

Глава 18. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПОКАТКЕ НА МЕЛКОСОРТНОМ ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ

Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия, E-mail: psipsi@mail.ru

Введение

Тепловой режим прокатки в чистовом блоке и траектория охлаждения после прокатки в значительной мере определяют механические свойства катанки.

Применение регулируемого междеформационного охлаждения позволяет приблизиться в чистовом блоке клетей к режимам контролируемой прокатки, термомеханической обработки и двухфазной прокатки, которые существенно расширяют возможности стана в получении высоких потребительских свойств продукции.

В ходе последеформационного охлаждения в стали протекают фазовые превращения и формируется ее структура. Для получения требуемой структуры и свойств сталей, различных марок необходимо проводить охлаждение по оптимальной для каждой марки траектории. Например, для сталей эвтектоидного состава оптимальное охлаждение позволит получить сорбитную структуру, при повышенных температурах в структуре появляется крупнодисперсный перлит, а при пониженных – бейнит [1-14].

Исследования проводились в условиях стана 150 ОАО «БМК» (рис. 1). Снижение температуры прокатки в чистовом блоке достигается за счет водяного охлаждения раската перед ним. Последеформационное двухстадийное охлаждение готовой катанки осуществляется в водяных и воздушных секциях. Определение температуры катанки до и после чистового блока, а также на виткоукладчике проводится оптическим пирометром.

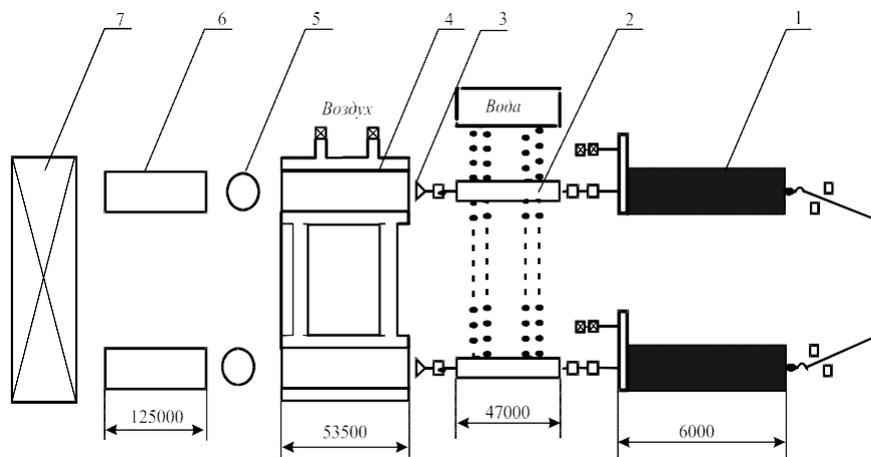


Рисунок 1 – Расположение технологического оборудования стана 150:

- 1 – 10- клетевой чистовой блок; 2 – участок водяного охлаждения;
- 3 – виткоукладчик; 4 – участок воздушного охлаждения; 5 – виткосборник;
- 6 – транспортер; 7 – участок упаковки катанки

Так как оптимальные траектории охлаждения для сталей разных марок существенно отличаются, система охлаждения должна обеспечивать возможность регулирования теплосъема в широком диапазоне и с высокой точностью. На водяном участке линии охлаждения происходит интенсивное охлаждение металла до температуры вблизи точки Ag_3 . Поскольку охлаждение на этом участке ведется с очень высокой скоростью, по сечению проката возникает значительная температурная неоднородность. Эта неоднородность сохраняется и в ходе последующего полиморфного превращения, приводя к структурной неоднородности по сечению [15, 16]. Поэтому одна из основных задач, которую необходимо решить при

проектировании участка охлаждения - снижение температурной неоднородности по сечению катанки.

Разработка модели процесса охлаждения

Расчет динамики тепловых полей – классическая задача математической физики. Для ее решения необходимо определить начальные условия – распределение температур по сечению тела, и граничные условия – тепловой поток с поверхности (граничные условия второго рода) или температуру поверхности (граничные условия третьего рода). Известно, что задача теплопроводности не имеет точного аналитического решения ни в элементарных функциях, ни в квадратурах. Приближенные аналитические методы (например, метод Фурье) позволяют решать задачу теплопроводности только для некоторых определенных начальных и граничных условий.

Наиболее эффективным способом расчета динамики тепловых полей при сложных граничных условиях, характерных для реального технологического процесса, в настоящее время является численное решение тепловой задачи. Производительность современных компьютеров обеспечивает достаточно высокую точность и скорость расчетов.

Однако при решении дифференциальных уравнений теплопроводности численным методом часто требуются дополнительные усилия для обеспечения устойчивости решения. Ее особенно трудно обеспечить при граничных условиях третьего рода (т. е. фиксированной температуре поверхности), так как при этом возникают очень большие и быстро изменяющиеся градиенты температуры. Для достижения нужной точности расчета температуры требуется выбрать рациональную разностную схему и постоянно контролировать устойчивость в ходе проведения расчетов.

Уравнения модели

Математическую модель охлаждения можно построить на основе известного соотношения Остроградского для энтальпии [14]:

$$\int_S \vec{Q}_s d\vec{S} = \int_V \left(q - \frac{\partial h}{\partial t} \right) dV, \quad (1)$$

где \vec{Q}_s – тепловой поток через элемент поверхности S ,
 q – мощность объемного энерговыведения,
 h – удельная энтальпия,
 V – элемент объема.

Интегрирование в правой части уравнения ведется по элементу объема, а в левой – по окружающей его поверхности.

Применяя это уравнение к расчету температурных полей в круглой стали, используем следующие допущения:

- теплообменом по длине катанки пренебрегаем,
- тепловые потоки и поля считаем аксиально-симметричными.

С учетом этих допущений тепловая задача становится одномерной нестационарной аксиально-симметричной, и уравнение (1) можно переписать для кольца с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 :

$$2\pi Q(R_2)R_2 + Q(R_1)R_1 \approx 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \left(q(r) - \frac{\partial h(r)}{\partial t} \right) r dr, \quad (2)$$

где $Q(R)$ – поток тепла из кольца через поверхность радиуса R ,
 $q(r)$ – мощность источников тепла в точках на радиусе r ,
 $h(r)$ – энтальпия этих точек.

На участке водяного охлаждения единственным источником тепловыделения является тепловой эффект полиморфного превращения, однако величина его в сравнении с другими тепловыми потоками невелика, и в первом приближении им можно пренебречь.

Выражая энтальпию через температуру, уравнение (2) можно переписать в виде:

$$Q(R_2)R_2 + Q(R_1)R_1 = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial T}{\partial t} c p r dr, \quad (3)$$

где T – температура,
 c – теплоемкость,
 ρ – плотность металла.

Таким образом, из соотношения Остроградского получено интегрально-дифференциальное уравнение, решение которого позволяет рассчитывать динамику изменения температуры.

Граничные условия

Для решения уравнения (3) необходимо задать начальное распределение температур по сечению металла и тепловые условия на ее поверхности.

Градиенты температур на входе в секцию водяного охлаждения по сравнению с градиентами, возникающими в ходе охлаждения, незначительны, и начальное распределение температур можно считать постоянным.

На участке ускоренного охлаждения катанка находится в граничных условиях двух видов: во время нахождения внутри секции она охлаждается водой, а во время ее нахождения между секциями – воздухом и радиационным теплообменом.

Граничные условия в камере водяного охлаждения

Во время нахождения проката в секции водяного охлаждения различные участки поверхности находятся в различных условиях: часть поверхности непосредственно контактирует с водой, а другая часть отделена от воды паровой прослойкой.

Поскольку в установке водяного охлаждения типа «Стелмор» вода подается в секции охлаждения под большим давлением, водяной поток в начале секции сильно турбулизирован и эффективно «срывает» паровую подушку с поверхности металла. Однако участок с сильно турбулизированным потоком имеет высокое гидродинамическое сопротивление и давление в секции быстро спадает. Поэтому на конечном участке секции давление воды недостаточно для «срывания» парового слоя и скорость теплоотдачи там существенно меньше. Таким образом, «эффективная длина» секции может оказаться существенно меньше реальной.

Участки поверхности, которые находятся в непосредственном контакте с водой, очень быстро охлаждаются до температуры, близкой к температуре кипения воды. При решении задачи теплопроводности это соответствует граничным условиям третьего рода.

Те же участки поверхности, которые покрыты паровым слоем, находятся в совершенно других граничных условиях. Теплопроводность водяного пара много меньше теплопроводности воды и он практически непрозрачен для теплового излучения. Поэтому тепловой поток на участках поверхности, покрытых паром, на несколько порядков меньше, чем на тех, которые контактируют с водой, и эти участки при расчетах можно считать теплоизолированными.

Итак, граничные условия на каждом участке поверхности проката во время его нахождения в секции водяного охлаждения представляют собой быструю смену граничных условий третьего рода с температурой поверхности, равной температуре кипения воды, и граничных условий второго рода с пренебрежимо малым тепловым потоком с поверхности. Общая скорость теплоотвода при этом определяется долей поверхности, находящейся в контакте с водой.

Граничные условия на участках выравнивания температур

На воздушных участках установки ускоренного охлаждения действуют следующие основные механизмы теплоотдачи: радиационный теплообмен, теплообмен с воздухом.

Радиационный теплообмен подчиняется закону Стефана-Больцмана:

$$Q_r = \varepsilon \sigma T^4,$$

где Q_r – мощность потока тепла с единицы поверхности;

ε – коэффициент черноты поверхности (для стали составляет 0,7–0,8);

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T – температура поверхности.

Потери тепла за счет естественного конвективного теплообмена с воздухом невелики (примерно на порядок меньше, чем при радиационном теплообмене) и ими можно пренебречь практически без потери точности расчетов.

Разностная схема для численного решения задачи теплопроводности

Для численного решения уравнения (3) необходимо перейти от интегрирования и дифференцирования к конечным разностям. Наиболее целесообразно для одномерного аксиально-симметричного случая разбиение тела сеткой, состоящей из вложенных цилиндрических колец (рис.3). При этом внешний теплообмен задается только для внешнего слоя, а остальные обмениваются между собой теплом кондуктивно.

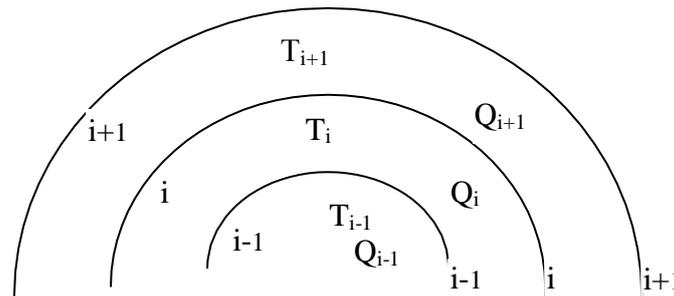


Рисунок 2 – Разностная схема для численного решения задачи теплопроводности

Теплообмен i -го слоя происходит только через его границы с соседними слоями, обозначенными индексами $i+1$ и $i-1$. Уравнение (3) для i -го слоя можно переписать в виде:

$$R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1} = \int_{R_{i-1}}^{R_i} c \rho \frac{\partial T}{\partial t} r dr, \quad (4)$$

здесь R_i – радиус соответствующих слоев.

Поскольку подинтегральная функция гладкая, уравнение (4) можно переписать в виде:

$$(R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1}) \partial t = \int_{R_{i-1}}^{R_i} c \rho \partial T r dr. \quad (5)$$

Пусть слой является достаточно тонким, чтобы выполнялось соотношение:

$$|T(R_i) - T(R_{i-1})| \ll \frac{T(R_i) + T(R_{i-1})}{2}. \quad (6)$$

В этом случае изменением температуры внутри слоя можно пренебречь, что приведет к постоянству и независимости от координаты теплоемкости и плотности:

$$(R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1}) \partial t = c \rho \frac{(R_i^2 - R_{i-1}^2)}{2} \partial T. \quad (7)$$

Переходя от дифференциалов к конечным разностям, можно записать:

$$2(R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1}) (t' - t) = \rho c (T_i) (T'_i - T_i) (R_i^2 - R_{i-1}^2), \quad (8)$$

где $(t' - t)$ – шаг времени расчета;
 T_i – температура i -го слоя перед шагом;
 T_{i+1} – температура i -го слоя после шага.
 Тепловые потоки на границах слоев определяются теплопроводностью

$$Q_i = \lambda \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (9)$$

где $\lambda(T)$ – теплопроводность металла как функция температуры.
 Переходя к конечным разностям, получим:

$$Q_i = \lambda \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \frac{T_{i+1} - T_i}{\bar{R}_{i+1} - \bar{R}_i}, \quad (10)$$

где \bar{R}_i – средние радиусы слоев, или:

$$Q_i = 2\lambda \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i+1} - R_{i-1}}. \quad (11)$$

Таким образом, для произвольного слоя внутри металла можно записать:

$$4 \left(R_i \lambda_i \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i+1} - R_{i-1}} + R_{i-1} \lambda_{i-1} \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{R_i - R_{i-2}} \right) \right) (t' - t) = \rho c (T'_i - T_i) (R_i^2 - R_{i-1}^2). \quad (12)$$

При этом теплопроводность вычисляется для средней температуры слоев при i -той границе, а теплоемкость – для температуры i -того слоя.

Выведенное разностное уравнение справедливо для всех слоев сетки, кроме нулевого и внешнего. На внешней границе отсутствует кондуктивный теплообмен, но при граничных условиях второго рода может быть задан внешний тепловой поток Q_n :

$$4(R_n Q_n + R_{n-1} \lambda_{n-1} \frac{T_n - T_{n-1}}{R_n - R_{n-2}}) (t' - t) = \rho c_n (T'_n - T_n) (R_n^2 - R_{n-1}^2). \quad (13)$$

На самом внутреннем слое только одна поверхность теплообмена, и по-другому рассчитывается площадь слоя:

$$4R \frac{\lambda}{1 + \frac{R_1}{R_0}} \frac{T_1 - T_0}{t' - t} = \rho_0 c_0 (T' - T_0) R^2. \quad (14)$$

Алгоритмы численного решения задачи

1. Цилиндр, для которого производятся расчеты, разбивается на n слоев концентрическими окружностями. Слои и границы слоев индексируются номерами от 0 до $(n-1)$, так что i -ый слой ограничивается окружностями i и $(i-1)$. Строящие сетку окружности не обязательно должны быть распределены равномерно, в частности, внешние слои желательно сделать значительно более тонкими, чем центральные, для уменьшения погрешностей расчетов с граничными условиями третьего рода. На первом шаге расчетов температура слоев задается начальными данными.

2. При расчете с граничными условиями третьего рода фиксируется температура внешнего слоя. При расчете с граничными условиями второго рода задается фиксированный (в частности, нулевой) поток через внешнюю поверхность.

3. По приведенным выше формулам рассчитываются тепловые потоки через границы слоев. Расчет производится исходя из текущих значений температур слоев.

4. Выбирается шаг расчета по времени, обеспечивающий устойчивость и достаточную точность решения. Для этого определяется скорость изменения температуры каждого слоя и выбирается максимальная из них по модулю. Далее выбирается такое значение шага по времени, чтобы температура изменилась не более, чем на заданную, достаточно малую величину.

5. Вычисляются новые температуры слоев в конце шага расчета.

6. Расчеты повторяются до тех пор, пока суммарное время не станет равным требуемому.

3 Вычислительные эксперименты по анализу процесса охлаждения

Описанные в данном разделе расчеты проведены для проверки адекватности модели и выявления основных закономерностей тепловых процессов, происходящих на линии ускоренного охлаждения мелкосортного стана.

Коэффициенты и параметры модели

Для проведения модельных расчетов теплового режима линии водяного охлаждения непрерывного мелкосортно-проволочного стана 150 были использованы следующие коэффициенты и параметры модели (табл. 1):

Таблица 1 – Коэффициенты и параметры модели

Коэффициенты и параметры	Единицы измерения	Значение
Плотность стали	кг/м ³	7800
Температура поверхности катанки в воде	°C	210
Доля охлаждения с граничными условиями третьего рода	-	0,1
Начальная температура	°C	1000
Количество слоев	-	40

Используемое при расчетах значение температуры поверхности в воде обусловлено конструктивными особенностями стана и соответствует температуре кипения при давлении 2 МПа.

Введение коэффициента «доля охлаждения с граничными условиями третьего рода» позволяет учитывать особенности процесса охлаждения металла водой. При испарении воды, находящейся в контакте с нагретым металлом, образуется паровой слой, препятствующий дальнейшему их соприкосновению; на этом участке проката теплоотвод с поверхности происходит со скоростью, на несколько порядков меньшей, чем при непосредственном соприкосновении его с водой. При ударе струи воды под большим давлением паровой слой пробивается; вода соприкасается с металлом, и температура поверхности очень быстро снижается примерно до температуры кипения

воды. На этом участке поверхности обеспечиваются граничные условия третьего рода, которые характеризуются очень быстрым теплоотводом.

Таким образом, эффективность охлаждения металла водой в значительной степени определяется отношением суммарной площади зон непосредственного контакта с водой к общей площади охлаждаемой поверхности. Использование выбранного коэффициента модели позволяет обеспечить наилучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Для нахождения оптимальной компоновки линии охлаждения были сопоставлены результаты расчетов для линий, имеющих различное число секций охлаждения.

В таблице 2 приведены геометрические размеры для проанализированных вариантов компоновки линии.

Таблица 2 – Размеры элементов линии охлаждения

Количество секций на линии	3	4	5	7
Эффективная длина секций, м	2,1	1,3	1,1	0,7
Расстояние между секциями, м	6,8	5,4	4,2	3,1

Расчеты были произведены для различных диаметров катанки и мелкого сорта в диапазоне от 6 до 12 мм. При этом скорость прокатки изменялась от 50 м/с для диаметра 6 мм до 12,5 м/с для диаметра 12 мм (с соблюдением закона постоянства секундных объемов).

Тепловые процессы в камере водяного охлаждения

На рис.3 представлены результаты расчетов изменения температурного профиля в первой секции для металла диаметром 6 мм.

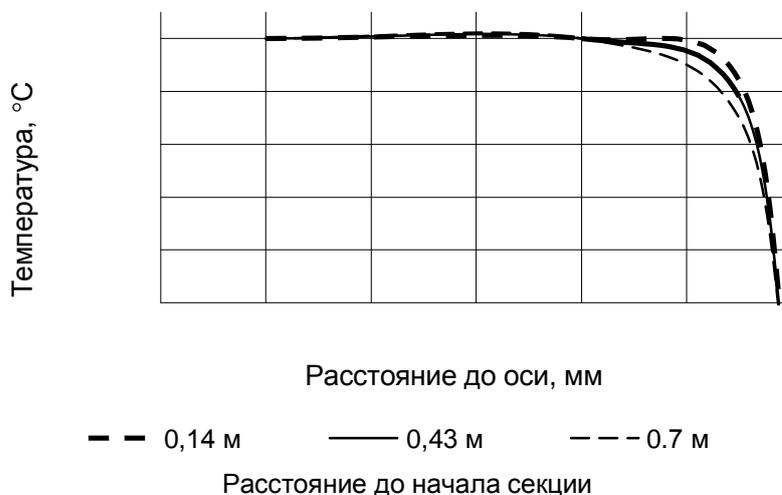


Рисунок 3 – Изменение температурного профиля при прохождении первой включенной секции для катанки диаметром 12 мм

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при входе металла в секцию быстро охлаждается его поверхность, затем тепловой фронт постепенно перемещается к центру. Это сопровождается значительным перепадом температур по толщине.

Поскольку с увеличением сечения металла пропорционально уменьшается скорость его движения, характер протекающих температурных процессов практически не зависит от диаметра проката. В этой связи результаты приведенных здесь расчетов справедливы и для секций водяного охлаждения перед чистовым блоком.

Изменение среднемассовой температуры в секции водяного охлаждения идет с переменной скоростью. На рисунке 4 показано изменение скорости охлаждения в зависимости от расстояния до начала секции.



Рисунок 4 – Скорость изменения температуры при прохождении включенной секции №1

Как видно из рисунка 4, скорость теплосъема максимальна в начале водяной секции, а затем быстро падает. Примерно половина теплосъема приходится на самое начало водяной секции (первые 0,15 м). Поэтому увеличение длины секций не оказывает значительного влияния на количество отводимого ими тепла. Проведенные расчеты подтверждают, что этот вывод справедлив для любого диаметра металлопроката в рассматриваемом диапазоне.

Тепловые процессы на участке выравнивания температур

Поскольку воздух является значительно более слабым охладителем, чем вода, на этом участке снижения среднemasсовой температуры практически не происходит (рис.5). На воздушном участке происходит передача тепла от более нагретой сердцевины катанки к охлажденной поверхности, в результате чего уменьшается температурный перепад по сечению.

Сопоставление вышеприведенных зависимостей позволяет сделать вывод: с увеличением протяженности участка воздушного охлаждения достигается более равномерное распределение температуры по сечению металлопроката.

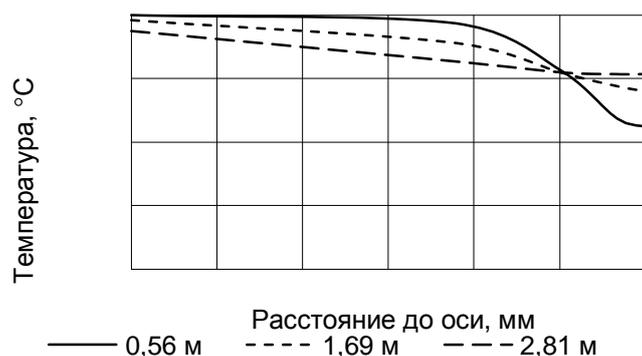


Рисунок 5 – Динамика температурного профиля на воздушном участке между секциями №1 и №3, диаметр катанки 12 мм

Тепловые процессы в камере водяного охлаждения после воздушного участка

Эффективность охлаждения в водяной секции зависит от предыстории охлаждения, т.е. от длины предшествующего участка выравнивания температур. Чем больше этот участок, тем полнее происходит выравнивание температуры по сечению металла. По мере выравнивания температуры по сечению происходит повышение температуры поверхностных слоев, с которых, как показано выше, и происходит

основной теплосъем в секции водяного охлаждения. Ниже приведены результаты анализа влияния длины участка выравнивания температур на тепловые процессы при прохождении второй включенной секции. На рисунке 6 представлена динамика изменения теплового профиля (характеризующего распределения температуры по длине) катанки при охлаждении секциями №2 и №3.

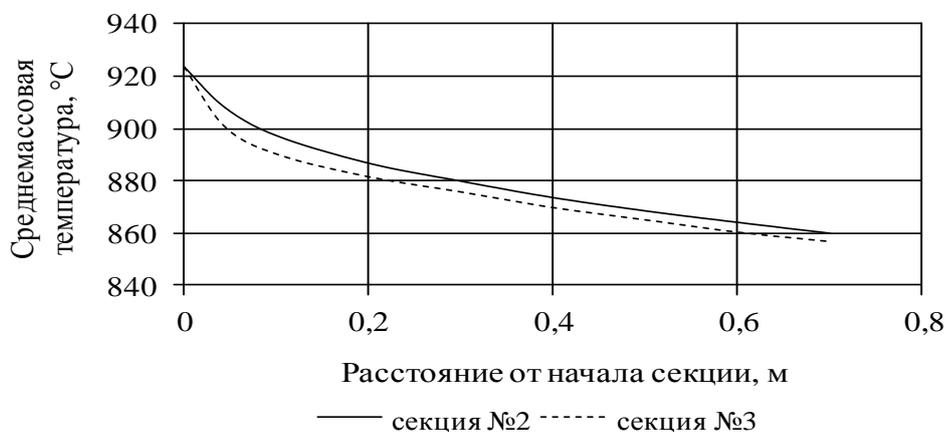


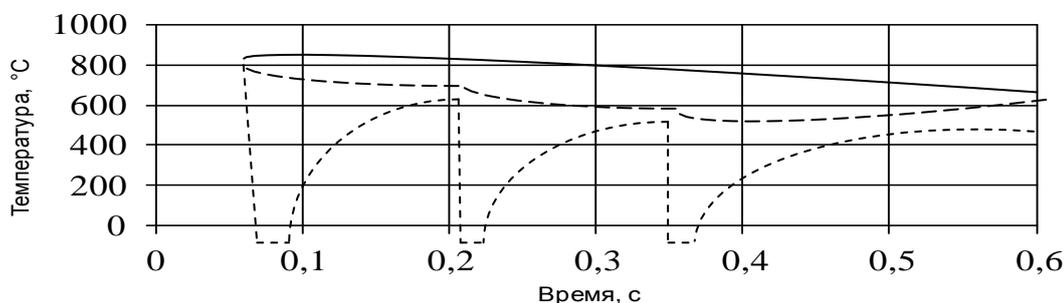
Рисунок 6 – Изменение среднемассовой температуры при прохождении второй из включенных секций

Многосекционная линия охлаждения

В мировой практике для охлаждения катанки и мелкого сорта после горячей прокатки применяются линии охлаждения с различными количеством и длиной секций. Для непрерывного мелкосортно-проволочного стана 290 был проведен анализ тепловых процессов в линиях охлаждения, состоящих из различного количества секций: трех, пяти и семи. При этом длина и количество действующих секций выбирались так, чтобы обеспечить одинаковую конечную температуру 750 °C.

Как уже отмечалось, удлинение секций слабо влияет на количество отводимой ими теплоты. Поэтому использование большего числа укороченных секций в многосекционных линиях охлаждения позволяет достичь большей удельной тепловой эффективности водяного охлаждения.

Изменение характерных температур по длине многосекционной линии охлаждения проиллюстрировано на рисунке 7 для линии с четырьмя секциями при включенных трех первых секциях.



температура центра, — среднемассовая температура, - · - · - температура поверхности

Рисунок 7 – Изменение характерных температур на трехсекционной линии охлаждения

При различных вариантах компоновки линии охлаждения стана получена приблизительно одинаковая конечная температура (~750 C).

Как уже отмечалось, наиболее быстро теплосъем происходит на начальном участке секции охлаждения. Поэтому увеличение количества водяных секций позволяет уменьшить их суммарную длину.

Зависимость суммарной эффективной длины водяных секций от компоновки линии охлаждения представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Зависимость суммарной эффективной длины секций от общего количества секций на линии охлаждения

Таким образом, температуру проката можно снизить приблизительно на одну и ту же величину, применяя различную компоновку линии. Компоновка должна выбираться исходя из дополнительных требований к охлаждению, в частности, минимизации температурной неоднородности по сечению металла и повышения общей тепловой эффективности водяного охлаждения.

Исследование влияния условий охлаждения на температурную неоднородность по сечению проката

После прохождения линии охлаждения прокат поступает на виткосборник, после чего подвергается дальнейшему охлаждению на воздухе с помощью вентиляторов. Температурный диапазон воздушного охлаждения соответствует области протекания полиморфных превращений, поэтому температурный профиль проката после прохождения линии водяного охлаждения в значительной мере определяет потребительские свойства продукции.

При исследовании температурной неоднородности необходимо оценивать конечную разность температур и среднюю дисперсию температуры по всей длине линии охлаждения.

Конечная разность температур – это разность температур между поверхностью T_n и центром T_c при входе катанки в виткосборник:

$$\Delta T = T_c - T_n$$

Средняя дисперсия температуры на линии охлаждения рассчитывается по формуле:

$$D_T = \frac{\int_0^L dl \sqrt{\int_0^R T^2(r) 2\pi r dr} - \left[\int_0^R T(r) 2\pi r dr \right]^2}{L\pi R^2},$$

где R – радиус катанки;

L – длина линии ускоренного охлаждения.

Влияние количества секций охлаждения на конечную разность температур

Количество секций на линии охлаждения оказывает существенное влияние на температурную однородность металла. На рисунке 9 приведены результаты расчетов конечной разности температур для наиболее часто используемых вариантов компоновки линии водяного охлаждения:

- три водяных секции на линии – включены все три;
- четыре водяных секции на линии – включены три первые;
- пять водяных секций на линии – включены три первые;
- семь водяных секций на линии – включены четыре первые.



Рисунок 9 – Конечная разность температур по сечению катанки для линии с различным числом секций

Конечная разность температур тем меньше, чем больше число секций на линии охлаждения. Это объясняется тем, что в многосекционной линии охлаждения больше секций, кроме того, увеличена суммарная длина воздушных участков, на которых происходит выравнивание температур. Проведенные расчеты подтверждают справедливость этого вывода для всех диаметров металлопроката

Влияние количества секций охлаждения на среднюю дисперсию температуры по длине линии охлаждения

На рисунке 10 приведена средняя дисперсия температуры для следующих вариантов компоновки линии охлаждения:

- три водяных секции на линии – включены все три;
- четыре водяных секции на линии – включены три первые;
- пять водяных секций на линии – включены первая, третья и пятая;
- семь водяных секций на линии – включены первая, третья, пятая и седьмая.



Рисунок 10 – Средняя дисперсия температуры для линий с различным числом секций

Средняя дисперсия температуры на линии убывает с увеличением числа секций водяного охлаждения. Эта закономерность справедлива для любого диаметра проката.

Влияние набора включенных секций охлаждения на температурную неоднородность металлопроката

При заданном количестве секций охлаждения ход тепловых процессов существенно зависит от способа чередования включенных и выключенных секций. Ниже приведены результаты анализа влияния набора включенных секций на количественные характеристики температурной неоднородности для семисекционной линии охлаждения. Как показано на рисунке 11, включение секций в начале линии обеспечивает существенно меньшую конечную разность температур благодаря большему воздушному интервалу во второй части линии. В то же время это вызывает некоторое увеличение средней по длине линии дисперсии температуры (рис.12).



Рисунок 11 – Конечная разность температур при различных наборах включенных секций охлаждения

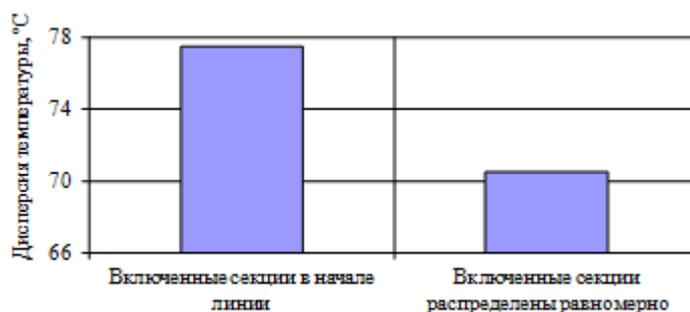


Рисунок 12 – Средняя дисперсия температуры на линии ускоренного охлаждения при различных наборах включенных секций охлаждения

Таким образом, при выборе номеров включенных секций можно использовать следующее правило: следует включать водяные секции в начале линии для получения минимальной температурной неоднородности на виткосборнике; следует включать секции равномерно, если важно обеспечить равномерность температуры по сечению металла на всей длине линии охлаждения.

Способы регулирования теплосъема на участке водяного охлаждения

Один из существенных конструктивных недостатков линии охлаждения типа «Стелмор» – трудность регулирования теплосъема. По сути, единственная возможность изменить температуру металла на виткосборнике в стандартных линиях этого типа – это включение или выключение секций. При этом теплосъем изменяется скачкообразно на значительную величину, тем большую, чем меньше секций в линии. Плавная регулировка температуры требует применения других способов воздействия на теплоотвод. Особенно сложной конструктивной задачей является регулировка

теплосъема в процессе прокатки, которая необходима для оперативной компенсации отклонения температуры от требуемой величины, возникающего вследствие непостоянной температуры конца прокатки, скорости и т. д. В настоящем разделе анализируются различные способы регулирования температуры: дискретные и плавные. К дискретным регулировкам относятся включение – выключение секций и изменение взаимного расположения включенных и выключенных секций. К способам плавной регулировки относятся изменение эффективной длины секций и изменение давления охлаждающей воды.

На рисунке 13 приведена зависимость изменения температуры при выключении одной секции от общего количества секций на линии.



Рисунок 13 – Изменение температуры проката на виткосборнике при выключении одной из секций из общего количества

Как видно из рисунка 13, на линии охлаждения с малым количеством секций (3, 4) при выключении одной секции температура существенно изменяется, что затрудняет использование этого способа регулирования. На многосекционной линии охлаждения выключение одной секции изменяет температуру на приемлемую величину (50-70 °C).

Второй способ дискретной регулировки температуры – изменение порядка чередования включенных и выключенных секций. Этот способ применим только при достаточно большом количестве секций на линии. На рисунке 14 приведена гистограмма изменения температуры при различных вариантах изменения порядка расположения включенных секций для семисекционной линии.

Расчеты производились для режимов переключения, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Варианты включения секций

Порядковый номер режима	Номера включенных секций в исходном режиме	Номера включенных секций в новом режиме
1	1, 3, 5, 7	1, 2, 3, 4
2		1, 3, 4, 5
3		1, 2, 3, 5



Рисунок 14 – Изменение температуры при изменении номеров включенных секций

Для плавной регулировки теплосъема можно изменять эффективную длину одной или нескольких секций.

Регулировочные характеристики этого способа приведены на рисунке 15.

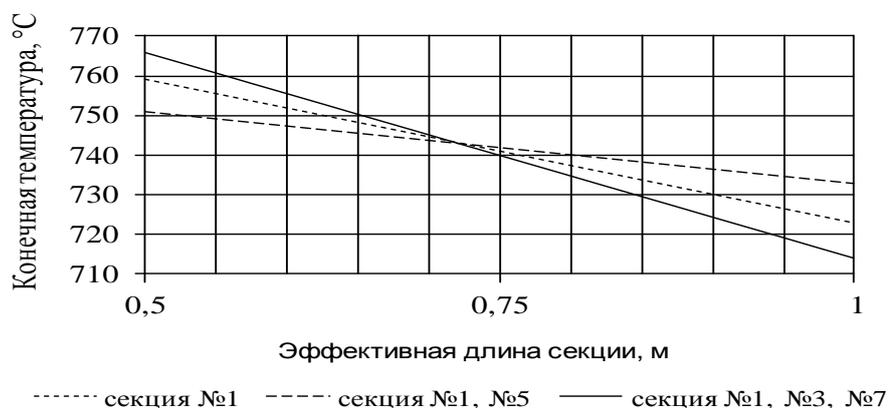


Рисунок 15 – Изменение температуры на виткосборнике при изменении эффективной длины одной, двух и трех секций

Второй возможный способ плавной регулировки – изменение давления охлаждающей воды. При изменении давления изменятся температура кипения воды и эффективность «срывания» паровой рубашки. На рисунке 16 приведена регулирующая характеристика первого механизма.

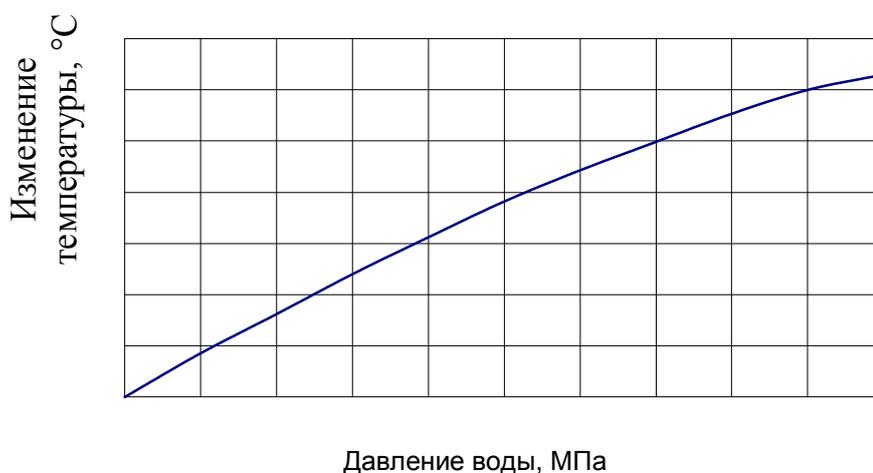


Рисунок 16 – Изменение температуры на виткосборнике при изменении давления охлаждающей воды

Таким образом, наибольшее дискретное изменение температуры достигается при включении – отключении секций. Более точное дискретное регулирование достигается при изменении порядка включенных секций. Для плавного регулирования на небольшую величину можно использовать изменение длин секций и давления охлаждающей воды.

Заключение

1. Максимальная скорость снижения среднемассовой температуры катанки и мелкого сорта горячекатаного металла наблюдается на начальном участке секции водяного охлаждения, поэтому эффективность теплосъема (количество теплоты, отводимой с единицы длины действующих водяных секций) увеличивается с увеличением количества секций водяного охлаждения при уменьшении их длины.

2. Снижения температурной неоднородности по сечению проката можно достичь увеличением количества и длины участков выравнивания температур при сохранении

суммарной величины теплосъема. Эта задача решается увеличением количества более коротких секций водяного охлаждения.

3. Регулирование температуры металла на выходе с участка ускоренного охлаждения можно осуществлять несколькими способами. Включение – отключение секций и изменение набора включенных секций обеспечивают скачкообразные изменения температуры в широком диапазоне. Изменение давления воды и длины секций позволяют осуществлять плавное регулирование температуры в узком диапазоне. Для плавного регулирования температуры в широком диапазоне необходимо использовать одновременно оба способа регулирования.

4. Установлено, что для обеспечения эффективного и регулируемого междеформационного охлаждения на стане 150 перед чистовым блоком следует установить минимум две секции водяного охлаждения с длинами не менее одного метра каждая.

5. Для последеформационного охлаждения на стане 150 рекомендуется устанавливать семь секций водяного охлаждения. Такая компоновка линии ускоренного охлаждения позволит минимизировать температурную неоднородность по сечению катанки и обеспечить широкие возможности управления процессом охлаждения.

Список литературы:

1. Гареев А.Р., Муриков С.А., Платов С.И. Исследование возможностей прокатного оборудования по достижению термических режимов на примере шсгп 2000 ОАО «ММК» Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2015. № 10-1. С. 30-34.

2. Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н., Железков О.С. Совершенствование охлаждения катанки на стане 150 ОАО "БМК" В сборнике: СОВРЕМЕННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ НОВОГО ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. 2016. С. 206-210.

3. Платов С.И., Огарков Н.Н., Некит В.А. improving the controlled cooling after wire rod rolling in the finishing block of stands. В сборнике: Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II Editors: A.A. Radionov, G.G. Mikhailov, D.A. Vinnik. 2016. С. 620-624.

4. Платов С.И., Ярославцев А.В., Тумбасов К.С., Ярославцева К.К. Повышение качества горячекатаного сортового арматурного проката из низко- и среднеуглеродистых марок стали за счет выбора оптимальных термомеханических режимов обработки Производство проката. 2016. № 10. С. 21-25.

5. Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н., Железков О.С. Исследование технологии ускоренного охлаждения катанки на проволочном стане Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 2 (45). С. 45-48.

6. Гареев А.Р., Муриков С.А., Платов С.И., Урцев В.Н., Шмаков А.В. Анализ и экспериментальная верификация модели тепловыделения при фазовых превращениях Производство проката. 2015. № 2. С. 30-34.

7. Гареев А.Р., Муриков С.А., Платов С.И., Урцев В.Н., Шмаков А.В. Разработка математической модели тепловыделения при фазовых превращениях для промышленного применения. Производство проката. 2014. № 7. С. 20-26.

8. Гареев А.Р., Муриков С.А., Платов С.И., Урцев В.Н., Шмаков А.В., Гиниятуллина В.М. Баланс тепла подката на широкополосном стане горячей прокатки Моделирование и развитие процессов ОМД. 2014. № 20. С. 250-258.

9. Платов С.И., Дёма Р.Р., Кувшинов Д.А. Устройство для распыления жидкости, патент на полезную модель RUS 110663 14.06.2011.

10. Платов С.И., Терентьев Д.В., Морозов С.А. Волочение катанки и проволоки с регламентируемым микрорельефом поверхности. Производство проката. 2002. № 4. С. 27-28.

11. Урцев В.Н., Хабибулин Д.М., Капцан А.В., Платов С.И., Воронков С.Н. Способ производства холоднокатаных полос из сверхнизкоуглеродистой стали. Патент на изобретение RUS 2212457 04.06.2002.

12. Платов С.И., Дема Р.Р., Харченко М.В., Ярославцев А.В., Дубовский С.В., Михайлицын С.В. Разработка рациональных режимов подачи технологической смазки на опорные валки клетей чистовой группы станов горячей прокатки. Моделирование и развитие процессов ОМД. 2011. № 1. С. 20-24.

13. Анцупов В.П., Платов С.И., Кадошников В.И., Баженов А.А., Дема Р.Р. Повышение стойкости гидроцилиндров уравнивания прокатных валков. В сборнике: Процессы и оборудование металлургического производства, Магнитогорск, 2004. С. 86-89.

14. Платов С.И., Дема Р.Р., Лукьянов С.И. Разработка и внедрение технологии охлаждения прокатных валков с целью повышения их эксплуатационных характеристик на широкополосном стане 2000 ОАО «ММК». Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 100-101.

15. Essadiqi E., Jonas J.J. Effect of deformation on ferrite nucleation and growth in a plain carbon and micro alloyed steels. –Metal. Trans. V.20A, (1989) 987-998.

16. Lange W.E., Enomoto M. and Aaronson H.I. The kinetics of ferrite nucleation at austenite grain boundaries in Fe-C alloys. // Metallurgical transactions V. 19A. (1988) 427-440.

17. Pickering F.B. Physical Metallurgy and the Design of Steel, Applied Science Pub. London. (1983).

18. Mathematical modeling of plastic deformation process in section rolling / A. Morozov, B. Nikiforov, V. Salganik, A. Pesin, S. Platov, E. Trahtengertz // Proceeding of the 7th international conference on numerical methods in industrial forming process/ Simulation of Materials Processing Theory, Methods and Applications. Numiform 2001, Toyohashi, Japan.

19. Урцев В.Н., Рашников В.Ф., Морозов А.А., Капцан А.В., Сафронов М.Ф., Горностырев Ю.Н., Корнилов В.Л. Формирование структуры и механических свойств сталей. Серия «Сталь». Структура и свойства». Под ред. Академика Рашникова В.Ф., Магнитогорск – 1998, 158 с.