

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет Материаловедения и металлургических технологий  
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Л.В. Радионова

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тема работы: «Разработка математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-22.03.02-2019-089-00.00.00 ПЗ**

*Руководитель работы:*

\_\_\_\_\_ / М.А. Соседкова /

*Автор работы:*

\_\_\_\_\_ / А.С. Григоренко /

*студент группы П-438*

## Аннотация

Григоренко А.С. Разработка математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками. – Челябинск: ЮУрГУ, П-438, 48 с., 9 ил., 4 табл., 3 графика, библиогр. список – 19 наим, 3 схемы ф. А1.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью разработки математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками.

В выпускной квалификационной работе проанализированы существующие методики расчета температурных режимов в технологическом потоке листовых станов, рассмотрены существующие широкополосные станы горячей прокатки, в том числе, и стан Стеккеля, его преимущества и недостатки, технологическая схема прокатки и оборудование. Разработана методика расчета температурных режимов для станов Стеккеля. Произведен расчет температурных режимов для конкретного стана.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ.....	5
2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ С ПЕЧНЫМИ МОТАЛКАМИ.....	20
2.1. Широкополосные станы горячей прокатки.....	20
2.2. Стан Стеккеля.....	22
2.2.1 Стан Стеккеля фирмы Salem Steel Plant .....	25
2.2.2. Стан Стеккеля фирмы Avesta AB .....	29
2.2.3. Стан Стеккеля на заводе Yieh United Corp.....	31
2.3. Двухклетевой стан Стеккеля ПАО «НКМЗ».....	32
3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА ЛИСТОВЫХ СТАНАХ С ПЕЧНЫМИ МОТАЛКАМИ.....	35
3.1 Математическая модель расчета температурных режимов на листовом стане с печными моталками.....	36
3.2 Математическая модель расчета температурного режима в печных моталках стана Стеккеля.....	40
4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ ДВУХКЛЕТЕВОГО СТАНА СТЕККЕЛЯ.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	48

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире насчитывается около 155 широкополосных станов горячей прокатки разной конструкции с различной технологией проката. Производство горячекатаных полос (рулонов) составляет до 75% всего горячекатаного листового проката. Поэтому необходимо поддержание и повышение уже существующего качества готовой продукции. Температурные режимы являются важной составляющей при разработке и проектировании технологии, так как температура сильно влияет на качество поверхности, точности и механические свойства готового проката.

Широкополосные станы горячей прокатки с моталками в печах являются одним конструктивных и технологических решений для улучшения качества готовой продукции.

В связи с этим целью данной выпускной работы является разработка математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы расчета температурных режимов на широкополосных листовых станах горячей прокатки;
- изучить существующие методы расчета температурных режимов в печных моталках стана Стеккеля;
- рассмотреть технологию и оборудования широкополосных станов горячей прокатки с печными моталками;
- разработать математическую модель температурных режимов на листовых станах с печными моталками;
- произвести расчет изменения температуры при прокатке в стане Стеккеля.

## 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ

При прокатке на качество металла оказывают влияние различные технологические факторы: деформационные и скоростные режимы, и нагрев охлаждение, и особенно изменение температуры в технологической линии стана.

Расчет изменения температуры при прокате листовой горячей стали является одной из главных задач при разработке технологических процессов, и служат основой для анализа и улучшения существующих методов. Из-за существенной неравномерности температуры по длине и сечению раската ухудшаются свойства, качество поверхности полосы, появляются сложности деформирования металла.

На сегодняшний день актуальной задачей является разработка адекватных методик определения температурных режимов в любой точке раската для создания новых технологий листовой горячей прокатки, так и для совершенствования существующих.

Существуют два способа решения температурных задач. В первом случае основанием для статистического анализа данных являются результаты проведенных экспериментальных исследований. А во втором случае зависимость процессов передачи тепла является теоретической. Однако, применение таких моделей, которые были получены статистическим путем очень ограничено, потому что основываются на данных, которые были получены в конкретных условиях. Также они соответствуют определенному типу стана и определенному диапазону изменения параметров прокатки. Второй способ является более оптимальным направлением, чтобы решить задачи, связанные с температурой горячей прокатки. Однако, все уже известные нам модели учитывают различные составляющие части теплового баланса деформируемого металла, некоторые из них достаточно сложны, чтобы

использовать их для инженерных расчетов, а также в системах автоматического управления.

В связи с этим возникла необходимость создания более универсальной модели расчета температурных режимов для разных типов станков, различных металлов и сплавов, учитывающей основные составляющие температурного баланса и умеющие достаточно простую структуру для использования в системах управления температурными и деформационными режимами горячей листовой прокатки.

Методы расчета температурных режимов горячей прокатки предложены в работах известных ученых, таких как В.П. Полухин, М.М. Сафьян, А.П. Чекмарев, Ю.В. Коновалов, Х. Венцель, О. Павельски, И. Шварцер В.А. Тягунов, Ю.Д. Железнов, Зайков, Н.Н. Крейндлиг, А.И. Целиков, Р. Зигель, С.Л. Коцарь, и др [1].

По степени учета влияющих факторов математические способы расчета температурных составляющих можно выделить на 5 групп [2].

1. Методы, основывающиеся на таких зависимостях, которые отражают теплопотери только излучением, но и которые могут иметь в своей структуре эмпирические коэффициенты. При этом данные коэффициенты учитывают влияние других факторов.

2. Методы, которые учитывают уменьшения тепла за счет излучения и повышение температуры в результате пластической деформации металла.

3. Методы, перечисленные по пунктам 1–2, которые учитывают составляющие теплового баланса, а также потери тепла за счет контакта в зоне полоса – валок.

4. Методы, перечисленные по пунктам 1–3 и потери тепла за счет конвекции.

5. Методы, перечисленные по пунктам 1–4 и потери тепла раскатом при прохождении зоны действия гидросбивов.

Рассмотрим более подробно некоторые методы расчета температурных режимов.

М. А. Зайков и В. В. Пудинов в своей методике [3] предположили, что изменение температуры происходит из-за потерь тепла лучеиспусканием и конвекцией. Из этого они вывели суммарное падение температуры металла за пропуск

$$\Delta T = \Delta T_{\text{л}} + \Delta T_{\text{к}} = \Delta T_{\text{л}} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta T_{\text{к}}}{\Delta T_{\text{л}}} \right) = \Delta T_{\text{л}} \cdot m, \quad (1.1)$$

где  $m$  – коэффициент, учитывающий потери тепла полосой за счет конвекции;

$\Delta T_{\text{л}}$  – изменение температуры за счет лучеиспусканием;

$\Delta T_{\text{к}}$  – излучение температуры за счет конвекции.

Потери тепла лучеиспусканием  $\Delta T_{\text{л}}$  определяются на основании закона Стефана – Больцмана

$$\Delta T_{\text{л}} = \frac{\varepsilon \cdot C_0}{G \cdot c} \cdot F \cdot \tau \cdot \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты горячей стали;

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$G$  – вес полосы;

$c$  – истинная теплоемкость металла при температурах прокатки;

$T$  и  $T_0$  – абсолютные температуры тела и окружающей среды;

$F$  – поверхность излучения;

$\tau$  – время охлаждения.

Результаты расчета температуры прокатываемого металла по предложенному методу с использованием теплотехнических зависимостей удовлетворительно совпадают с данными непосредственных измерений при прокатке различных профилей.

Н. Н. Крейндлиг при расчете снижения температуры металла за счет потерь тепла излучением использует несколько другую формулу [4]:

$$\Delta T = \frac{C}{c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \cdot \frac{\tau}{h}, \quad (1.3)$$

где  $C$  – приведенный коэффициент излучения;

$\rho$  – плотность металла;

$c$  – истинная теплоемкость металла при температурах прокатки;

$\tau$  – время прокатки;

$h$  – толщина полосы.

Метод А.И. Целикова учитывает понижение температуры отдачи теплоты излучением и повышение температуры вследствие перехода ее из-за механической энергии деформации в теплоту [5]

$$\Delta t = t_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 \cdot \Pi \cdot \tau}{\omega} + \left( \frac{1000}{t_0 + \Delta t_d + 273} \right)^3}} + 273, \quad (1.4)$$

где  $t_0$  – температура полосы перед входом в рассматриваемый калибр;

$\Pi$  – периметр на выходе из очага деформации поперечного сечения полосы;

$\omega$  – площадь на выходе из очага деформации поперечного сечения полосы;

$\tau$  – время охлаждения раската;

$\Delta t_d$  – повышение температуры полосы в предыдущем калибре.

Величина  $\Delta t_d$  определяется по формуле

$$\Delta t_d = 0,183 \cdot \sigma \cdot \ln \lambda, \quad (1.5)$$

где  $\sigma$  – сопротивление металла пластической деформации;

$\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Х. Венцель в своей методике [6] предложил формулу для расчета повышения температуры за счет деформации

$$\Delta T = 10^3 \cdot \sigma \cdot \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \right), \quad (1.6)$$

где  $h_0$ ,  $h_1$  – толщина полосы до и после прохода, соответственно.



О. Павельски в своей работе [7] показал, что с помощью коэффициента теплопередачи  $k$  можно рассчитать количество тепла, передаваемого от прокатываемого металла к валкам. Коэффициент определяется количеством подведенного тепла, отнесенного к величине контактной поверхности, длительности контакта и перепаду температур между сердцевиной прокатываемого металла и сердцевиной валков.

$$k = \frac{b}{2 \cdot \sqrt{\tau_B}} \cdot \left( \frac{e^{n^2}}{n} [1 - \Phi(n)] - \frac{1}{n} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (1.7)$$

с безразмерным параметром

$$m = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\tau_B}}{b \cdot s}, \quad (1.8)$$

где  $b$  – коэффициент подвода тепла прокатываемым металлом;

$\tau_B$  – длительность контакта;

$\Phi$  – функция погрешности гауссова;

$\lambda$  – коэффициент теплопередачи слоя окалины;

$S$  – толщина слоя окалины;

Выражение для расчета изменения температуры полосы за счет контакта с рабочими валками выглядит следующим образом

$$\Delta T = \frac{2 \cdot k \cdot l_D \cdot B \cdot (t_0 - t_B)}{V_i \cdot \rho \cdot c}, \quad (1.9)$$

где  $l_D$  – длина дуги захвата;

$B$  – ширина полосы;

$t_0, t_B$  – температуры сердцевины металла и валков;

$V_i$  – секундный объем очага деформации на единицу ширины полосы.

Ф. Серединский предложил формулу в которой учитывается контакт металла с рабочими валками [8]

$$\Delta T = \frac{2 \cdot k \cdot (t_0 - t_B)}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot c \cdot v} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot R}{h_0}}, \quad (1.10)$$

где  $\varepsilon$  – относительное обжатие полосы;

$v$  – скорость движения полосы;

$R$  – радиус валков;

$t_0$  – температура полосы;

$t_B$  – температура валков;

$h_0$  – начальная толщина полосы.

Ю. Д. Железнов и Б. А. Цифринович в своем метода [9] провели математическое описание процесса изменения температуры по длине полосы в зависимости от скорости прокатки на базе известных теплотехнических формул [2]. Они предположили, что суммарный тепловой баланс полосы складывается из следующих основных составляющих, которые влияют как на снижение температуры металла при движении его через стан, так и на увеличение. Факторы влияющие на снижение температуры: теплотери металла излучением в окружающую среду, отдача тепла металлом за счет передачи энергии окружающему воздуху, передача тепла за счет теплопроводности при контакте полосы с валками. Увеличение температуры за счет работы, которая расходуется на разогрев металла при пластической деформации. Последний фактор в отличие от этого вызывает практически мгновенный скачок температуры полосы в зеве валков.

Потери тепла нагретым до определенной температуры металлом за счет излучения, согласно закону Стефана–Больцмана, могут быть определены при помощи уравнения

$$dT_u = \frac{\mu}{1,9 \cdot \gamma \cdot c} \cdot \left( \frac{T + 273}{100} \right)^4 \cdot \frac{dt}{h}, \quad (1.11)$$

где  $dt$  – продолжительность излучения ;

$T$  – температура полосы;

$\mu$  – постоянная излучения стали;

$\gamma, c$  – удельный вес и теплоемкость стали;

$h$  – толщина полосы.

Уравнение, описывающее изменение температуры по длине полосы за счет конвективного теплообмена имеет вид

$$dT_{\kappa} = 1,4 \cdot \frac{v^{0,8}}{l^{0,2} \cdot \gamma \cdot c} \cdot T \cdot \frac{dt}{h} \quad (1.12)$$

где  $v$  – скорость движения полосы;

$l$  – длина полосы.

Следует отметить, что уравнения (1.11) и (1.12) описывают, с одной стороны, процесс изменения температуры по длине полосы (с точки зрения наблюдателя, стоящего неподвижно в любой точке стана), а с другой – изменение температуры любой точки полосы в процессе движения через стан (наблюдатель движется рядом с полосой). Таким образом, с помощью этих уравнений может быть получена общая картина процесса охлаждения всех точек полосы на всех стадиях движения: от подката на предклетевом участке до полосы на выходе из стана.

В момент прохождения через очаг деформации металл, соприкасаясь с валками, охлаждается за счет теплоотдачи. Окончательное выражение падения температуры в клети за счет теплоотдачи валкам имеет вид

$$\Delta T_B = 1,83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{R \cdot \arccos \left[ 1 - \frac{h_0 - h_1}{2 \cdot R} \right]}}{h_0 + h_1} \cdot (T - 60) \cdot \sqrt{\frac{1 + S}{v}}, \quad (1.13)$$

где  $R$  – радиус прокатного валка;

$h_0, h_1$  – толщина полосы перед клетью и за ней;

$v$  – скорость полосы на выходе из клети;

$S$  – опережение.

Приняв составляющую, идущую на создание в металле внутренних остаточных напряжений, равной 2% от общей работы деформации, получаем с учетом механического эквивалента теплоты повышение температуры за счет деформации:

$$\Delta T_{\text{оэф}} = 4,12 \cdot p \cdot \lg \frac{h_0}{h_1}. \quad (1.14)$$

Величина  $p$  с учетом достижения уже в первых пропусках (в первых клетях) предела упрочнения может быть определена как

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_u, \quad (1.15)$$

где  $n_{\sigma}$  – коэффициент напряженного состояния;

$\sigma_u$  – истинный предел текучести, определяемый по результатам экспериментальных исследований.

Полученные уравнения (1.11), (1.12), (1.13) и (1.14) дают возможность рассчитать изменение температуры полосы по ее длине в любой точке стана и определить падение температуры при движении полосы через стан.

Результаты проведенных по этим уравнениям расчетов на ЭВМ близки к замеренным на стане значениям. Имеющееся между этими результатами расхождение порядка  $12^{\circ}\text{C}$  не превышает аналогичных отклонений расчетных данных от замеренных, полученных при экспериментально- расчетных исследованиях [10] для ряда непрерывных широкополосных станов. Поэтому полученные уравнения могут служить основой для создания модели изменения температуры полосы при движении в непрерывном стане горячей прокатки.

В. А. Тягунов для расчета снижения температуры металла за счет конвективных потерь тепла предлагает использовать более простое выражение [11]

$$\Delta T = \frac{t_0 \cdot \tau}{240 \cdot h}, \quad (1.16)$$

где  $t_0$  – температура полосы;

$\tau$  – время транспортирования раската по рольгангу;

$h$  – толщина полосы.

И. М. Меерович и другие авторы работы [12] провели исследование непрерывного широкополосного стана. При расчете температурного режима они учитывали следующие статьи теплового баланса: теплопередачу валкам в очаге деформации излучением и конвекцией, охлаждение водой гидросбива, а также тепловыделение при деформации металла.

Изменение температуры полосы за счет ее контакта с рабочими валками определяли по следующей формуле:

$$\Delta t_{\varepsilon} = 0,111 \cdot \frac{t - t_{\varepsilon}}{h_{cp}} \cdot \sqrt{\frac{l}{(2 - \varepsilon) \cdot v_{\varepsilon}}}, \quad (1.17)$$

где  $\Delta t_{\varepsilon}$  – изменение температуры полосы в результате теплопередачи с валками;

$t, t_{\varepsilon}$  – температура полосы и валков, соответственно;

$h_{cp}$  – средняя толщина полосы;

$l$  – длина дуги захвата;

$\varepsilon$  – относительное обжатие;

$v_{\varepsilon}$  – окружная скорость валков.

Изменение температуры полосы вследствие теплопередачи излучением и пластической деформации можно определить, используя известное выражение из работы [13].

Изменение температуры полосы в результате теплопередачи конвекцией  $\Delta t_{\kappa}$  в промежутках между черновыми клетями и на промежуточном рольганге находили по следующей формуле:

$$\Delta t_{\kappa} = \frac{102 \cdot 10^{-6} \cdot t_{cp} \cdot v_n^{0,8} \cdot \tau}{(2 \cdot B)^{0,2} \cdot h_n}, \quad (1.18)$$

где  $t_{cp}$  – среднее значение температуры полосы в промежутке между клетями с учетом теплопередачи излучением;

$v_n, \tau$  – скорость и время транспортирования раската по рольгангу;

$B, h_n$  – ширина и толщина полосы, соответственно.

Изменение температуры полосы в межклетевых промежутках  $\Delta t_m$  чистовой группы клетей определили, применив следующие зависимости:

$$\Delta t_m = \left[ 1,48 \cdot \left( \frac{T_{\text{вых}}}{100} \right)^4 + \frac{t_{\text{вых}} \cdot v_n^{0,8}}{(2 \cdot B)^{0,2}} \right] \cdot \frac{1,35 \cdot 10^{-3} \cdot \tau}{h_n}, \quad (1.19)$$

где  $T_{\text{вых}}, t_{\text{вых}}$  – температура полосы на выходе из клетки в °К и °С соответственно.

Изменение температуры полосы в результате влияния гидросбива окалины  $\Delta t_{zc}$  рассчитывали по эмпирической зависимости:

$$\Delta t_{zc} = 500 \cdot \frac{n}{h_n \cdot v_n}, \quad (1.20)$$

где  $n$  – количество секций гидросбива в установке.

Предложенная теоретическая модель обеспечивает удовлетворительную точность результатов: разница между расчетными и измеренными значениями параметров составляет в среднем по температуре полосы  $\pm 7$  град, по усилию прокатки 8% и по моменту 6%.

О.Г. Музалевский и др. в работе [14] снижение температуры полосы в зоне действия гидросбива рекомендуют определять по уравнению

$$\Delta T = \frac{0,0053}{h_n} \cdot \frac{\alpha \cdot (t_0 - t_a)}{\alpha + 117} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot d}{v_z}}, \quad (1.21)$$

где

$$\alpha = 2,26 \cdot \frac{v_0^{0,8}}{b_z}, \quad (1.22)$$

где  $h_n$  – толщина подката;

$t_0, t_a$  – температура металла и воды;

$d$  – ширина щели сопла гидросбива;

$v_0, v_z$  – скорость истечения воды и движения подката в зоне гидросбива;

$b_z$  – ширина струи при ударе о полосу.

Рабочий диапазон методов расчета, которые представляет каждую из рассматриваемых групп, определяется конкретными условиями прокатки.

Так, использование методов первой группы допустимо только для ориентировочных расчетов температуры при чистовой прокатке полос толщиной более 5 мм в узком скоростном диапазоне. Это объясняется существенным влиянием на величину погрешности расчета переменных по длине полосы скоростных условий прокатки, поскольку изменение скорости приводит к нарушению принятого условия взаимной компенсации неучтенных составляющих теплового баланса.

Методы второй группы завышают расчетные значения температуры на 3...9 %, причем погрешность увеличивается с уменьшением толщины готовой полосы.

Погрешность расчета методик третьей и пятой групп практически не зависит от параметров прокатки.

В работе [1] представлен расчет математической модели изменения температурных режимов. В данной модели учитывается изменение температуры металла непосредственно при его транспортировке, межклетевом промежутке прокатной клетки, а также в подогревающих и охлаждающих устройствах в технологической линии стана.

Общий вид математической модели для определения изменения температуры полосы в технологическом потоке прокатного стана можно посмотреть по формуле ниже

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t n_j + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t p_k + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t n_l - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t o o_z, \quad (1.23)$$

где  $t_{i-1}$  – температура металла в точке предыдущего расчета или начальная температура;

$\Delta t n$  – потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировки в линии стана;

$\Delta t p$  – разогрев металла в процессе его деформации;

$\Delta t n$  – повышение температуры металла в подогревающих устройствах технологического потока стана;

$\Delta t o o$  – понижение температуры металла в охлаждающих устройствах стана;

$i = \overline{1, n}$  – факторы, влияющие на изменение температуры раската;

$j = \overline{1, n_1}$  – факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана;

$k = \overline{1, n_2}$  – факторы, вызывающие разогрев раската в процессе пластической деформации;

$l = \overline{1, n_3}$  – подогревающие устройства в линии прокатного стана;

$z = \overline{1, n_4}$  – охлаждающие установки в линии прокатного стана.

Конкретизировав вышеперечисленные факторы, влияющие на изменение температуры полосы в процессе прокатки и транспортировки ее в линии стана, получим готовую формулу для расчета температуры полосы на выходе из  $i$ -ой клетки [1]:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{из} - \Delta t_{кон} - \Delta t_{рол} - \Delta t_{вал} - \Delta t_{ар} + \Delta t_{деф} + \Delta t_n - \Delta t_{ох}, \quad (1.24)$$

где  $t_{i-1}$  – температура на выходе из предыдущей клетки или температура начального нагрева заготовки в нагревательном устройстве;

$\Delta t_{из}$  – потери температуры за счет излучения тепловой энергии в межклетевом промежутке;

$\Delta t_{кон}$  – потери температуры за счет конвективного теплообмена с окружающей средой в межклетевом промежутке;

$\Delta t_{рол}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена с роликами рольганга;

$\Delta t_{вал}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками в очаге деформации;

$\Delta t_{ар}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена с привалковой арматурой;

$\Delta t_{деф}$  – разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения;

$\Delta t_n$  – повышение температуры в подогревающем устройстве;

$\Delta t_{ох}$  – понижение температуры в охлаждающем устройстве.

Потери температуры полосы за счет контакта с роликами рольганга и привалковой арматурой малы по сравнению с другими составляющими уравнения, поэтому при практических расчетах эти составляющие можно не



учитывать. А конкретные формулы расчета  $\Delta t_{из}$ ,  $\Delta t_{кон}$ ,  $\Delta t_{вал}$ ,  $\Delta t_{деф}$  приведены в работе [1].

Коновалов Ю.В. и Хохлов А.С разработали расчет теплового режима печной моталки стана Стеккеля [15].

Число витков определим по уравнению:

$$n_6 = \frac{D_1}{2 \cdot H} + \frac{L}{2 \cdot \pi}, \quad (1.25)$$

где  $D_1$  – диаметр барабана моталки;

$H$  – толщина полосы;

$L$  – длина полосы.

Для определения на сколько градусов произошел нагрев полосы в моталке необходимо определить радиус намотанной полосы, для этого используется уравнение:

$$R_1 = \frac{D_1}{2} + \frac{L \cdot H}{2 \cdot \pi}, \quad (1.26)$$

где  $R_1$  – радиус полностью смотанной полосы на барабан моталки.

Если число витков в рулоне в данный момент времени обозначить  $k$ . То уравнение, описывающее количество тепла, полученное наружной поверхностью внешнего  $k$ -го витка рулона за время  $d\tau$ , имеет вид:

$$dQ_{квверх} = \varepsilon_m \cdot \sigma_0 \cdot F_{верх} \cdot \left( \left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \cdot d\tau, \quad (1.27)$$

где  $\varepsilon_m$  – степень черноты прокатываемого металла;

$\sigma_0$  – коэффициент излучения абсолютно

$F_{верх}$  – площадь наружной поверхности расчетного витка рулона;

$T_{печ}$  – температура печи стана Стеккеля;

$T_k$  – температура  $k$ -го витка;

$d\tau$  – малый промежуток времени.

Площадь наружной поверхности  $k$ -го витка рулона:

$$F_{\text{вепх}} = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot r_k, \quad (1.28)$$

где  $b$  – ширина наматываемой полосы;

$r_k$  – радиус  $k$ -го витка.

Количество тепла, полученное внутренней поверхностью внутреннего (первого) витка рулона за  $d\tau$ :

$$dQ_{\text{иннж}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda \cdot (T_{\text{онп}} - T_1)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{\text{онп}}}\right)} \cdot d\tau, \quad (1.29)$$

где  $T_{\text{онп}}$  – температура оправки;

$T_1$  – температура внутреннего (первого) витка;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности металла;

$r_1$  – радиус внутреннего (первого) витка;

$r_{\text{онп}}$  – радиус оправки.

Количество тепла, отданного с наружной поверхности  $j$ -го витка рулона за время  $d\tau$ :

$$dQ_{\text{jevpx}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda \cdot (T_j - T_{j+1})}{\ln\left(\frac{r_{j+1}}{r_j}\right)} \cdot d\tau, \quad (1.30)$$

где  $T_j$  – температура  $j$ -го витка оправки;

$T_{j+1}$  – температура  $(j+1)$ -го витка;

$r_j$  – радиус  $j$ -го витка;

$r_{j+1}$  – радиус  $(j+1)$ -го витка.

За время  $d\tau$  количество тепла, отданного с внутренней поверхности  $j$ -го витка равно количеству тепла отданного с наружной поверхности  $(j-1)$ -го витка:

$$dQ_{\text{инни}} = -dQ_{\text{j-1евpx}}, \quad (1.31)$$

Таким образом, изменение температуры  $j$ -го витка за время  $d\tau$  составит:

$$d\tau = \frac{-(dQ_{\text{жидк}} + dQ_{\text{в перх}})}{C_m \cdot m_j} \cdot d\tau, \quad (1.32)$$

где  $m_j$  – масса j-го витка;

$C_m$  – удельная теплоемкость металла.

Масса j-го витка:

$$m_j = \pi \cdot \rho_m \cdot b \cdot h \cdot (2 \cdot r_j - h), \quad (1.33)$$

где  $\rho_m$  – плотность металла.

Таким образом, в данной главе мы рассмотрели методики расчета температурных режимов, изучили методы расчета температурных условий в печной моталке стана Стеклоля. Данный анализ поможет нам в 3 главе при разработке математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ С ПЕЧНЫМИ МОТАЛКАМИ

Листовой прокат в больших объемах потребляется всеми отраслями промышленности. Причем к его различным видам предъявляются разнообразные сложные требования. Поэтому вопросы его производства и соответствующей технологии имеют громадное значение для страны.

### 2.1. Широкополосные станы горячей прокатки

Основными объектами для производства листовой стали являются широкополосные станы горячей прокатки (ШСГП). 65 – 70% всего листового проката производят на этих станах. Крупнейшими ШСГП в нашей стране являются станы 2000 ММК, Северстали и Новолипецка, а также стан 2500 ОАО «ММК». Интересно отметить, что за примерно 90 лет своего существования эти станы сохранили свою первоначальную конфигурацию – наличие участка нагревательных устройств, черновой и чистовой группы клетей, промежуточного рольганга, отводящего рольганга и моталок. На рисунке 2.1 представлены схемы расположения оборудования ШСГП разных поколений [18].

Такая компоновка оказалась весьма удачной, хотя и периодически возникали серьезные проблемы. Как известно, в 50-х годах в мире началось постепенное внедрение непрерывного литья слябов и заготовок. Масса слябов возросла с 5–10 тонн до 36–45 тонн. Это революционное развитие стало возможным благодаря применению технологии прокатки с ускорением в чистовой группе (рисунок 2.1) Реализовать такой режим позволил достигнутый уровень систем автоматизации скоростного режима.

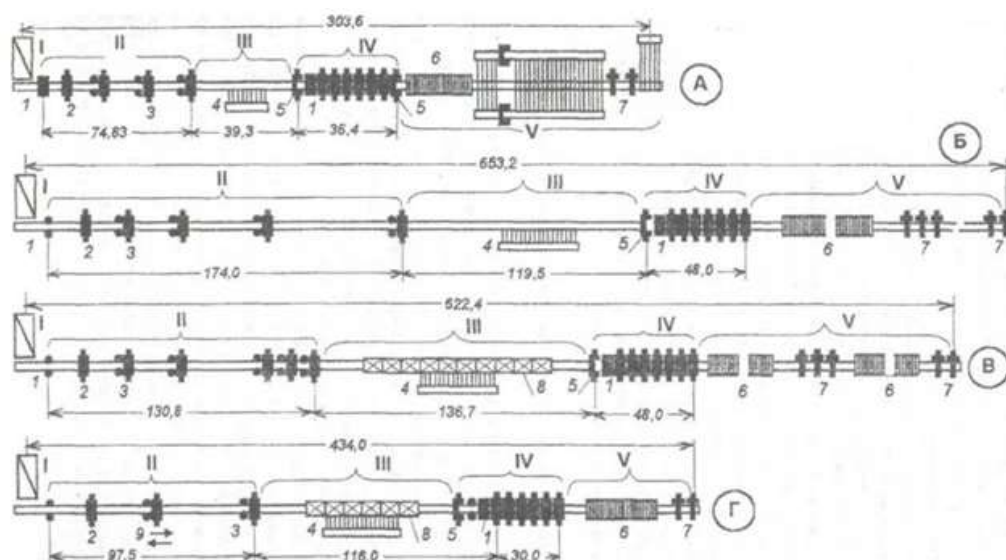


Рисунок 2.1. Схема расположения оборудования ШСГП различных поколений:

А – 1450 ММК (1951 г.); Б – 2000 НЛМК (1969 г.); В – 2000 ММК (1975 – 1994); Г – 1680 «Синнипонсэйтэцу», Япония (1982); I – печи методические; II – черновая группа; III – рольганг промежуточный; IV – чистовая группа; V – рольганг отводящий; 1 – окалиноломатель; 2 – клеть рабочая; 3 – клеть рабочая универсальная; 4 – карман для недокатов; 5 – ножницы летучие; 6 – установка ускоренного охлаждения; 7 – моталка; 8 – экран теплозащитный; 9 – клеть рабочая реверсивная

Создание и развитие ШСГП фактически явилось результатом революционных достижений в технике и технологии листовой прокатки. Само появление ШСГП обязано реализации высокоточных автоматических систем управления скоростью рабочих валков чистовых клетей. Следующий революционный скачок – это освоение и внедрение в качестве полупродукта непрерывнолитых слябов. Следующее революционное достижение – это создание тонкослябовых литейно-прокатных агрегатов, которые исключили необходимость черновой прокатки при производстве листов.

Сортамент широкополосных станов также существенно развивался от минимальной толщины с 2,0 до 1,0 мм и даже до 0,8 мм. А также в сторону толстых полос – с 14 до 16 мм и до 25 мм. Расширение линейки сортамента ШСГП было обусловлено его экономичностью – минимальными расходным коэффициентом и затратами энергии. Параллельно с широкополосными

развивались и толстолистовые станы – одно- и двухклетевые. Одним из последних достижений толстолистовой прокатки – это строительство и успешное освоение станов 5000 на ОАО «ММК» и в г. Выкса [18]. На рисунке 2.2 показана схема расположения оборудования стана 5000 ОАО «ММК».

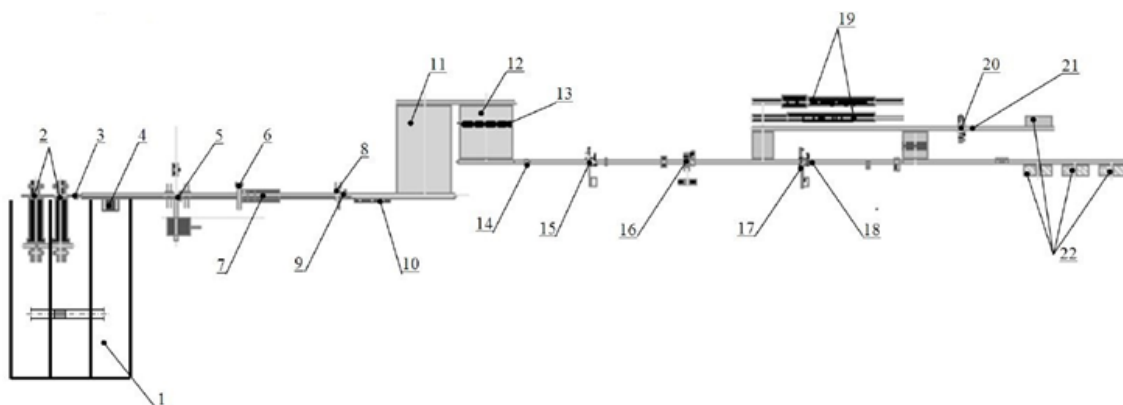


Рисунок 2.2. Схема расположения оборудования стана 5000 ОАО «ММК»:

1 – склад слябов; 2 – нагревательные печи; 3 – первичный гидросбив окалины; 4 – карман для листов свыше 50 мм; 5 – рабочая клеть; 6 – роликотправильная машина №1 (горячей правки); 7 – установка ускоренного охлаждения; 8 – роликотправильная машина №2; 9 – клеймитель; 10 – карман ПФО (противофлокеного охлаждения); 11 – холодильник; 12 – инспекторский стол; 13 – кантователь; 14 – ультразвуковой контроль; 15 – ножницы поперечной резки (для обрезки торцов); 16 – ножницы продольной резки; 17 – ножницы №2 поперечной резки (для порезки на мерные длины); 18 – маркировщик; 19 – термические печи; 20 – роликотправильная машина №3 (холодной правки); 21 – маркировщик; 22 – карманы

## 2.2. Стан Стеккеля

Благодаря достижениям металлургического машиностроения были реализованы новые технические решения производства полос (рулонов). Стан Стеккеля является одним из приоритетных направлений развития производства широкополосных горячекатаных полос (рулонов).

Реверсивные листопркатные станы с печными моталками, расположенные спереди прокатной клетки и позади нее называют станом Стеккеля. Благодаря наличию моталок в подогревающих печах на стане при

прокатке листа можно решить две основные задачи: поддержать температуру прокатки и уменьшить количество рольгангов, так называемые раскатные поля.

Производство рулонов и полос на станах Стеккеля значительно меняет экономику и уступает только технологии непрерывного литья тонких слябов.

Одним из основных элементов стана Стеккеля является печная моталка, которая является главным достоинством стана. Благодаря ее применению можно поддерживать температуру прокатки в заданном уровне и убрать рольганги большой длины.

В настоящее время стан Стеккеля определяют, как специализированный стан для производства проката из труднодеформируемых, высоколегированных, электротехнических марок сталей с небольшим объемом производства. Такое количество специальных сталей на ограниченном рынке требуется только в исключительно редких случаях. Для этого необходимы производственные агрегаты с годовым объемом производства около 500 тыс. т. В связи с этим целесообразно использовать другую технологию. Для регионального рынка применение стана Стеккеля является экономически выгодным решением, идея которого заключается в чистовой прокатке в реверсивном режиме [16].

Предприятия выбирают стан Стеккеля по следующим причинам:

- низкие затраты на строительство;
- низкие издержки производства для прокатки широких полос в рулонах;
- производство более широкого сортамента по ширине и толщине полос;
- очень хорошее качество поверхности листа по сравнению с обычными широкополосными листопрокатными станами;

Всего насчитывается 3 поколения станов Стеккеля. Первый стан такого типа был запущен в 1923 году. Станы первого поколения были предназначены для производства стали при объемах 300 – 500 тыс. т/год.

Основными недостатками стана 1-го поколения являются: остывание концов полос, которые остаются на задающих роликах (вне печи) и недостаточное качество поверхности металла из-за образования большого

количества окалины и увеличенного угара за счет многократного нагрева металла в печных моталках. В начале 60-х годов прошлого столетия эти станы строить перестали.

В 1984 года разработали и запустили станы Стеккеля второго поколения. В отличие от старых станом первого поколения было усовершенствовано оборудование и технологии по всей линии стана. Это позволило расширить сортамент. Так начали прокатывать коррозионностойкие, трубные, автомобильные, электротехнические полосы шириной до 2500 мм, толщиной от 1,5 до 20 мм. Но проблему с остыванием концов полосы так и не была решена.

В конце 90-х годов был разработан стан 3-го поколения. Было увеличено годовое производство стана до 1,25 млн. т. за счет расширения сортамента прокатываемого рулона по толщине от 1,4 до 50 мм и шириной до 3500 мм. Такое стало возможно благодаря применению новых систем автоматизации и оборудования в линии стана. Станы достаточно дешевые, производительные и компактные по сравнению с толстолистовыми и широкополосными станами горячей прокатки.

Создание новых моталок в печах стало важным техническим решением, которое позволило сматывать полосы в рулон толщиной до 40 мм.

Благодаря применению новых печных моталок обеспечивается равномерная температура по всей длине полосы. Это позволяет уменьшить усилие прокатки при прохождении переднего и заднего концов полосы. В результате увеличивается выход годного, механические свойства готового проката и точность размеров [17].

Стан Стеккеля состоит с одной или более чистовыми реверсивными клетями и двумя моталками в печах, рольгангов, участка охлаждения водой и моталки.

На рисунке 2.3 представлен классический принцип Стеккеля, состоящий из одной реверсивной клетки кварто 4 с расположенными моталками в печах 1 по обе стороны от нее. Между печными моталками и клетью расположено роликотвое тянущее устройство 3 для транспортировки листа (полосы).



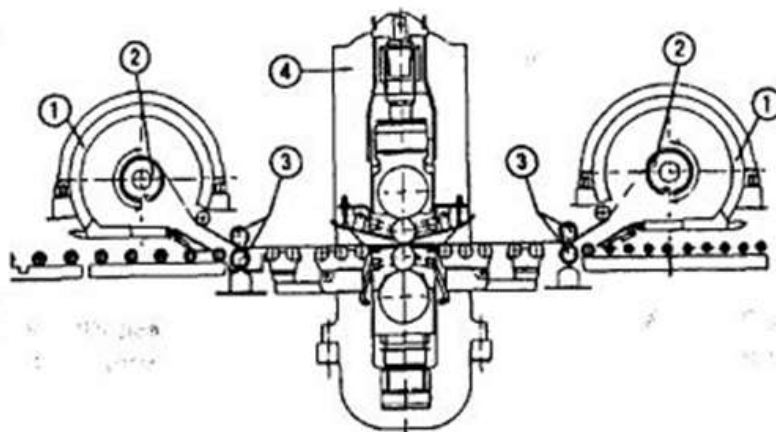


Рисунок 2.3. Одноклетевой стан Стэккеля:

1- печная моталка; 2 — оправка; 3 – задающие ролики; 4 –клеть кварто

### 2.2.1 Стан Стэккеля фирмы Salem Steel Plant

В 1995 году был введен в эксплуатацию стан горячей прокатки полосы Стэккеля фирмы Salem Steel Plant [16]. Он является одним из самых современных из действующих станов. На рисунке 2.4 представлена схема расположения оборудования.

Годовое производство стана составляет 98 тыс.т. В результате ввода эксплуатацию дополнительной нагревательной печи в будущем планируется увеличение производства до 196 тыс. т/год.

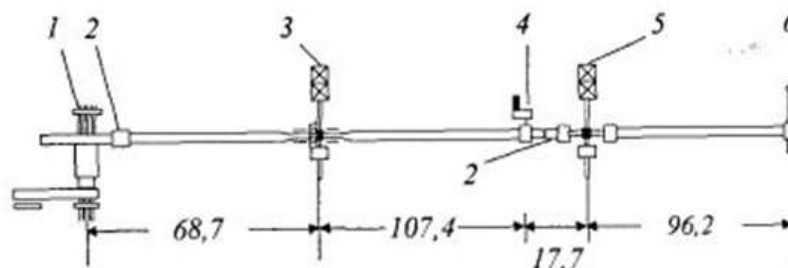


Рисунок 2.4. Схема расположения оборудования стана Стэккеля для прокатки коррозионностойких сталей:

1 — печь; 2 — гидросбив окалины; 3 — четырехвалковая клеть с эджерной клетью; 4 — ножницы; 5 — четырехвалковая реверсивная чистовая клеть Стэккеля с печными моталками до и после клетки; 6 — конечная моталка

На сегодняшний день на стане производят полосу из углеродистых и коррозионностойких сталей толщиной от 2,0 до 8,0 мм. Максимальный размер рулона составляет 1800 мм, а максимальная относительная масса – 15,7 кг/мм. В таблице 2.1 приведен сортамент и программа стана [16].

Таблица 2.1

Сортамент и программа стана Стеккеля фирмы Salem Steel Plant

Характеристика	Сталь	
	углеродистая	коррозионно-стойкая
Размеры слябов, мм толщина ширина длина	140...210 600...1300 5000...10500	140...190 600...1275 5000...10500
Толщина, мм подката готовой полосы	25 2...12,7	25 2...8
Конечная скорость прокатки, м/с	10	10
Масса рулона, т	15	15
Производительность печи, т/ч	55...60	55...60

Слябы доставляют со склада краном на приемный стол, где передают в загрузочное окно нагревательной печи. Перед нагревательной печью слябы взвешивают. После слябы перемещают загрузочным устройством в камеру нагревательной печи.

Из окна выгрузки нагретые слябы захватывают вытягивающей машиной и доставляют на стол выдачи. Далее они поступают на черновую линию стана.

Черновая линия состоит из реверсивной четырехвалковой эджерной клетки, рольгангов и боковых направляющих. Для последующей прокатки на стане Стеккеля слябы прокатывают в черновой клетки за несколько проходов до необходимой ширины и толщины.

При выгрузке сляба из печи он останавливается на рольганге перед эджерной реверсивной клетью, где центрируется боковыми направляющими. После каждого прохода сляб тормозят и центрируют на стороне выхода. Происходит реверс клетки и сляб разгоняют и транспортируют к реверсивной клетке обратно. При этом происходит настройка зазора между валками.

После прокатки во втором проходе сляб тормозят перед эджерной клетью на рольганге с учетом его длины и сигналов системы слежения за материалом. Далее полосу реверсируют и катают до тех пор, пока раскат не будет готов к прокатке в стане Стеккеля.

В чистовую линию входят барабанные ножницы для удаления концов полосы, четырехвалковая клетка и две моталки в печах и вспомогательное оборудование. Далее перед клетью располагается гидросбив окалины и тянущие ролики. Для автоматического отрезания концов полосы, скорость подката снижается от скорости работы черновой клетки до работы ножниц. После удаления концов полосы, ее заправляют для прохождения первого прохода в стан Стеккеля.

После заправки переднего конца полосы во входную щель, моталки, расположенные в печах стана на стороне входа в стан Стеккеля и выхода из него, разгоняются до скорости прокатки. После прохода они притормаживаются до скорости заправки и ножницами можно удалить задний конец полосы. После завершения проката конца полосы устанавливается необходимый зазор между валками, моталки и прокатная клетка останавливаются.

Для прохождения второго прохода клетка реверсируют, и печь с моталкой на входе стана начинает сматывать прокатываемую полосу. После завершения последнего прохода полоса уходит ниже моталки в печи на сторону выхода и приходит на приемную моталку.

В конце рольганга приемная моталка, оборудованная тянущими роликами, которые направляют полосу в моталку и обеспечивают требуемое натяжение.

Снимают рулоны с моталки с помощью тележки для перевозки. На первом транспортере с шагающими балками и со встроенной машиной для обвязки передают рулоны к механизму для поднятия и вращения, которое перемещает их на уровень пола цеха. Другой транспортер с шагающими балками транспортирует рулоны к приемным стендам, где их передают при помощи крана. В транспортере установлены весы для взвешивания рулонов. В таблице 2.2 представлена техническая характеристика оборудования стана фирмы Salem Steel Plant [16].

Таблица 2.2

Техническая характеристика оборудования стана фирмы Salem Steel Plant

Обжимная клеть: Эджер: размеры валков, мм мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	1000/950x435 2x900 0...2,24/7,0
Четырехвалковая клеть: размеры валков, мм: рабочих опорных мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	1050/950x1475 1350/1250x1425 2x3500 0...3,3/7,7
Ножницы: диаметр барабана, мм мощность двигателя, кВт окружная скорость, м/с	1000 750 1...2,5
Печные моталки: диаметр барабана, мм мощность двигателей, кВт окружная скорость, м/с	1350 2x650 0...5/10

Клеть Стеккеля: размеры валков, мм: рабочих опорных мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	750/680x1825 1350/1250x1425 2x4500 0...5,5/10
Подпольная моталка: тянущие ролики: диаметр, мм верхнего нижнего мощность двигателей, кВт окружная скорость, м/с барабан: диаметр, мм мощность двигателя, кВт окружная скорость, м/с	900 400 2x60 0...5/11 727...762 400 0...11

### 2.2.2. Стан Стеккеля фирмы Avesta AB

В 1991 году введен в эксплуатацию прокатный стан Стеккеля фирмы Avesta AB. На рисунке 2.5 представлена схема расположения оборудования.

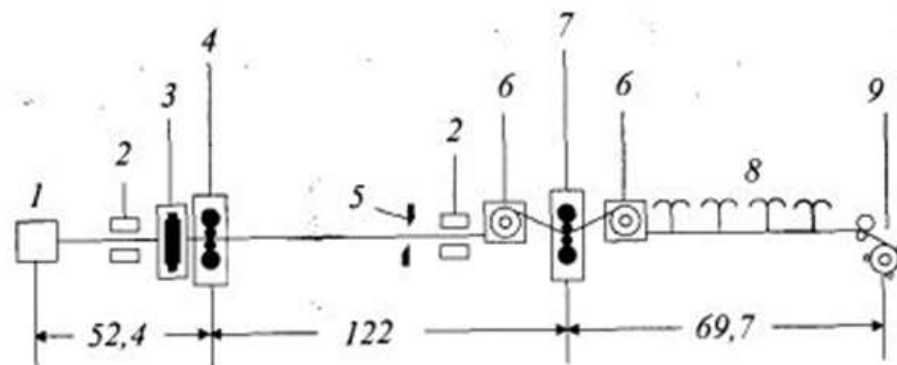


Рисунок 2.5. Схема расположения оборудования стана Стеккеля фирмы Avesta:

1 — печь; 2 — гидросбив окалины; 3 — эджерная клеть; 4 — четырехвалковая реверсивная черновая клеть; 5 — ножницы; 6 — печная моталка; 7 — четырехвалковая реверсивная чистовая клеть; 8 — участок ламинарного охлаждения; 9 — конченная моталка

На стане Стеккеля установлено гидравлическая система позиционирования валков с автоматическим регулированием толщины и осевого перемещения валков, а также противоизгиба валков. Температура в печах контролируется, и регулируются при помощи контроллеров последовательного действия.

Продукция, произведенная на стане фирмы Avesta AB из коррозионнстойкой стали с установленными современными системами удовлетворяет по экономичности производства и по качеству продукции.

В таблице 2.3 приведен сортамент и программа прокатки фирмы Avesta AB.

Таблица 2.3

Сортамент и программа прокатки фирмы Avesta AB

Характеристика	Сталь	
	углеродистая	коррозионно-стойкая
Размеры слябов, мм толщина ширина длина	200...250 800...1600 5000...13500	150...200 800...1600 5000...13500
Толщина, мм подката готовой полосы	32 2...16	32 2...8
Конечная скорость прокатки, м/с	11	11
Масса рулона, т	30	30
Мощность печи, т/ч	175	150

В таблице 2.4 приведены технические характеристики стана Стеккеля фирмы Avesta AB [16].

## Техническая характеристика оборудования стана фирмы Avesta AB

Обжимная клеть: Эджер: размеры валков, мм мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	1000/950x435 2x900 0...2,16/4,8
Четырехвалковая клеть: размеры валков, мм: рабочих опорных мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	1200/1080x1800 1450/1300x1800 2x5000 0...2,5/5
Ножницы: диаметр барабана, мм мощность двигателя, кВт окружная скорость, м/с	900 950 1...2,5
Печные моталки: диаметр барабана, мм мощность двигателей, кВт окружная скорость, м/с	1350 2x1000 0...7,1/16
Клеть Стеккеля: размеры валков, мм: рабочих опорных мощность двигателей, кВт скорость прокатки, м/с	750/680x2200 1450/1300x1800 2x5600 0...5,5/13,3
Подпольная моталка: тянущие ролики: диаметр, мм верхнего нижнего мощность двигателей, кВт окружная скорость, м/с барабан: диаметр, мм мощность двигателя, кВт окружная скорость, м/с	900 400 2x250 0...6,28/18,85 727...762 600 0...16,7

## 2.2.3. Стан Стеккеля на заводе Yieh United Corp

Производительность стана 600 тыс. т/год, был введен в эксплуатацию в 1994 г. Производство коррозионностойкой стали оставляет около 50%, остальное углеродистые и трубные стали. На стане можно производить толстый

лист. Стан работает по новой технологии и обеспечивает прокатку листов (полос) шириной до 1650 мм. На стане установлена система гидравлической установки валков, система осевого перемещения и противоизгиба. Температуру в печах с моталками также контролируют с помощью контроллеров последовательного действия [16].

### 2.3. Двухклетевой стан Стеккеля ПАО «НКМЗ»

На рисунке 2.6 представлена схема одной из перспективных разработок компании ПАО «НКМЗ» двухклетевой стан Стеккеля

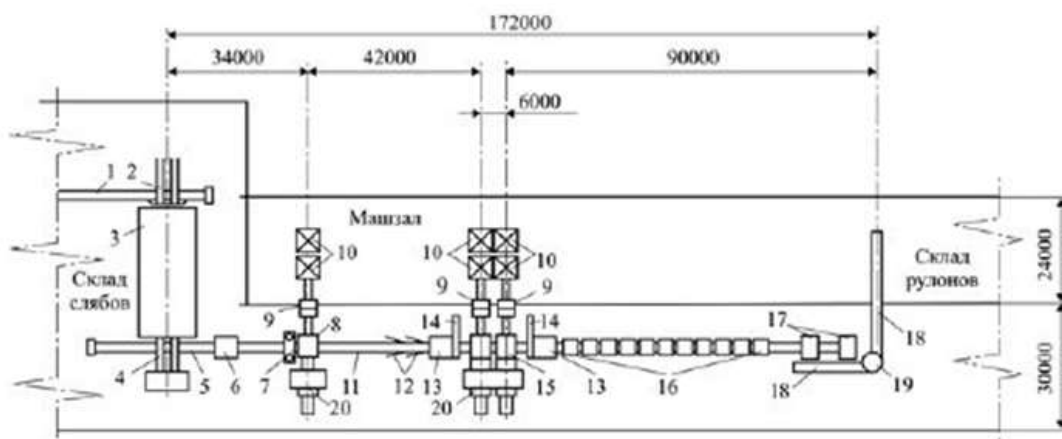


Рисунок 2.6. Схема двухклетевого стана Стеккеля компании ПАО «НКМЗ»:

1 – подводящий рольганг; 2 – толкатель; 3 – нагревательная печь; 4 – устройство выдачи слябов; 5 – транспортный рольганг; 6 – гидросбив; 7 – вертикальные валки; 8 – черновая реверсивная клетя дуо; 9 – главная муфта; 10 – электродвигатели; 11 – промежуточный рольганг; 12 – направляющие линейки; 13 – печные моталки; 14 – ножницы; 15 – двухклетевая реверсивная группа клетей кварто; 16 – отводящий рольганг; 17 – моталки; 18 – транспортер; 19 – поворотное устройство; 20 – устройство перевалки валков

За счет наличия двух клетей обжимная способность увеличивается, угар на металле уменьшается, потери металла снижаются, число аварий уменьшается за счет уменьшения числа захватывания концов полосы в моталках.



За счет создания новых моталок в печах на ПАО «НКМЗ» была разработана новая схема прокатки на стане Стеккеля. На рисунке 2.7 представлена данная схема прокатки.

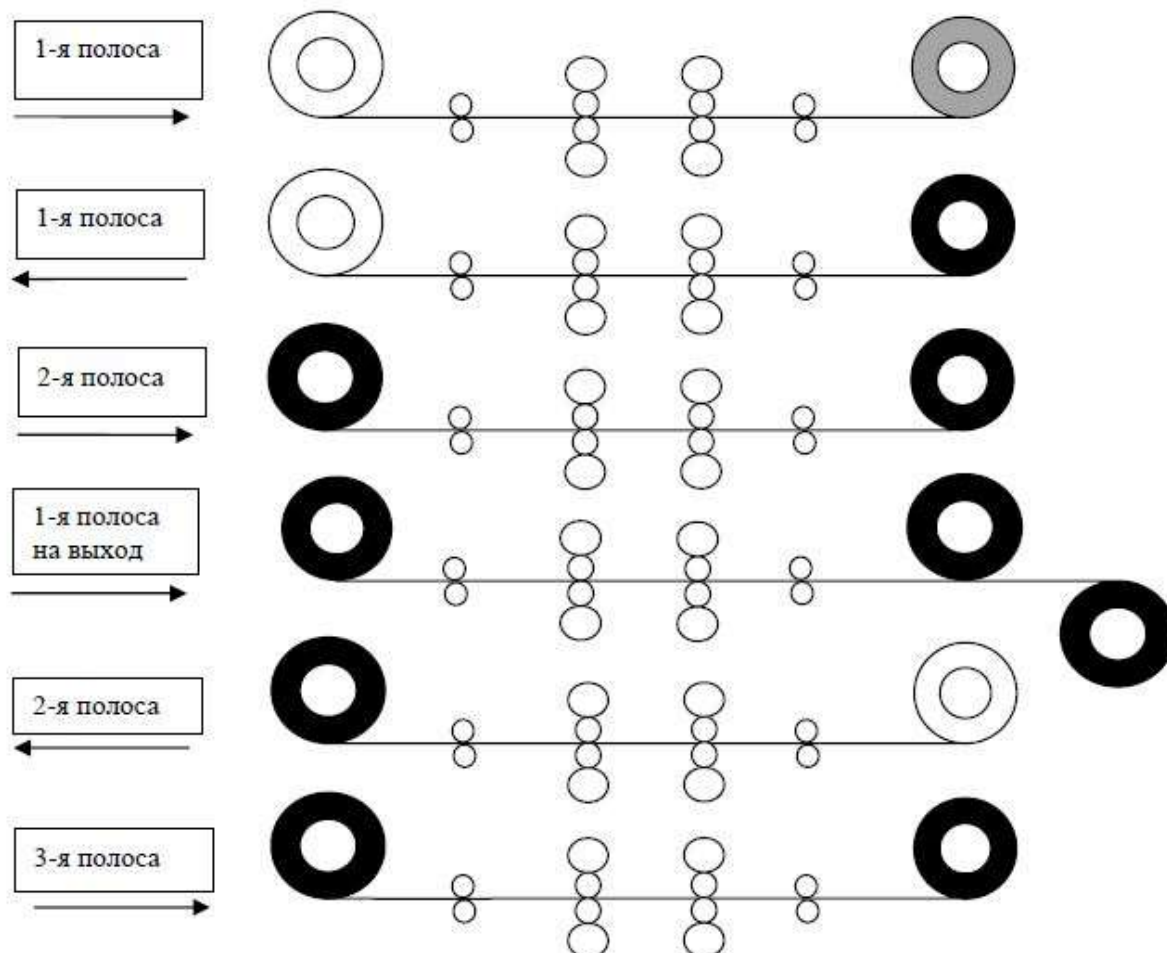


Рисунок 2.7. Схема прокатки в двухклетевом стане Стеккеля

Технология прокатки на стане Стеккеля происходит следующим образом: Первый подкат заходит в клеть стана Стеккеля, проходит задающие ролики перед двухклетевой группой, прокатывается в ней и через задающие ролики позади клетей поступает по приподнятой направляющей проводке, сматывается в печную моталку, расположенную позади клетей. В роликах остается задний конец полосы. Происходит реверс валков и начинается прокатка обратно с полной смоткой первой полосы в переднюю печную моталку и с выдержкой в ней. Пока первая полоса выдерживается в печи, поступает в клетки вторая полоса, выполняется 1 проход и сматывается в задней печной моталке

полностью, выдерживается в ней. После этого 1 полосу разматывают из печной моталки, расположенной спереди стана, происходит 3 последний проход и по отводящему рольгангу с помощью уже опущенной проводке полоса уходит со стана. После уже нагретую 2 полосу прокатывают во втором проходе и сматывают в печной моталке, расположенной спереди клетей, далее на стан поступает третья полоса и все действия по очередности повторяются.

Благодаря этому создаются хорошие температурные условия для прокатки. Колебания прокатки сводятся к минимуму. Работа систем автоматики облегчается. Формируется равномерная структура металла [17].

### 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА ЛИСТОВЫХ СТАНАХ С ПЕЧНЫМИ МОТАЛКАМИ

Для получения качественного готового продукта, анализа существующих технологий, а также разработки новых технологий листовой прокатки необходимо математическое моделирование температурных режимов.

При разработке температурных режимов очень важно выбрать температуру нагрева прокатываемого металла перед деформацией, но и также важно определять температуру полосы в главных точках технологической линии стана. При этом наиболее важной эта задача является при выборе оптимальных технологий, проектирования и компоновке оборудования прокатных станов, т.к. температура металла определяет свойства и структуру готового проката.

Модель, которая была разработана нами, учитывает изменение температуры в прокатных клетях и межклетевых промежутках, в подогревающих устройств, а также при транспортировке металла в линии стана. Данная модель изменения температуры может быть применена для различных прокатываемых материалов и может использоваться при разработке технологии для любого типа листового стана.

Существует много различных методик расчета температурных режимов, но встала необходимость адаптировать существующие методики для расчета температурных режимов на листовых станах с печными моталками.

В работе представлена математическая модель расчета температурных режимов в технологическом потоке двухклетевого стана Стеккеля с печными моталками. Схема стана Стеккеля представлена на рисунке 3.1.

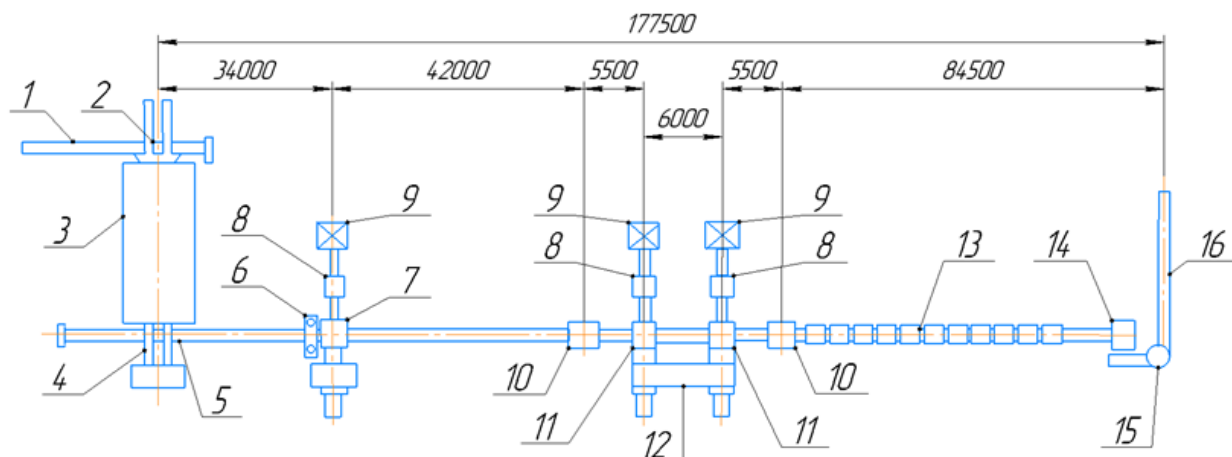


Рисунок 3.1. Схема расположения оборудования двухклетевого стана Стекла: 1 – подводящий рольганг; 2 – толкатель; 3 – нагревательная печь; 4 – устройство выдачи слябов; 5 – транспортный рольганг; 6 – вертикальные валки; 7 – черновая реверсивная клеть дуо; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – печная моталка; 11 – клеть кварто; 12 – устройство для перевалки валков; 13 – отводящий рольганг; 14 – моталка; 15 – поворотное устройство; 16 – транспортер;

### 3.1 Математическая модель расчета температурных режимов на листовом стане с печными моталками

Для определения температуры полосы в технологическом потоке прокатного стана воспользуемся общей формулой модели, описанной в литературе [19] и адаптируем ее под данный процесс.

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t n_j + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t p_k + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t n_l, \quad (3.1)$$

где  $\Delta t n$  – потери температуры в процессе прокатки и транспортировки в линии стана;

$\Delta t p$  – разогрев полосы в процессе его деформации;

$\Delta t n$  – повышение температуры в подогревающих устройствах технологического потока стана;

$i = \overline{1, n}$  – факторы, влияющие на изменение температуры раската;

$j = \overline{1, n_1}$  – факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана;

$k = \overline{1, n_2}$  – факторы, вызывающие разогрев раската в процессе пластической деформации;

$l = \overline{1, n_3}$  – подогревающие устройства в линии прокатного стана.

Проанализировав факторы, влияющие на температуру металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана, получим формулу для расчета изменения температуры металла в  $i$ -ой точке технологического процесса [1].

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{uz} - \Delta t_{кон} - \Delta t_{конт} + \Delta t_{деф} + \Delta t_n, \quad (3.2)$$

где  $t_{i-1}$  – температура полосы в  $(i-1)$ -ой точке технологического процесса;

$\Delta t_{uz}$  – потери температуры за счет излучения тепловой энергии;

$\Delta t_{кон}$  – потери температуры за счет конвективного теплообмена с окружающей средой;

$\Delta t_{конт}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена;

$\Delta t_{деф}$  – разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения;

$\Delta t_n$  – повышение температуры в подогревающем устройстве (в нашем случае в печах моталок).

После выхода заготовки из печи при ее транспортировке к первой реверсивной клетки происходит падение температуры за счет излучения и конвекции.

Изменение температуры за счет излучения найдем по формуле

$$\Delta t_{uz} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot (h_3 \cdot b_3 + (h_3 + b_3) \cdot l_3) \cdot \frac{l_{mp}}{v_{mp}}}{c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3 \cdot b_3} \cdot \left[ \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.3)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\xi$  – степень черноты поверхности металла;

$\rho$  – плотность металла;

$l_3, h_3, b_3$  – длина, высота, ширина заготовки, соответственно;

$v_{mp}$  – скорость транспортировки заготовки;

$l_{mp}$  – расстояние транспортировки;

$t_n$  – температура нагрева заготовки в печи;

$t_c$  – температура окружающей среды;

$c$  – теплоемкость металла.

Изменение температуры за счет конвекции можно найти по формуле

$$\Delta t_{кон} = \frac{0,045 \cdot \left( \frac{4 \cdot v_{mp} \cdot (h_3 \cdot b_3)}{(h_3 + b_3) \cdot v_6} \right)^{0,62} \cdot \lambda_6 \cdot (h_3 + b_3) \cdot (h_3 \cdot b_3 + (h_3 + b_3) \cdot l_3) \cdot \frac{l_{mp}}{v_{mp}}}{(h_3 \cdot b_3) \cdot c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3 \cdot b_3} \cdot (t_n - t_c), \quad (3.4)$$

где  $\lambda_6$  – коэффициент теплопроводности воздуха;

$v_6$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Прокатка полосы в реверсивной черновой клетки дуо происходит за несколько проходов. При прокатке происходит падение температуры не только за счет излучения и конвекции на раскатных полях стана, но и за счет теплообмена с валками, также происходит нагрев металла за счет энергии деформирования.

Изменение температуры за счет излучения в реверсивной клетки дуо находится по формуле [1]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot \left( \tau_n + \frac{l_1}{v_1} \right)}{c(t_0) \cdot \rho} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \cdot \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.5)$$

где  $l_0, h_0, b_0$  – начальная длина, высота, ширина полосы на входе в клеть, соответственно;

$l_1$  – длина полосы на выходе из очага деформации;

$c(t_0)$  – теплоемкость металла;

$v_1$  – скорость полосы на выходе из очага деформации;

$\tau_n$  – время паузы при реверсе полосы;

$t_0$  – температура полосы на входе в клеть.

Изменение температуры конвекцией при прокатке в реверсивной клетки дуо найдем по формуле [1]

$$\Delta t_{кон} = \frac{1,32 \cdot \lambda_{\epsilon} \cdot \sqrt{\frac{v_1}{v_{\epsilon} \cdot b_0}} \cdot \left( \tau_n + \frac{l_1}{v_1} \right)}{c(t_0) \cdot \rho} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \cdot (t_0 - t_c), \quad (3.6)$$

При горячей листовой прокатке потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками в очаге деформации определяются [1].

$$\Delta t_{\epsilon ал} = \frac{\alpha_{\epsilon}}{c(t_0) \cdot \rho \cdot v_1} \cdot \frac{(b_0 + b_1) \cdot \sqrt{R \cdot (h_0 - h_1)}}{h_1 \cdot b_1} \cdot (t_0 - t_{\epsilon}), \quad (3.7)$$

где  $\alpha_{\epsilon}$  – коэффициент теплопередачи между полосой и рабочими валками;

$R$  – радиус рабочих валков;

$h_1, b_1$  – толщина и ширина полосы на выходе из клетки, соответственно;

$t_{\epsilon}$  – температура рабочих валков.

Разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения при горячей листовой прокатке определим по методике Х. Венцеля [6].

$$\Delta t_{\text{деф}} = 10^3 \cdot \sigma \cdot \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \right) \cdot \frac{1}{(c \cdot \rho)}, \quad (3.8)$$

где  $\sigma$  – сопротивление металла пластической деформации, МПа.

За то время пока полоса идет из черновой реверсивной клетки дуо к стану Стеккеля, в межклетевом промежутке стана Стеккеля, в промежутках между моталками и клетями происходит падение температуры за счет излучения и конвективного теплообмена с окружающей средой.

Изменение температуры за счет излучения определяется по формуле [1].

$$\Delta t_{\text{из}} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi}{c(t_0) \cdot \rho \cdot v_0} \cdot \left( \frac{(h_0 + b_0) \cdot l}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{2} \right) \cdot \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.9)$$

где  $v_0$  – скорость полосы на входе в клетки и моталки стана Стеккеля;

$l$  – расстояние движения полосы между клетями стана и от печных моталок до клетки.

Изменение температуры за счет конвективного теплообмена можно найти по формуле [1].

$$\Delta t_{\text{кон}} = \frac{1,32 \cdot \lambda_g}{c(t_0) \cdot \rho \cdot \sqrt{v_g} \cdot b_0 \cdot v_0} \cdot \left( \frac{(h_0 + b_0) \cdot l}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{2} \right) \cdot (t_0 - t_c), \quad (3.10)$$

Для расчета изменения температуры в стане Стекла за счет разогрева при деформации полосы и контактного теплообмена с валками можно воспользоваться формулами (3.7) и (3.8).

### 3.2 Математическая модель расчета температурного режима в печных моталках стана Стекла

Для анализа изменения температуры полосы в подогревающем устройстве (печи моталок) определим температуру полосы по сечению рулона (то есть температуру каждого витка). Логично предположить, что существует разница температур верхней и нижней поверхности полосы в рулоне. На рисунке 3.2 представлена полоса, намотанная на барабан.

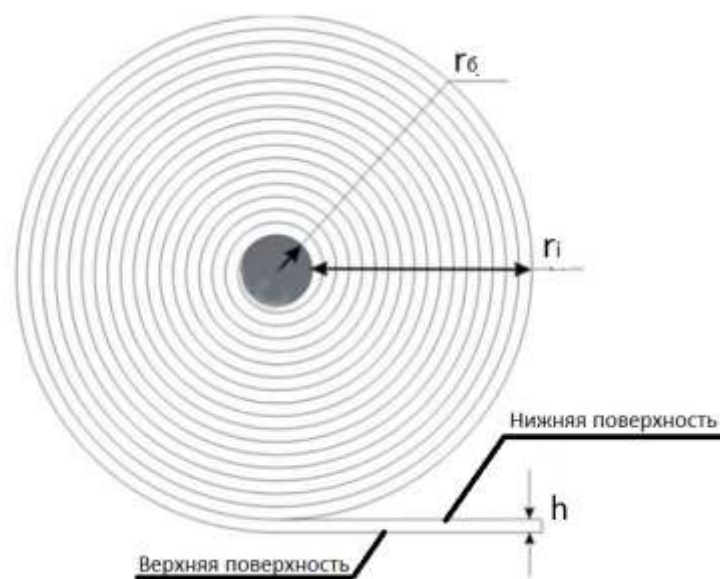


Рисунок 3.2. Полоса, намотанная на барабан печной моталки стана Стекла.

Обозначим:  $r_0$  – радиус барабана,  $r_i$  – текущий радиус рулона,  $h$  – толщина полосы.

Количество витков найдем по формуле



$$n = \frac{-2 \cdot \pi \cdot r_0 + \pi \cdot h + \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot r_0 - \pi \cdot h)^2 + 4 \cdot \pi \cdot h \cdot l_1}}{2 \cdot \pi \cdot h}, \quad (3.11)$$

Текущий радиус рулона определим по формуле

$$r_i = r_0 + i \cdot h, \quad (3.12)$$

где  $i$  – номер витка, сматываемого на барабан.

Длину  $i$ -го витка найдем по формуле

$$l_{\sigma i} = 2 \cdot \pi \cdot r_i, \quad (3.13)$$

Площадь поверхности полосы  $i$ -го витка найдем по формуле

$$F_i = b \cdot l_{\sigma i}, \quad (3.14)$$

где  $b$  – ширина полосы.

Массу  $i$ -го витка найдем по формуле

$$G_i = b \cdot l_{\sigma i} \cdot h \cdot \rho, \quad (3.15)$$

где  $\rho$  – плотность металла.

Время смотки каждого  $i$ -го витка определим из формулы

$$\tau_{cmi} = \frac{l_{\sigma i}}{v_{cm}}, \quad (3.16)$$

где  $v_{cm}$  – скорость смотки полосы.

Температуру нижней поверхности  $i$ -го витка определим по уравнению

$$t_i^H = t_0 + \Delta t_{\text{конт}}, \quad (3.17)$$

где  $t_0$  – температура полосы на входе в печную моталку;

$\Delta t_{\text{конт}}$  – изменение температуры за счет контакта между  $i-1$  и  $i$  витками, которое зависит от температуры поверхности предыдущего витка.

Изменение температуры контакта найдем по формуле

$$\Delta t_{\text{конт}} = \frac{\alpha \cdot F_i \cdot \tau_j}{c \cdot G_i} \cdot (t_{i-1}^s - t_0), \quad (3.18)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;

$t_{i-1}^s$  – температура предыдущей верхней поверхности витка;

$\tau_j$  – время нахождения  $i$ -го витка в печи

$$\tau_j = \sum_{i=j}^n \tau_{cmi}, \quad (3.19)$$

Температуру верхней поверхности  $i$ -го витка определим из уравнения

$$t_i^6 = t_0 + \Delta t_{изл}, \quad (3.20)$$

где  $\Delta t_{изл}$  – изменение температуры полосы за счет излучения в атмосфере печи.

Температуру излучения найдем по уравнению

$$\Delta t_{изл} = \frac{C_0 \cdot \xi \cdot F_i \cdot \tau_{cmi}}{c \cdot G_i} \cdot \left[ \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.21)$$

где  $t_n$  – температура атмосферы печи.

Среднюю температуру витка найдем по формуле

$$t_i^{cp} = \frac{t_i^6 + t_i^H}{2}, \quad (3.22)$$

Среднюю температуру по рулону начнем по формуле

$$t_p^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{cp}}{n}, \quad (3.23)$$

#### 4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ ДВУХКЛЕТЕВОГО СТАНА СТЕККЕЛЯ

Приведен расчет температурных режимов в технологическом потоке стана Стеккеля. Расчет проведен для стали 12Х18Н10Т, размер полосы входящей в стан 18х1500х40000 мм, температура входа полосы в стан Стеккеля  $t_0 = 950^{\circ}\text{C}$ .

Схема расположения оборудования стана приведена на рисунке 3.1. Разработана программа в среде Excel расчета температурных режимов по приведенной в главе 3 методике.

Расчет показан с момента, когда полоса из черновой реверсивной клетки дуо с определенной температурой входит в стан Стеккеля, прокатывается в двух клетях и сматывается в задней печной моталке, далее происходит реверс валков и полоса двигается в обратном направлении, проходит 3 и 4 проходы и сматывается в передней печной моталке, после этого завершает процесс, пройдя последние 5 и 6 проходы, и уходит на моталку.

За время сматывания полосы на барабан верхняя поверхность каждого витка сначала контактирует с атмосферой печи излучением, а после с нижней поверхностью следующего намотанного витка, нижняя поверхность первого витка будет контактировать с поверхностью барабана, а нижняя поверхность последующих витков будет контактировать с верхней поверхностью предыдущих намотанных витков.

На графиках 4.1 и 4.2 представлены результаты расчета изменения температуры в задней и передней печных моталок.

График 4.1

Изменение температуры в задней печной моталке

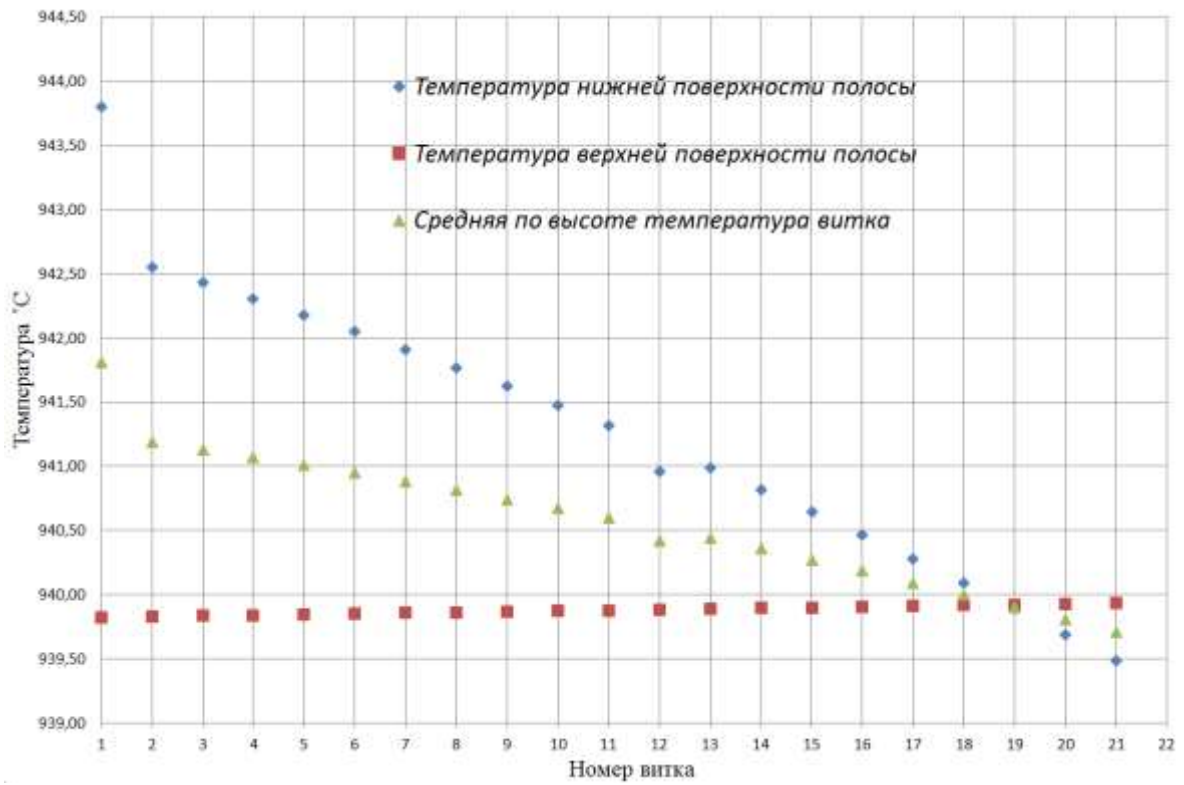
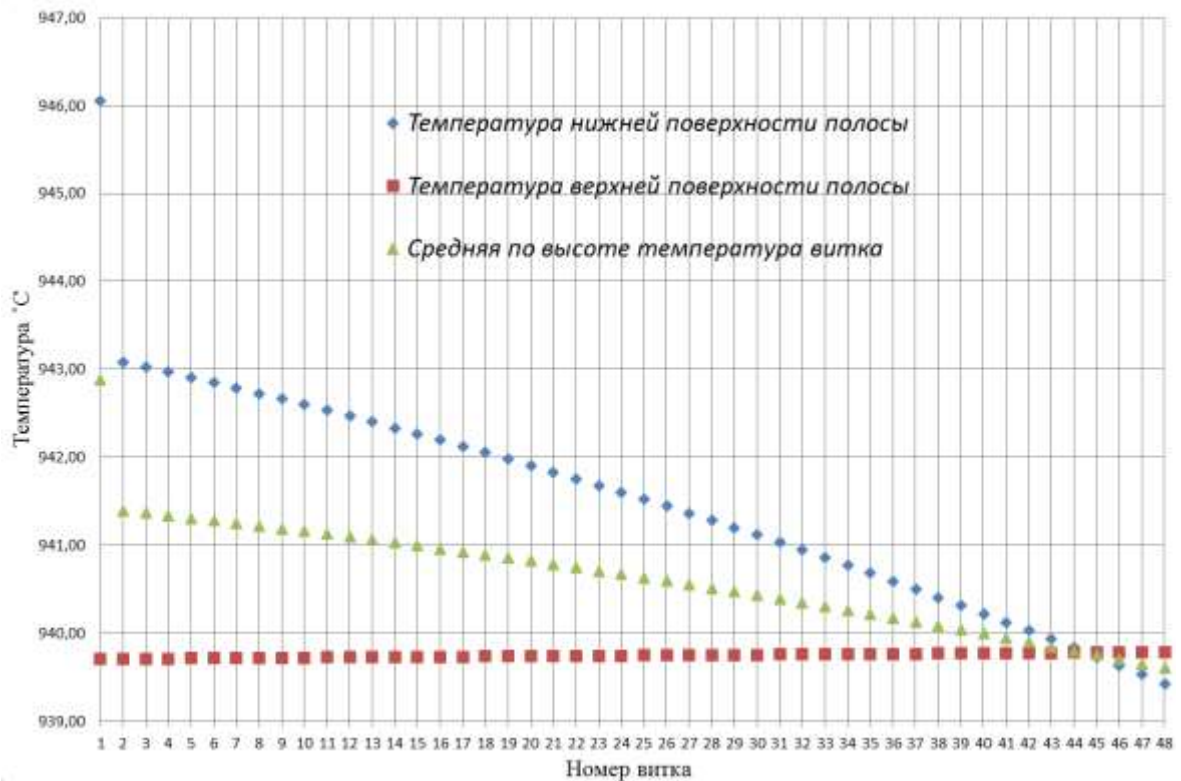


График 4.2

Изменение температуры в передней печной моталке



Из графиков 4.1 и 4.2 видно, что повышение температуры верхней поверхности полосы за счет излучения в основном происходит из-за увеличения излучаемой поверхности полосы, а увеличение температуры за счет контактного теплообмена между витками происходит из-за увеличения времени нахождения витка в печи. Первый виток нагревается чуть больше, так как контактирует непосредственно с барабаном, температура которого значительно больше, чем температура сматываемой полосы.

Видно, что по сечению полосы разница температур между нижней и верхней поверхностями не существенная, поэтому можно использовать среднюю по высоте полосы температуру.

По сечению рулона видно, что температура изменяется в пределах для задней печной моталки от 931,71 до 941,81 °C, а в передней печной моталке от 939,60 до 942,88 °C, но для инженерных расчетов можно использовать среднюю по рулону температуру.

На графике 4.5 показано изменение температуры в стане Стеккеля по ходу прокатки.

График 4.5



На графике 4.3 видно, что температура за время прокатки находится примерно на одном уровне, что хорошо сказывается на качестве полосы. Видно, что за то время пока полоса прокатывается, температура увеличивается за счет энергии пластической деформации. Полоса не успевает остыть за счет излучения и конвекции, так как имеет место большая скорость прокатки и небольшое расстояние между клетями и печными моталками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалифицированной работы являлась разработка математической модели температурных режимов на листовых станах с печными моталками.

В выпускной квалификационной работе проанализированы существующие методики расчета температурных режимов в технологическом потоке листовых станов, рассмотрены существующие широкополосные станы горячей прокатки, в том числе, и стан Стеккеля, его преимущества и недостатки, технологическая схема прокатки и оборудования. Разработана методика расчета температурных режимов для станов Стеккеля. Произведен расчет температурных режимов для конкретного стана.

Таким образом, все задачи выпускной квалификационной работы можно считать выполненными, а цель достигнутой.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sosedkova, M.A. Mathematical model of hot rolling temperature parameters/ M.A. Sosedkova, L.V. Radioniva, T.A. Lisovskaya //Solid State Phenomena, 2017. – Т. 265 SSP. – С.1026 – 1033.
2. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник /Ю.В. Коновалов, А.Л.Остапенко, В.И.Понамарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
3. Зайков М.А., Пудинов В.В. //Изв. ВУЗов. Черная металлургия– 1962. – № 6. – С. 81 – 90.
4. Крейндлин, Н.Н. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургиздат, 1970. – 408 с.
5. Смирнов, В.К. Калибровка прокатных валков /В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
6. Венцель Х. //Прокатка и прокатное оборудование. ВИНТИ. Экспресс-информация. – 1965. – № 27. – С. 8 – 43.
7. Павельски, О. Расчет температурного режима в чистой группе широкополосного стана горячей прокатки// Черные металлы. –1969. №21. –С.13 – 17.
8. Serebinski F. //Journal of the Iron and Steel Institute. – 1973. – № 3. – р. 197 – 203.
9. Железнов Ю.Д., Цифринович Б.А. //Изв. вузов. Черная металлургия. – 1968. – № 9. – С. 105 – 111.
10. Lee P.W., Sims R.B., Wright H. //JISI. – 1963. – № 3. – р. 270 – 275.
11. Тягунов, В.А. Рациональная калибровка листовых станов. – М.: Металлургиздат, 1944. – 196 с.
12. Меерович И.М., Франценюк И.В., Железнов Ю.Д. и др. //Сталь. – 1977. – № 2. – С. 151 – 154.
13. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Металлургиздат, 1967. – 306 с.



14. Музалевский О.Г., Бурдин В.М., Кирюхин В.И. и др. // Сталь. – 1970. – № 3. – С. 246 – 250.
15. Коновалов, Ю.В. Расчет теплового режима печной моталки стана Стеклая / Ю.В. Коновалов, А.С. Хохлов // Обработка материалов давлением, 2012.-№4. – С.249 – 252.
16. Салганик, В.М., Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос. учеб. пособие / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
17. Коновалов, Ю.В. Новые схемы прокатки на станах с печными моталками / Ю.В. Коновалов, Д.А. Голощатов, А.С. Хохлов // Обработка материалов давлением, 2011. – №3. – С.133 – 135.
18. Салганик, В. М. Современные технологии производства листового проката / В. М. Салганик // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 353-358.
19. Дубинский, Ф.С. Моделирование температурных режимов с целью оптимизации сортовой прокатки / Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: труды XIV International scientific conference. – Ченстохова (Польша), 2013. – С. 353 – 357.