

УДК 621.771.237.073

Управление температурным режимом работы валков широкополосного стана горячей прокатки

И. Ю. Приходько¹, С. А. Воробей¹,
А. А. Сергеев¹, В. В. Разносилин¹,
С. Е. Шатохин²

¹ Институт черной металлургии НАН Украины
(г. Днепропетровск, Украина),
² Lechler GmbH (Германия)

Представлено описание основных подходов к созданию и возможностей подсистемы автоматического управления охлаждением валков с использованием адаптируемых математических моделей. Приведены отличительные особенности математических моделей, аппаратного и программного комплекса системы, обеспечивающей непрерывный мониторинг теплового состояния валков, автоматический режим работы системы управления охлаждением валков, стабилизацию температуры рабочих валков при прокатке полос различного сортамента. Система разработана с использованием современных информационных технологий для чистовой группы клеток ШСГП 2000 ОАО ММК.

Ключевые слова: система управления охлаждением валков, оптимизация, стабилизация, температура, математическая модель, адаптация.

С увеличением машинного времени и уменьшением продолжительности пауз при горячей прокатке тонких полос увеличиваются количество теплоты, поступающей в валки, и их температура. Это вызывает перегрев рабочих валков, их повышенный износ, ухудшение поперечного профиля, плоскостности и состояния поверхности прокатываемых полос. Поэтому уменьшение толщины горячекатаных полос вызывает необходимость совершенствования и модернизации существующих систем охлаждения валков.

Рабочий валок из легированных сталей — один из наиболее дорогостоящих сменных элементов широкополосных станов горячей прокатки (ШСГП). В чистовой группе клеток ШСГП оборот валков составляет около 100 валков в сутки. После каждой перешлифовки валок теряет до 5 % своего общего ресурса. Каждая перевалка валков сопряжена с потерями производства. Поэтому обеспечение высокой экономической эффективности производства высококачественного готового проката невозможно без улучшения тепловых условий эксплуатации рабочих валков.

Экспериментальные исследования показали, что в настоящее время на ШСГП в наиболее теплонагруженных клетях чистовой группы температура рабочих валков может достигать 90 — 120 °С при допустимой 65 — 75 °С.

Современные системы автоматического управления охлаждением валков создаются на основе математических моделей, так как использование прямого метода измерения среднемассовой температуры валков не представляется возможным. Температуру поверхности валков в процессе прокатки весьма сложно измерять из-за брызг воды почти по всей поверхности бочки валков. Даже в случае измерения температуры поверхности валков необходимо использовать ма-

тематическую модель, которая бы позволила определить среднемассовую температуру валка по известной температуре его поверхности, которая за один оборот изменяется в широких пределах.

В ООО “Металлтехномаш” совместно с Институтом черной металлургии НАН Украины разработан комплекс математических моделей, которые позволяют рассчитывать температуру рабочих валков и управлять ею в процессах прокатки полос. Эти модели положены в основу подсистемы автоматического управления охлаждением рабочих валков (АСУ СОВ) для ШСГП 2000 ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”. Температурное поле валка условно разделено на две составляющие: циклическую составляющую от поверхности в глубь валка на 1 — 3 % радиуса и осесимметричное поле температур в основной массе валка.

Первая составляющая (температура в поверхностном слое в центральном сечении по длине бочки валка) определяется с использованием конечно-разностного решения [1, 2]. Окружность валка разбивается на восемь зон, соответствующих центральным углам φ_1 — φ_8 . Угол φ_1 , соответствующий очагу деформации, рассчитывается с учетом упругого сплющивания валков. Углы φ_2 и φ_8 определяются положением отсекающих воды. Остальные углы рассчитываются исходя из параметров форсунок охлаждения и их ориентации по отношению к валкам.

Базовой структурной составляющей алгоритма является расчет изменения температуры в поверхностных слоях валка и среднемассовой в центральном сечении за один оборот. Полученное при определении второй составляющей значение среднемассовой температуры валка используется как начальное при расчете температуры валка на следующем обороте.

Таблица 1. Пример расчета коэффициентов A_d и A_A

Номер клетки	Значения температуры валков, °C		ΔT^* , °C	Рассчитанные значения коэффициентов		Уточненные значения температуры, °C	Погрешность вычислений, °C
	расчетные	измеренные		A_d	A_A		
1	70,63	72,00	1,37	0,8951	1,1173	72,70	–0,70
2	76,55	75,00	–1,55	0,9584	1,0434	75,18	–0,18
3	80,64	82,00	1,36	1,0360	0,9653	81,97	0,03
4	79,12	82,00	2,88	1,0859	0,9209	81,70	0,30
5	72,84	78,00	5,16	1,1892	0,8409	77,20	0,80
6	68,12	71,00	2,88	1,1229	0,8906	70,45	0,55
7	64,49	66,00	1,51	1,0741	0,9310	65,68	0,32

* ΔT — отклонение расчетной температуры от фактической.

На участке φ_1 происходит разогрев поверхности валка от контакта с горячей полосой; на остальных участках — охлаждение поверхности валка и перераспределение температуры по его сечению. Коэффициент теплопередачи в очаге деформации рассчитывается в зависимости от погонной силы прокатки с учетом наличия технологической смазки. На остальных участках коэффициенты теплоотдачи рассчитываются в зависимости от условий охлаждения валка (зона активного охлаждения, зона пассивного охлаждения воздухом или стекающей водой), а также температур охладителя и поверхности валка. В зоне активного охлаждения учитывается давление воды, плотность орошения, тип форсунок и расстояние до них.

Вторая составляющая (осесимметричное поле температур по длине бочки валка с учетом осевой теплопроводности) определяется с использованием конечно-разностного метода [3 – 5]. В основу расчета полей температуры по длине бочки и радиусу валка положено двумерное уравнение теплопроводности. Граничные условия приняты с учетом симметрии, неразрывности поля температур и тепловых потоков по тангенциальной координате, а также охлаждения торцов валка на воздухе. При этом используется математический аппарат теории плоской термоупругости в квазистационарной постановке. Температура валка определяется как средневзвешенное (по массе условных “полуколец”, формируемых сеткой разбиения радиуса валка) значение поля температур на участке по длине бочки, соответствующем ширине прокатываемой полосы.

В модели расчета температуры валка в поверхностном слое используются три коэффициента теплоотдачи: в очаге деформации α_d , в зонах активного охлаждения $\alpha_{ак}$ и зонах пассивного охлаждения $\alpha_{п}$. Общий вид зависимостей для коэффициентов теплоотдачи по зонам теплообмена:

$$\alpha_d = A_d \cdot b_0 \cdot P_{\text{пог}}^{b_1} / \tau_k^{b_2}; \quad (1)$$

$$\alpha_{ак} = A_A \cdot K_T \cdot p_k^{c_1} \cdot V_{\text{ор}}^{c_2} / l_{\text{ф}}^{c_3}; \quad (2)$$

$$\alpha_{п} = A_{\text{п}} \cdot K_T \cdot d_0, \quad (3)$$

где $P_{\text{пог}}$ — погонная сила прокатки; τ_k — время контакта точки на поверхности валка с прокатываемой полосой; p_k — давление в коллаторе; $V_{\text{ор}}$ — плотность орошения; $l_{\text{ф}}$ — расстояние от форсунок до поверхности

валка; K_T — коэффициент влияния температуры поверхности валка; $b_0, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, d_0$ — коэффициенты зависимостей; $A_d, A_A, A_{\text{п}}$ — коэффициенты адаптации.

Выполненный анализ показал, что влияние погрешности определения коэффициентов теплоотдачи в зонах пассивного охлаждения влияет на точность расчета температуры валков на порядок меньше, чем в зонах активного охлаждения и в очаге деформации. Поэтому для процедуры адаптации расчетной температуры валков в средней части по длине их бочки используются только два коэффициента — A_d и A_A .

В табл. 1 приведен пример расчета коэффициентов адаптации A_d и A_A для верхних рабочих валков клетей чистовой группы. При отклонениях расчетной температуры рабочих валков от фактической в диапазоне от 1,37 до 5,16 °C и при заданной погрешности вычислений не более 3 % процедура адаптации завершилась за три итерации. Максимальное отклонение уточненной среднемассовой температуры рабочих валков от фактической составило 0,8 °C при использовании в расчете полученных значений коэффициентов A_d и A_A .

Для учета возможных несимметричных условий охлаждения на участках за пределами ширины полосы до окончания зон орошения рабочих валков, а также на участках охлаждения торца валков на воздухе с каждой стороны валка (сторона привода и обслуживания) предусмотрены четыре адаптационных коэффициента, регулирующих интенсивность теплообмена в сравнении с базовыми значениями. Базовое значение коэффициента теплоотдачи валок — воздух принято равным $\alpha_{\text{в}} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. При этом со сторон привода (индекс ds) и обслуживания (индекс os): $\alpha_{\text{в}ds} = Fa_{ds} \cdot \alpha_{\text{в}}$; $\alpha_{\text{в}os} = Fa_{os} \cdot \alpha_{\text{в}}$, где Fa_{ds}, Fa_{os} — коэффициенты адаптации.

Базовые значения коэффициентов теплоотдачи валок — вода за пределами ширины полосы $\alpha_{\text{ор}}$ вычисляются по зависимости (2). При этом со сторон привода и обслуживания: $\alpha_{\text{ор}ds} = Fhtc_{ds} \cdot \alpha_{\text{ор}}$; $\alpha_{\text{ор}os} = Fhtc_{os} \cdot \alpha_{\text{ор}}$, где $Fhtc_{ds}, Fhtc_{os}$ — коэффициенты адаптации. С помощью коэффициентов адаптации корректируется распределение температуры валков на участках по длине бочки в краевых зонах за пределами ширины полосы. На центральную зону валка эти коэффициенты оказывают минимальное влияние.

Таблица 2. Пример расчета коэффициентов Fa_{ds} , Fa_{os} , $Fhtc_{ds}$ и $Fhtc_{os}$

Номер зоны разбивания длины бочки вала	Координата по длине бочки вала, мм	Значения температуры валков, °C		ΔT , °C	Уточненное значение температуры, °C	Погрешность вычислений, °C	Рассчитанные коэффициенты адаптации
		расчетные	измеренные				
7	–888	52,5	48,0	–4,5	48,8	–0,8	$Fa_{ds} = 1,505$, $Fhtc_{ds} = 1,24$
11	–696	60,0	57,0	–3,0	57,5	–0,5	
15	–504	68,8	67,0	–1,8	68,0	–1,0	
19	–312	70,8	70,0	–0,8	70,5	–0,5	
23	–120	71,5	71,0	–0,5	71,4	–0,4	
28	120	71,5	72,0	0,5	71,5	0,5	
32	312	70,8	72,0	1,2	71,0	1,0	$Fa_{os} = 0,737$, $Fhtc_{os} = 0,54$
36	504	68,8	70,0	1,2	69,4	0,6	
40	696	60,0	63,0	3,0	62,0	1,0	
44	888	52,5	56,0	3,5	55,5	0,5	

В табл. 2 приведен пример расчета коэффициентов адаптации. При отклонениях расчетной среднемассовой температуры рабочего вала от фактической в диапазоне от 0,5 до 4,5 °C и при заданной погрешности вычислений не более 3 % процедура адаптации завершилась за восемь итераций. Максимальное отклонение уточненной среднемассовой температуры рабочих валков от фактической составило 1,0 °C при использовании в расчете полученных коэффициентов Fa_{ds} , Fa_{os} , $Fhtc_{ds}$ и $Fhtc_{os}$.

Оптимизация распределения расхода воды по клетям чистовой группы представляет собой итерационный процесс, который завершается, когда расчетные температуры валков совпадают с заданными с выбранной точностью.

Отличительными особенностями разработанной для ШСГП 2000 ММК системы управления охлаждением валков являются:

использование в расчетах комплекса наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на температуру валков;

система адаптации используемых математических моделей;

учет влияния подачи технологической смазки и межклетевого охлаждения;

расчет объемов охладителя, подаваемого на валки, а также параметров работы системы “антишелушения”;

два режима оптимизации расхода охладителя: для стабилизации температуры или тепловой выпуклости рабочих валков.

Основой системы является управляющая программа “CoolControl”, которая предназначена для автоматического управления охлаждением валков путем расчета и оптимизации расходов воды по клетям, а также управления системой “антишелушения”. Программа взаимодействует с системой архивирования пара-

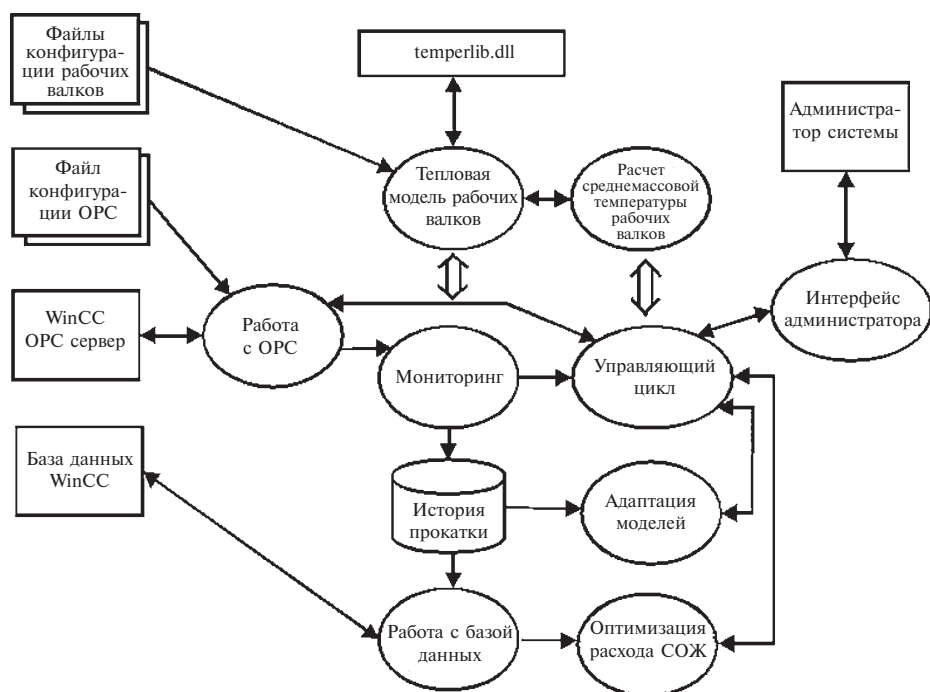


Рис. 1. Диаграмма потоков данных управляющей программы “CoolControl”

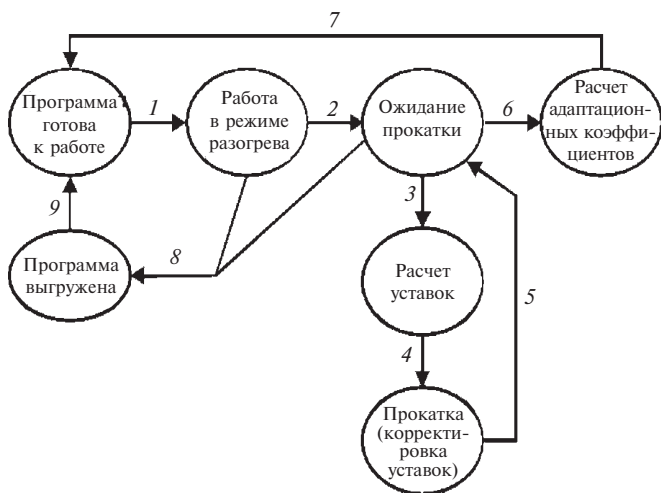


Рис. 2. Диаграмма состояний программы “CoolControl”

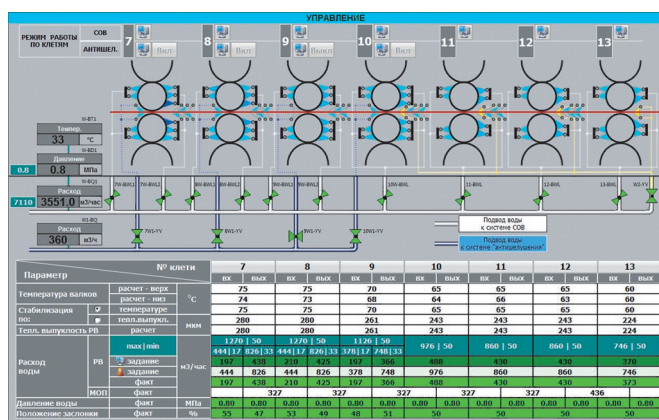


Рис. 3. Экран АРМа оператора стана “Система охлаждения валков”

метров технологического процесса и передает рассчитанные параметры, а также сообщения в систему визуализации на АРМ оператора стана.

Внутренняя структура программы представлена на рис. 1, где показано взаимодействие внутренних процессов программы, а также с внешними источниками и приемниками данных. В прямоугольных рамках на диаграмме указаны внешние по отношению к самой программе объекты: конфигурационные файлы, библиотеки, СУБД, серверы ОРС, пользователи; в овальных рамках — внутренние процессы, реализующие функции программы. Изображение “бочонка” на диаграмме обозначает наиболее важные внутренние хранилища данных программы (данные в оперативной памяти приложения). Стрелками обозначено взаимодействие процессов между собой и с внешними объектами. Оно выражается в виде чтения/записи данных, а также вызовов процедур и функций.

Математическая модель реализована в отдельной динамически загружаемой библиотеке “temperl.lib.dll”. По мере необходимости управляющая программа вызывает из нее требуемые расчетные функции. Разделение математических моделей и основного ядра программы обеспечивает общую устойчивость системы к

сбоям, а также повторное использование расчетных функций в других приложениях.

В начальном состоянии программа выгружена (рис. 2). По команде пользователя (9) происходит загрузка исполняемого модуля и считывание конфигурационной информации. Если считанная конфигурационная информация корректна, а также обнаружены все необходимые ресурсы (т. е. установлена связь с серверами WinCC и MS SQL), то программа переходит в состояние “Программа готова к работе” и ожидает дальнейших команд оператора стана. После того как программа получила команду оператора (1), она переходит в состояние “Работа в режиме разогрева”. При этом в отдельном диалоговом окне АРМа оператор имеет возможность скорректировать значения требуемой температуры рабочих валков для каждой полосы (или группы полос), используемых при разогреве. Далее в процессе прокатки расходы охладителя задаются таким образом, чтобы обеспечить требуемое приращение температур валков в конце прокатки каждой полосы. Программа работает в этом режиме до тех пор, пока оператор не выдаст команду окончания разогрева (2) либо не будет достигнута температура валков, заданная для стационарного в тепловом отношении режима прокатки.

После разогрева оператор может выбрать один из двух возможных режимов оптимизации расхода охладителя: по температуре или тепловой выпуклости рабочих валков. Кроме того, он может перевести каждую клетку по отдельности в автоматический или ручной режим управления. Расчет управляющих воздействий начинается после установки признака необходимости расчета (3). После получения этого признака программа проводит поиск в БД адаптационных коэффициентов, наиболее близких к текущим условиям прокатки, настраивает математические модели и далее выполняет расчет необходимого расхода воды для всех клеток стана. Рассчитанные уставки выдаются на исполнение (4) только для тех клеток, для которых оператор настроил автоматический режим управления. При изменении текущих параметров процесса в ходе прокатки полосы программа проводит коррекцию уставок. После выхода конца полосы из последней клетки программа записывает накопленные технологические данные в БД.

При перевалке проводится измерение температуры поверхности каждого вала по длине бочки. На основе этих данных выполняются расчет адаптационных коэффициентов математических моделей и сохранение их в БД. После перевалки (7) программа переходит в режим ожидания разогрева валков и далее весь цикл повторяется. В течение всего рабочего цикла программа в автоматическом режиме рассчитывает текущую температуру рабочих валков (параллельно управлению расходом воды).

Все взаимодействие программы и оператора стана реализовано через автоматизированное рабочее место, спроектированное в среде WinCC. Основной диалоговый экран АРМа представлен на рис. 3. Исполь-

зуя графический интерфейс данного экрана, оператор имеет следующие возможности:

выбирать режим работы системы: ручной, автоматический, автоматический в отдельных клетях, ручной или автоматический режим работы системы “антишелушения”;

задавать режим работы системы по следующим условиям: стабилизация температуры или тепловой выпуклости валков;

просматривать тренды (историю) отдельных параметров работы системы, а также список сообщений системы;

задавать и корректировать параметры режима разогрева валков;

контролировать основные параметры системы в табличном и графическом виде, а также задавать уставки на их изменение.

При проектировании и разработке системы автоматического управления охлаждением валков ШСГП 2000 использованы современные аппаратные и программные средства, а также системы человеко-машинного интерфейса. Это позволило создать инновационную систему управления охлаждением рабочих валков, которая обеспечит улучшение теплового ре-

жима работы валков с достижением отклонения среднemasсовой температуры от заданной не более 3 — 4 °С; повышение износостойкости валков и качества поверхности готового проката; увеличение межперевалочного ресурса рабочих валков и производительности стана.

Библиографический список

1. **Воробей С. А., Приходько И. Ю.** Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки // Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов. Т. 8. — Днепропетровск, 2005. С. 232 — 235.
2. **Приходько И. Ю., Воробей С. А., Шатохин С. Е.** Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов // Сталь. 2005. № 11. С. 72 — 77.
3. Управление качеством тонколистового проката / **В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, А. И. Яценко.** — Киев : Техника, 1997. — 384 с.
4. **Приходько И. Ю.** Управление тепловым профилем валков зонной подачей СОЖ // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 — 24 октября 2003. — М. : АО Черметинформация, 2004. С. 113 — 122.
5. **Приходько И. Ю., Чернов П. П., Шатохин С. Е.** Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии // Сталь. 2006. № 11. С. 87 — 93.