

3 ПІДІГРІВ ШТАБИ ПЕРЕД ЧИСТОВИМИ КЛІТЯМИ ІНДУКЦІЙНИМ СПОСОБОМ

Необхідність підігріву сталевих штаб на проміжному рольгангу між чорновими і чистовими клітями стану гарячої прокатки пов'язана із загальними вимогами підвищення якості прокату і зниження енерговитрат при прокатці.

Стабілізація температури на вході в чистову групу стану виключає прискорення при прокатці і дозволяє отримати постійні фізико-механічні властивості по довжині штаб. З'являється можливість підтримувати з високою точністю товщину кінцевого продукту по довжині.

Рівномірне температурне поле по ширині штаб покращує умови експлуатації валків прокатного стану і зменшує нерівномірність зносу валків і відповідно збільшує їх термін експлуатації.

Нерівномірний розподіл температури по ширині підкату штаби перед чистовими клітями має також ряд негативних наслідків, позначається на якості штаб, а саме:

- на кромках може утворитися інша металургійна структура, яка небажана в іншій частині штаби;
- якщо після прокатки необхідний ще один вид термообробки сталі, то температура найбільш холодних зон матеріалу, тобто кромки штаби, повинна бути вище температури перехідного стану;
- якщо кромки недогріті, то це може привести до підвищення крихкості і утворення тріщин на кромках штаби.

За час транспортування штаба втрачає середню температуру, додатково підстивають кромки на деяку температуру і утворюється температурний перепад по довжині штаби. З цих причин, в технологічному процесі, як правило, повинен бути передбачений підігрів штаб розкату.

Для цієї мети можуть бути використані різні нагрівальні установки. Індукційний спосіб нагріву найбільш придатний як для одночасного підвищення загального рівня температури, так і для підігріву кромки і вирівнювання температури по ширині, компенсації температурного градієнта по довжині штаби і забезпечення стабілізації температури на вході в чистову групу клітей.

Підвищення рівня температури штаби перед входом в чистові кліті прокатного стану зазвичай здійснюються в овальних нероз'ємних індукторах з поздовжнім магнітним полем. При використанні відносно високої частоти струму, можна частково компенсувати падіння температури на кромках штаб, але зона впливу обмежена кількома глибинами проникнення струму в метал і не буде перевищувати декількох міліметрів. Тому необхідна компенсація температури на кромці в зоні 100 ... 150 мм при нагріванні в цьому типі індуктора не можлива.

Для підігріву кромки штаб і перетину штаб існують різні методи, пристрої та індуктори.

Для досягнення необхідних показників геометричної точності широких штаб, вирівнювання температури по ширині штаби узгоджується з роботою систем автоматизованого регулювання профілю штаб (САРП) і товщини прокату

(САРТ). Дані процеси безпосередньо пов'язані з функціонуванням механізмів протизгинання валків, навантаження яких залежить від реалізованих в кожному окремому пропуску силових режимів листової прокатки, автоматизований розрахунок яких запропонований у літературі. Для розрахунку перепадів (градієнтів) температур по довжині і ширині штаби запропоновані автоматизовані продукти на основі методів скінчених елементів, які, в тому числі, адаптовані до умов прокатки широких штаб. Використання таких комп'ютерних модулів дозволяє визначати вихідні дані для проектування індукційних нагрівачів (підігрівачів) різних типів (овальних, щілинних, зі змінним кроком витків, двошарових і т.п.), установка яких необхідна для забезпечення необхідної форми градієнтної кривої розподілу температур по ширині розкату перед входом в чистові кліті. Між чорною кліттю і першою чистовою кліттю в системі неперервного широкоштабового стану гарячої прокатки виконується установка одного або декількох підряд (що більш ефективно) індукційних підігрівачів, які включаються і вимикаються узгоджено з ритмом прокатки штаб. Тобто даний спосіб нагріву кромки листового і штабового розкату полягає в тому, що подача розкату в секції щілинного індуктора і поздовжнє його переміщення в електромагнітному полі в міжклітьовому просторі проводиться до забезпечення необхідної температури розкату. Причому секції індукторів включаються в автоматизованому режимі послідовно в момент входу в них передньої кромки розкату і вимикаються при виході з них задньої кромки розкату. В патентній літературі також наведені раціональні технічні рішення, розвиваючі методи градієнтного нагрівання і забезпечення стабільності температурного поля металу перед його обробкою тиском.

3.1 Уточнення методики розрахунку теплових втрат металу на безперервних станах гарячої прокатки

Вимоги ринку щодо розширення асортименту гарячекатаних рулонів вимагають нагальну потребу в освоєнні нових технологій прокатки на широкоштабових станах, таких як 1680 ПАТ «Запоріжсталь» і 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Проектування технології, перед її реалізацією на існуючому обладнанні, і визначення вузьких місць, можливо за допомогою інструментів математичного моделювання технологічного процесу, важливою складовою якого є розрахунок температурного режиму прокатки. Розробка такого інструменту, з урахуванням особливостей устаткування стану 1680 і стану 1700, дозволить оцінити їх технічні можливості і розширити асортимент, у тому числі що виробляється за технологією ТМСП (Thermo-Mechanical Control Process).

Запропоновані рішення орієнтовані як на конкретні комплекси прокатного обладнання, так і на лабораторні зразки станів. Залишаються питання по універсальності існуючих математичних моделей, з можливістю їх застосування для розрахунку прокатних комплексів з різним складом основного технологічного устаткування.

Важливим моментом є потреба в отриманні точних моделей для проектування технології контрольованої прокатки (ТМСП) мікролегованих марок сталі. Також важлива точність визначення температури з метою забезпечення необхідної структури, механічних властивостей і якісних характеристик прокату.

Перспективна установка CoilBox, в тому числі з індукційної піччю, що дозволяє додатково підвищити температуру і знизити навантаження на прокатне обладнання.

Так, в літературі описаний спосіб розрахунку втрат температури на установці CoilBox, який враховує втрати на кожному витку. Даний спосіб представляє інтерес, однак, методика розрахунку і розрахункові залежності в роботі не наведено. Також необхідна перевірка похибки, одержаної при використанні даного методу, так як загальна похибка моделі за даними становить понад 6%. У той же час, були досліджувані технології в широкому діапазоні температур, в тому числі, в двофазній області, що дозволяє застосовувати модель для процесів низькотемпературної контрольованої прокатки.

Точність математичних моделей, розроблених різними вченими, мають відмінності, що пов'язано з різною структурою моделей, підходами і методами розрахунку.

Так, запропонований адаптований спосіб розрахунку, похибка якого не перевищує 3,4% по клітям, в порівнянні з неадаптованих, похибка якого становила до 6% від фактичних даних, по силі прокатки. В роботі загальна похибка моделі також визначена розрахунком сили прокатки.

У вигляді самостійного елементу, запропонована температурна модель, похибка якої визначена в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). Так, відхилення температури в роботі, визначена двома способами, становить $4,2^{\circ}\text{C}$, відхилення температури на поверхні двох дослідних листів складало від -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$ і від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ відповідно.

В іншій роботі досліджено вплив швидкісних процесів на температурний перепад по довжині штаби, з урахуванням змотування на установці CoilBox, проте сама залежність не приведена. Також, прийнято, що температура металу, змотаного в рулон, не змінюється.

У той же час, наведені залежності для визначення втрат температури при змотування на CoilBox, які базуються на диференціальному рівнянні теплопровідності. Дані рівняння не враховують втрати температури в процесі змотування і розмотування штаби, що обмежує їх застосування.

Таким чином, існуючі залежності і методи для розрахунку втрат температури на установках CoilBox є спрощеними, не враховують частину факторів і не забезпечують необхідну точність розрахунків. Наявної в літературних джерелах інформації недостатньо для універсального математичного опису процесів охолодження металу в установках CoilBox. Розрахунки, що виконуються інжиніринговими компаніями, мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей для широкого застосування в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки в комплексі з обладнанням CoilBox.

Актуальність даних розрахунків обумовлена застосуванням обладнання CoilBox на ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ», а також його установкою в ході майбутньої реконструкції стану 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

Метою роботи є уточнення методики розрахунку втрат температури металу при використанні обладнання CoilBox, що враховує фактори швидкості руху штаб, довжину рольганга і довжини розкату, з урахуванням умов безперервних станів гарячої прокатки ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» і ПрАТ «ММК ім. Ілліча».

Типова модель розрахунку станів гарячої прокатки включає в себе наступні етапи:

розрахунок розмірів вихідної заготовки, який містить розрахунок питомої витрати металу на прокат, перерахунок розмірів заготовки в гарячому стані;

розрахунок енергосилових параметрів прокатки, який включає розрахунок температурного режиму прокатки, коефіцієнт тертя, справжній опір деформації, силу і момент прокатки;

розрахунок швидкісного режиму прокатки, який включає розрахунок часу прокатки залежно від типу швидкісного режиму, циклу прокатки;

розрахунок середнього квадратичного моменту електродвигуна, який складається з розрахунку моментів по кожному циклу прокатки, середньоквадратичного інтеграла, а також потужності двигуна прокатного стану.

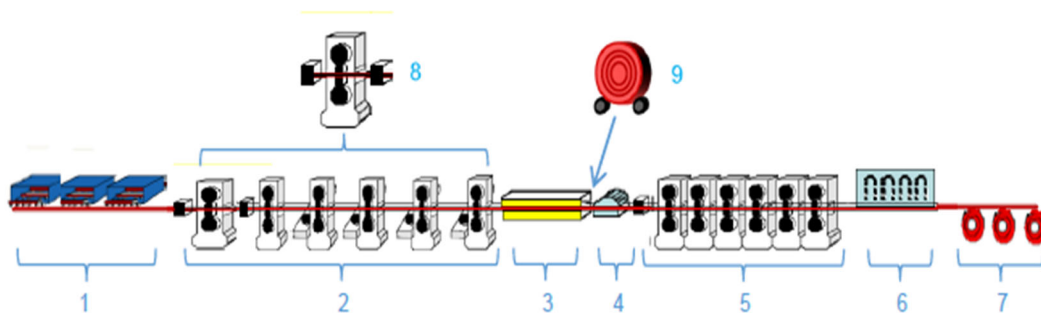
Принципи, викладені в такій структурі розрахунку, є універсальними і можуть бути застосовані для моделювання технології на різних станах гарячої прокатки.

У даній роботі розглянуті особливості моделювання технології гарячої прокатки на безперервних штабових станах на прикладі комплексу обладнання стану 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча», з урахуванням проекту реконструкції (позиції 8 і 9), рис. 3.1. Типовий проект безперервного стану гарячої прокатки, на прикладі стану 1700 ПрАТ «ММК ім. ІЛЛІЧА», наведено на рис. 3.1.

Основне технологічне обладнання безперервних станів може складатися з однієї або декількох універсальних реверсивних клітей або комбінації реверсивних і нереверсивних клітей замість нереверсивної чорнової групи, проміжного перемотувального пристрою типу CoilBox перед чистової групою, також можливі й інші варіанти.

Розрахунок температурного режиму прокатки враховує такі фактори:

- зниження температури розкату за рахунок втрат тепла випромінюванням;
- втрати тепла конвекцією;
- втрати температури при контакті металу з валками;
- падіння температури внаслідок втрат тепла при гідрозбиванні;
- підвищення температури розкату за рахунок енергії деформації.



1 – ділянка методичних печей; 2 – чорнова група клітей; 3 – теплозберігаючі екрани; 4 – летючі ножиці; 5 – чистова група клітей; 6 – установка прискореного охолодження; 7 – моталки; 8 – реверсивна чорнова кліть; 9 – установка CoilBox

Рисунок 3.1 – Схема розташування основного обладнання стану 1700

У нереверсивних клітях чорнової і чистової груп сумарний час, що витрачається на втрати тепла випромінюванням і конвекцією, визначається залежністю:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t$$

де τ – час, що витрачається на прокатку розкату в кліті, с;

τ_t – час, транспортування розкату між клітями чорнової групи, с.

При розрахунку чистової групи, у формулі параметр τ_t замінюється на τ_{t1} – час транспортування розкату між клітями чистової групи, с;

При цьому, для чорнової групи, де прокатка здійснюється послідовно в кожній кліті, час, що витрачається на прокатку τ , визначається розрахунком швидкісного режиму прокатки.

Час транспортування розкату між клітями чорнової групи, визначається залежністю:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{V_r}$$

де V_r – швидкість руху штаб по рольгангу, м/с;

l_r – довжина рольганга, м;

l – довжина розкату, що транспортується, м, за умови $l_r > l$.

Для чистової групи, де прокатка здійснюється одночасно в декількох клітях, час, що витрачається на прокатку в кліті, визначається за формулою:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000};$$

де l_g – довжина дуги контакту, мм;

v_{roll} – швидкість прокатки, м / сек.

Час транспортування розкату між клітями чистової групи визначаємо за залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{V_{roll}},$$

Розрахунок втрат температури металу при змотуванні розкату на установці CoilBox визначається з рівняння Ю.В. Коновалова і В.В. Кисіля:

$$\Delta t = k_{uk} \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \cdot \frac{\tau_c}{h_c},$$

де h_c - товщина рулону, мм;

t_o - температура розкату, який надходить на установку CoilBox, °C;

t_c - тривалість технологічної операції, с;

K_{uk} - коефіцієнт, який визначається, згідно рекомендацій за графіком [9]

Перетворивши графік [9] для визначення коефіцієнта k_{uk} , отримуємо залежність, **рис. 3.2**:

$$k_{uk} = \frac{(2.0284 \ln(t_o) - 12.195)}{1000}$$

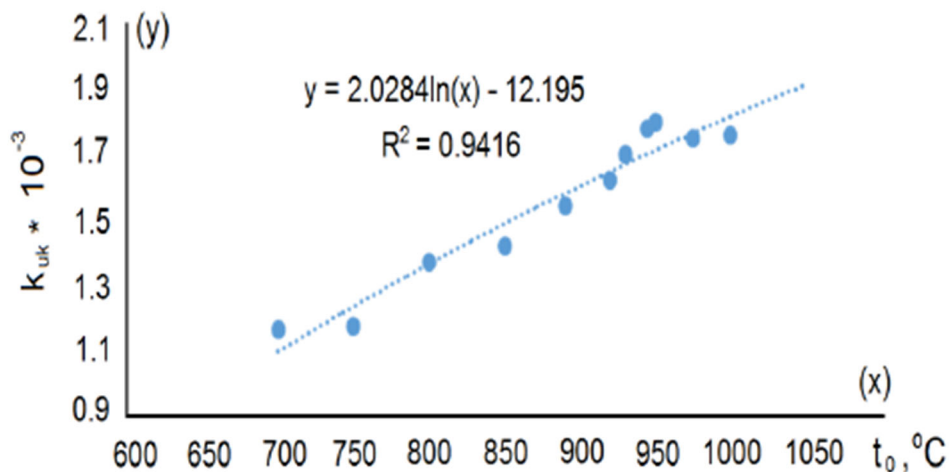


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт залежності k_{uk} ,

З урахуванням залежності (5.6), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox має вигляд:

$$\Delta t_1 = \left[\frac{\left(\frac{2.0284 \ln(t_o) - 12.195}{1000} \right) \cdot \left(\frac{\tau_c}{h_c} \right) \cdot (t_o + 273)}{100^4} \right],$$

Тривалість технологічної операції змотування і розмотування рулону визначаємо наступним чином:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p,$$

де L – довжина розкату, мм.

V_w - швидкість змотування, м / с;

V_{uw} - швидкість розмотування, м / с;

T_p - час знаходження змотаного рулону на установці, с.

Товщину рулону визначаємо з рівняння:

$$H \cdot B \cdot L \cdot p = (\pi R^2 - \pi r^2) B \cdot p,$$

де H, B, L - товщина, ширина і довжина змотуваного розкату, мм;

p - щільність стали, 7,85 г / см³;

R - зовнішній радіус рулону після змотування на установці CoilBox, мм;

r - внутрішній радіус рулону, що формується, згідно характеристик установки, мм.

Після перетворення рівняння отримуємо залежність для визначення зовнішнього радіуса рулону:

$$R = \sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2},$$

Товщина рулону, одержуваного після змотування розраховується:

$$h_c = \left(\sqrt{\frac{H \cdot L}{p} + r^2} - r \right) \cdot 1,05$$

де 1,05 - коефіцієнт нещільності змотування.

З урахуванням вищенаведених залежностей, формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox набуває вигляду:

$$\Delta t_1 = \left(\frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12,195)}{1000} \right) \cdot \left(\frac{\frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p}{\left(\sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2} - r \right) \cdot 1,05} \right) \cdot \left(\frac{t_o + 273}{100^4} \right).$$

Слід зазначити, що отримана залежність враховує втрати температури металу в стаціонарному стані змотаного рулону. Для обліку додаткових втрат температури металу від неврахованих факторів (вплив товщина підкату, втрати температури на початковому етапі змотування і в кінці розмотування, вплив ефекту «термоса» при витримці рулону в змотанім стані) виконана обробка масиву розрахункових даних компанії «Primetals». На **рисунку 3.3** наведена зазначена залежність втрат температури від неврахованих факторів.

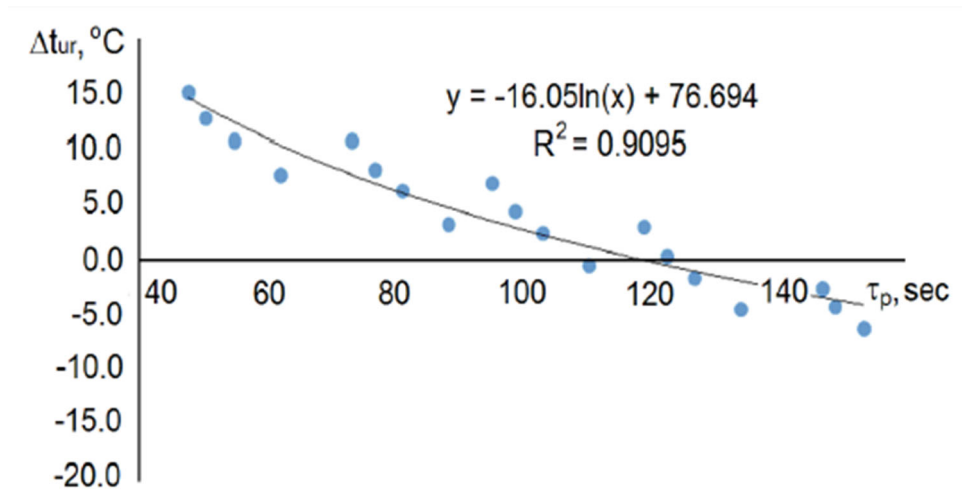


Рисунок 3.3 – Залежність втрат температури від неврахованих факторів, виражених через τ_p

В результаті обробки даних отримана наступна залежність для визначення втрат температури від неврахованих факторів:

$$\Delta t_{ur} = -16.05 \ln(\tau_p) + 76.694.$$

Таким чином, сумарні втрати температури металу після установки CoilBox визначаємо:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur}$$

Зміна температури металу на установці CoilBox в залежності від часу охолодження (зміна швидкості змотування/розмотування) і товщини сформованого рулону, при інших рівних умовах, наведена на **рис. 3.4**

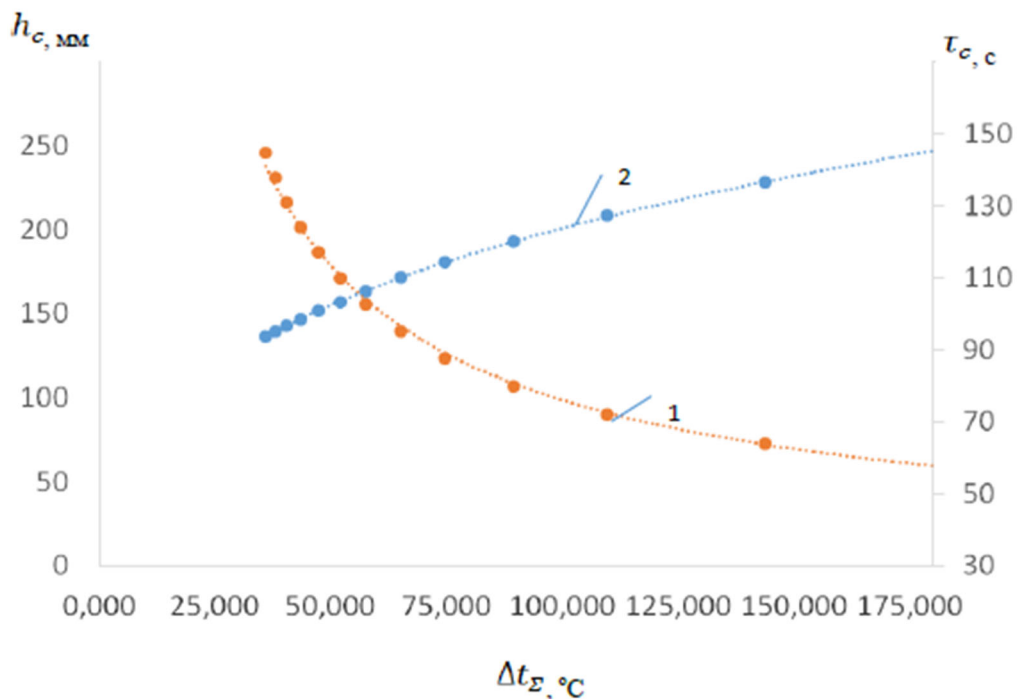


Рисунок 3.4 – Залежність втрат температури від товщини змотаного рулону (1), часу охолодження (2)

Отримані формули застосовні в температурному діапазоні 700-1100°C, часу охолодження рулону на установці від 30 с до 1000 с, для вуглецевих і мікролегованих марок сталей. Для перевірки результатів розрахунків в інших діапазонах потрібно проведення додаткових досліджень.

Відхилення розрахункової температури металу на виході з CoilBox від фактичної склало від - 4,2% до -6,4%, **табл. 3.1**.

Отримані відхилення можуть бути пов'язані з відсутністю інформації про додаткові фактори втрат і місце установки пірометрів для виміру температури.

Також, перевірка виконана на розрахункових даних компанії «Primetals».

Відхилення температури металу на виході з CoilBox, визначено за залежності, від розрахункових даних компанії «Primetals» склало від - 0,91% до 0,39%. Стандартне відхилення склало 2,95 °C.

Перевірка точності розрахунку температурного режиму прокатки з урахуванням залежностей виконана на математичній моделі, адаптованій для умов безперервного стану 1700 ММК «ім. ІЛЛІЧА», **табл. 3.2**.

Таблиця 3.1 – Перевірка залежності для визначення втрат температури металу при змотування на установці CoilBox

$*r$, мм	t_o , °C	L , мм	v_w , м/с	v_{uw} , м/с	$*\tau_p$, с	H , мм	t_1 (факт), °C	h_c , мм	Δt_Σ (факт), °C	τ_c , с	Δt_Σ (расчет), °C	t_1 (расчет), °C	Δ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

*Дані відсутні, прийняті за характеристиками аналогічного обладнання на ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ».

В табл. 3.1 $t_l = t_o - \Delta t_\Sigma$ – температура металу на виході з CoilBox, °C.

В табл. 3.2, t_l – температура розкату після прокатки у відповідній кліті.

Відхилення розрахункових температур прокату від фактичних в кліті 4а чорнової групи і в клітках 6 - 9 чистової групи, за результатами прокатки гарячекатаних рулонів розмірами 1,2x1000 мм зі сталі марки 08пс по ГОСТ 9045 (аналог DC01 по EN 10130), плавка №262753-3 склали від 0,66% до 1,21%.

Таким чином, точність вдосконаленого розрахунку температурного режиму прокатки, в тому числі з використанням обладнання CoilBox, дозволяє його використовувати при проектуванні технології ТМСП.

Таблиця 3.2 – Перевірка розрахунку температурного режиму прокатки

Параметр	Черновая группа	Чистовая группа				
	№ клетки					
	кл4а	кл6	кл7	кл8	кл9	
t_1 (расчет), °C	1068	972	932	885	854	
t_1 (факт), °C	1075	963	921	874	845	
Δ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1	

Контрольні питання

1. Визначення температурного інтервалу обробки тиском.
2. Визначення кількості повітря та продуктів згорання.
3. Загальна будова нагрівальної печі.
4. Розрахунок тривалості нагрівання тонких заготовок.
5. Основи механіки пічних газів.
6. Кладка печей. Вогнетривкі матеріали.

Література до розділу 3: [5, 6, 10, 11]