ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУВАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО
ПРОКАТУ**

ГП-436

(найменування, шифр теми)

Етап - заключний

Заст. проректора
з наукової роботи, к.т.н.

[Signature]

Р.О. Дичковський

Керівник Науково технічного центру
автоматизації технологічних процесів
в гірничому та металургійному виробництвах
(НТЧ АТП ГМВ), д.т.н., проф.

[Signature]

В.М. Куваєв

Керівник НДР д.т.н., проф.

[Signature]

В.М. Куваєв

Керівник ПЛВ

[Signature]

О.О. Філонова

Нормоконтролер

[Signature]

Л.О. Савостенко

2011

СПИСОК АВТОРІВ

Головний науковий співробітник, д.т.н., проф.

В.М. Куваєв

Провідний науковий співробітник, к.т.н.

Ю.П. Карпинський

ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Організація-виконавець розробки: Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет”

Початок розробки – 2010 р., січень

Кінець розробки – 2011р., грудень

Мета та актуальність НДР – скорочення енерговитрат на регулювання технологічних режимів сортопрокатних станів, яке здійснюється для забезпечення потрібних якісних показників товарного прокату.

Призначення - дослідження взаємозв'язку якості регулювання та стабілізації параметрів технологічного процесу з якістю товарного прокату і впливом технологічних збурень на цей взаємозв'язок і розробка принципів автоматизації, які засновані на взаємопов'язаних критеріях управління окремими технологічними процесами.

Галузь використання – системи автоматичного управління технологічними процесами виробництва прокату на безперервних дрібносортних та дровових прокатних станах.

Об'єкти роботи (ОГД) – системи автоматичного настроювання та стабілізації режиму прокатки з мінімальним міжклітьовим натягом в безперервних групах прокатних клітей для забезпечення високої точності розмірів поперечного перерізу прокату по його довжині;

- системи автоматичного контролю та управління процесом безперервного термозміцнення арматурного прокату для забезпечення стабільності його механічних властивостей незалежно від коливань хімічного складу сталі;
- системи автоматичного оптимального розкрюювання товарного сортового прокату (в т.ч. термозміцненого) для забезпечення максимального виходу мірних прутків за замовленням, скорочення обсягів немірної продукції та обрізків.

ЗМІСТ

1. Техніко-економічні показники ОГД та об'єктів аналогічного призначення (Ф. Г. 1.4).....
2. Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислового використання ОГД (Ф. Г. 1.5.).....
3. Аналіз можливостей застосування ОГД у відомих об'єктах промислової власності (Ф. Г. 2.4.).....
4. Висновки.....
5. Довідка про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР ГП – 436...

1. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ОГД ТА ОБ'ЄКТІВ
АНАЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ (Ф.Г.1.4)

Найменування та одиниці виміру	Техніко-економічні показники			
	об'єкта за стандартом або технічними умовами	об'єкта-анало- га (держава, фірма, органі- зація, модель, рік освоєння)	ОГД	перспек- тивного зразка
1	2	3	4	5
Точність розмірів перерізу прокату, мм. Кількість заготовок на настроювання прокатного стана, шт. Кількість аварій („забурювань”) за одну зміну, шт..	+ 0,2 - 0,3 3 – 4 2 - 3	+ 0,1 - 0,2 Сучасні закордонні сортові прокатні стани	Спосіб автоматичного управління швидкісним режимом сортової прокатки	+ 0,15 - 0,15 1 1 - 2
Розбіг значень середньомасової температури, °С.	100	80 Західносибірсь- кий металургійний комбінат	Спосіб автоматичного управління режимом термозміцнення сортового прокату	30
Вихід немірного прокату, % Обрізь (втрати) прокату, %	6 3 – 4	5 2 - 3 Сучасні закордонні сортові прокатні стани	Спосіб автоматичного управління розкромом сортового прокату	5 2 – 3

2. АНАЛІЗ НОВИЗНИ, ВИНАХІДНИЦЬКОГО РІВНЯ ТА
ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ОГД (Ф.Г.1.5.)

Таблиця 1

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
<p>Спосіб автоматичного управління швидкісним режимом сортової прокатки.</p> <p>„Спосіб автоматичної стабілізації режиму прокатки”.</p> <p>Україна, Деклараційний патент на винахід №62590 А 7 В21В1/00 15.12.2003. Автори: Куваєв В.М. та інші.</p>	<p>Визначають і запам'ятовують положення осі прокатки, задають максимальну величину прогину прокату щодо осі прокатки і період виміру максимальної величини прогину, а регулювання частоти обертання приводів суміжних клітей здійснюють таким чином, щоб поточна величина прогину не перевищувала його заданої максимальної величини</p>	<p>Устройство для регулирования натяжения проката А. С. СССР № 1094634</p>	<p>Вимір відстані від нульового рівня вимірника положення прокату до осі прокатки, установка заданої величини прогину прокату між клітьями і стабілізація прогину прокату на заданому рівні регулюванням швидкостей суміжних клітей</p>	<p>Точність геометричних розмірів перерізу прокату, відхилення від номіналу, мм + 0,15 - 015. Підвищення точності та скорочення часу на настроювання стану, зменшення кількості аварій (забурювань) на одну. Можлива економія енергетичних ресурсів по одному стану до 300 тис грн на рік.</p>	<p>Безперервні дрібносортовні стани</p>	

2. АНАЛІЗ НОВИЗНИ, ВИНАХІДНИЦЬКОГО РІВНЯ ТА
ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ОГД (Ф.Г.1.5.)

(Продовження)

Таблиця 2

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
Спосіб автоматичного управління режимом термозміцнення сортового прокату. „Спосіб управління процесом термозміцнення прокату з прокатного нагрівання” Україна, Деклараційний патент на винахід №71817 А 7 В21В27/10 15.12.2004. Автори: Куваєв В.М. та інші.	Попередньо задають середньомасову температуру прокату після примусового охолодження, задають відношення відхилень величини магнітної фази та середньомасової температури від попередньо заданих величин, вимірюють температуру прокату після її вирівнювання по перерізу прокату та визначають її відхилення від попередньо заданої величини середньомасової температури і управляють охолодженням прокату таким чином, щоб поточне відношення відхилень температури магнітної фази дорівнювало попередньо заданому відношенню	Автоматизированное управление термоупрочнением арматурной стали в потоке непрерывного стана. Металл и литьё Украины, 1995 - №5, с. 28-29	Вимірювання величини магнітної фази в прокаті на виході з установки примусового охолодження, розрахунок на основі регресійної моделі залежності механічних властивостей готового прокату від величин магнітної фази та вуглецевого еквіваленту сталі, управління мірою охолодження прокату в разі відхилення розрахованих властивостей від попередньо заданих	Скорочення діапазону значень середньомасової температури на 50 ⁰ С. Можлива економія енерго ресурсів по одному стану за рік до 200 тис. кВт годин, або 170 тис. грн	Безперервні дрібносортні стани, обладнані установками термозміцнення арматурного прокату	

2. АНАЛІЗ НОВИЗНИ, ВИНАХІДНИЦЬКОГО РІВНЯ ТА
ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ ОГД (Ф.Г.1.5.)
(Продовження)

Таблиця 3

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
Спосіб автоматичного управління розкромом сортового прокату. „Спосіб формування пакету штаб” Україна, Деклараційний патент на винахід №69608 А 7 В21В39/00 15.09.2004. Автори: Куваєв В.М. та інші.	Попередньо задають мірну довжину прутка і встановлюють на пристрої, що підрівнює, на відстані мірної довжини ряд перерізів групування торців штаб, оцінюють кратність мірної довжини прутка довжині штаб, що знаходяться на пристрої, який підрівнює, за результатами оцінки вибирають переріз групування торця штаби і транспортують штабу пристроєм, що підрівнює, до сполучення переднього торця штаби з вибраним перерізом групування	Монографія Производство мерного проката на непрерывных мелкосортных станях М. : Металлургия, 1997.- 310	Завдання на холодильнику перерізу групування однойменних торців штаб, розрахунок інтенсивності гальмування по обмірюваній довжині і швидкості штаби, скидання штаби на холодильник, її гальмування з розрахованою інтенсивністю, транспортування штаб по холодильнику до пакетуючого пристрою	Частка мірних прутків за замовленням в загальному обсязі товарного прокату, % 95-96. Скорочення витрат мірного прокату на 1%. Скорочення витрат енергетичних ресурсів на одному стані до 1200 тис. грн на рік	Безперервні дрібносортні стани	

3. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ОГД У
ВІДОМИХ ОБ'ЄКТАХ ПРОМИСЛОВОЇ ВЛАСНОСТІ
(Ф.Г. 2.4.)

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності (бібліографічні дані)	Суть об'єкта промислової власності	Очікуваний результат від застосування
1	2	3	4
Спосіб автоматичного управління швидкісним режимом сортової прокатки	„Спосіб автоматичної стабілізації режиму прокатки” Україна, Деклараційний патент на винахід № 62590 А 7 В21В1/00 15.12.2003. Автори: Куваєв В.М. та інші	Безперервні дрібносортні стани	Точність геометричних розмірів перерізу прокату, відхилення від номіналу, мм + 0,15 - 015
Спосіб автоматичного управління режимом термозміцнення сортового прокату	„Спосіб управління процесом термозміцнення прокату з прокатного нагрівання” Україна, Деклараційний патент на винахід №71817 А 7 В21В27/1015.12.2004 Автори: Куваєв В.М. та інші.	Безперервні дрібносортні стани, обладнані установками термозміцнення арматурного прокату	Механічні властивості термозміцненого прокату Відхилення від номіналу, Н/мм ² 0 +100
Спосіб автоматичного управління розкром сортового прокату	„Спосіб формування пакету штаб” Україна, Деклараційний патент на винахід №69608 А 7 В21В39/00 15.09.2004. Автори: Куваєв В.М. та інші.	Безперервні дрібносортні стани	Частка мірних прутків за замовленням в загальному обсязі товарного прокату, % 95-96

4. ВИСНОВКИ

Досліджено взаємозв'язок якості регулювання та стабілізації параметрів технологічного процесу з якістю товарного прокату і впливом технологічних збурень на цей взаємозв'язок і розроблені принципи автоматизації, які засновані на взаємопов'язаних критеріях управління окремими технологічними процесами з використанням Деклараційних патентів на винахід (Україна) :

№ 62590 А 7 В21В1/00 15.12.2003,

№71817 А 7 В21В27/1015.12.2004,

№69608 А 7 В21В39/00 15.09.2004.

Розробка має відомості НОУ-ХАУ, які містять методики вибору способів автоматичного управління технологічними режимами прокатки, термозміцнення та розкрою сортового прокату.

Застосування запропонованих способів автоматичного управління технологічним режимом прокатки забезпечує на одному безперервному дрібносортному стані річну економію енерговитрат на суму біля 1 670 тис. грн.

Крім того, технічно-економічні показники перевищують рівень близьких аналогів.

Науково-технічний рівень НДР відповідає сучасному світовому рівню науки і техніки.

5. ДОВІДКА
ПРО ОЦІНКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НДР
ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи,

д.т.н., проф.

О.С. Бешта

"02" 11 2011 р.



про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР: ГП-436

**„ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУВАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ”**

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Найменування та одиниця виміру	Значення техніко-економічних показників	
	кращого аналога	розробленого об'єкту
Точність розмірів перерізу прокату, мм.	+ 0,15 - 0,20	+ 0,15 - 0,15
Кількість заготовок на настроювання прокатного стана, шт.	3 – 4	1
Кількість аварій („забурювань”) за одну зміну, шт..	2 - 3	1- 2
		Можлива економія енергетичних ресурсів по одному стану до 300 тис грн на рік.
Розбіг значень середньомасової температури, °С.	80	30 °С
		Можлива економія енергетичних ресурсів по одному стану до 200 тис. кВт годин, або 170 тис. грн на рік.
Вихід немірного прокату, %	6	5
Обрізь (втрати) прокату, %	3 – 4	2 – 3
		Скорочення витрат енергетичних ресурсів по одному стану до 1200 тис. грн на рік

Перелік патентів (заявок): „Спосіб автоматичної стабілізації режиму прокатки”. Україна, Деклараційний патент на винахід № 62590 А 7 В21В1/00 15.12.2003, „Спосіб формування пакету штаб”. Україна, Деклараційний патент на винахід №69608 А7 В21В39/00 15.09.2004, „Спосіб формування пакету штаб” Україна, Деклараційний патент на винахід №69608 А 7 В21В39/00 15.09.2004. Автори Деклараційних патентів: Куваєв В.М. та інші.

Відомості НОУ-ХАУ : методика вибору способів управління технологічними режимами прокатки, термозміцнення та розкрою сортового прокату.

ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ НДР Відповідає сучасному світовому

рівню та перевищує сучасний рівень науки і техніки в Україні

Керівник ПЛВ

О.О. Філонова

"01" 11 2011 р.

Керівник НДР, д.т.н., проф.

Куваєв В.М.

"01" 11 2011 р.

Державний вищий навчальний заклад
Національний гірничий університет

ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 3

засідання секції науково-технічної ради за науковим напрямом
„Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження”

м. Дніпропетровськ

12 грудня 2011р.

ПРИСУТНІ: Голова – професор Іванов О.Б., заст. голови – професор Випанасенко С.І., вчений секретар – доц. Рухлов А.В., члени секції – професори Корсун В.І., Шкрабець Ф.П., Казачковський М.М., керівник теми ГП-436 – головний науковий співробітник Куваєв В.М.

СЛУХАЛИ: повідомлення д.т.н. Куваєва В.М., керівника теми ГП-436 „Енергозаощаджувальна автоматизація технологічних процесів виробництва сортового прокату” про виконання заключного етапу робіт по темі, передбачених календарним планом на 2010-2011рр.

Доповідачем розкриті отримані результати.

Основними з них є:

1. Встановлено, що, незалежно від типу сортопрокатних станів, споживчі властивості товарного прокату формуються в результаті наступних операцій: обробки гарячої заготовки тиском, примусового охолодження (термозміцнення) прокату і операцій розкроювання прокату на стрижні.
2. Узагальнені критерії виробництва прокату можуть бути поділені на три основні групи: критерії виконання замовлення, технічні критерії та економічні критерії.
3. Встановлено взаємозв'язок між узагальненими критеріями виробництва прокату і параметрами операцій чи груп операцій, які формують відповідні споживчі властивості товарного прокату.
4. Розроблено методики автоматичного вибору технологічних режимів виробництва товарного прокату: швидкісного режиму прокатки, режиму термозміцнення арматурного прокату та оптимального режиму розкроювання прокату на стрижні заданої довжини.
5. Виконана оцінка зменшення собівартості виробництва прокату за рахунок енергозбереження при використанні розроблених режимів управління.

За результатами роботи надруковано 13 статей, та зроблено 5 доповідей на міжнародних симпозиумах та конференціях.

ВИСТУПИЛИ: професор Казачковський М.М., який дав позитивну оцінку результатам виконаної роботи та відзначив, що зміст виконаних досліджень відповідає етапам календарного плану на 2010-2011рр., а наукові і практичні результати – поставленій цілі НДР. Він рекомендував заключний звіт з НДР схвалити до затвердження.

УХВАЛИЛИ: 1. Науково-дослідна робота виконана відповідно до технічного завдання і етапів календарного плану робіт у повному обсязі.
2. Науково-технічний рівень роботи відповідає сучасному рівню науки і техніки. Робота містить важливі наукові і практичні результати.
3. Матеріали звіту не містять відомостей, які можуть бути віднесені до державної таємниці.
4. Заключний звіт схвалити і рекомендувати до затвердження.

**Голова секції,
професор**



О.Б. Іванов

**Вчений секретар секції,
доцент**



А.В. Рухлов

РЕЦЕНЗИЯ

на заключительный отчет по НИР ГП-436 «Энергосберегающая автоматизация технологических процессов производства сортового проката»

Представленный отчет посвящен исследованию и решению одной из важнейших задач сортопрокатного производства – повышению его эффективности не только в обязательной части дальнейшего совершенствования качества товарного проката, но и в части экономии энергетических ресурсов на его производство.

В отчете выполнен детальный квалифицированный системный анализ потребительских свойств сортового проката, технологических участков станов различных типов и систем управления, обеспечивающих процесс производства товарного проката.

Для оценки эффективности производства проката предложена общая система технико-экономических критериев, включающая обобщенные критерии: выполнение заказа, технические критерии качества проката и экономические критерии его производства.

Декомпозиция требования этих критериев позволила отобразить их непосредственно на критерии управления отдельными технологическими операциями или группами операций и на параметры, которые поддаются управлению.

Обоснованы системы критериев: управления скоростным режимом прокатки в группах клетей стана, управления ускоренным охлаждением проката (термоупрочнением), управления раскромом проката на товарные длины.

Разработаны и детально технологически обоснованы методики выбора параметров режимов управления операциями производства проката в соответствии с разработанными критериями. Выполнен анализ снижения себестоимости производства проката за счет экономии энергоресурсов при автоматизации.

Отчет выполнен на высоком научно-техническом и математическом уровне, содержит важные системные выводы, которые могут служить основой при создании систем оптимального управления производством сортового проката, изложен ясным языком, надлежащим образом оформлен и, в целом, заслуживает высокой оценки.

Профессор кафедры автоматизации производственных процессов Государственного высшего учебного заведения «Национальная металлургическая академия Украины»
д.т.н., лауреат Государственной премии Украинской ССР



О.Н. Кукушкин

Подпись О.Н. Кукушкин удостоверяю
Начальник Отдела кадров НМАУ

В.С. Шифрин

Додаток Г

АКТ

впровадження на ПАТ „АрселорМіттал Кривий Ріг” результатів науково-дослідної роботи ГП-436 „ЕНЕРГОЗАОЦАДЖУВАЛЬНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА СОРТОВОГО ПРОКАТУ”

Розроблені в роботі рекомендації по автоматичному вибору режимів виробництва сортового прокату впроваджені в системах управління:

- швидкісним режимом прокатки з мінімальним натягом на дрібносоротно-дротовому стані 250/150-6;
- режимом термозміцнення арматурного прокату за допомогою систем електромагнітного контролю середньомасової температури на дрібносортних станах 250-1, 250-3, 250-5.

Впровадження вказаних режимів дозволило підвищити точність розмірів та стабільність механічних властивостей товарного прокату по його довжині у відповідності до міжнародних стандартів, скоротити втрати часу та металу при настроюванні режимів прокатки нових профілерозмірів, полегшити умови роботи обслуговуючого персоналу.

Директор прокатного департаменту
ПАТ „АрселорМіттал Кривий Ріг”



В.Г. Лясов

Керівник роботи ГП-436
головний науковий співробітник
державного вищого навчального закладу
„Національний гірничий університет”, д.т.н.

В.М. Куваєв