

**С.М. Жучков, Д.Г. Паламарь, В.Г. Раздобреев**

**АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА СИСТЕМЫ  
«ПРОКАТНЫЙ СТАН – ПРОКАТЫВАЕМАЯ ПОЛОСА» И ПУТИ  
СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ПРОЦЕССЕ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ**

Выполнен анализ составляющих теплового баланса системы «прокатный стан – прокатываемая полоса». Рассмотрены основные направления решения температурной задачи сортовой прокатки. Предложен ряд мероприятий, позволяющих снизить расход энергоресурсов на прокатку и уменьшить расходную часть теплового баланса системы «прокатный стан – прокатываемая полоса».

**Постановка задачи.** Температурный режим прокатки является важным технологическим параметром, определяющим условия реализации процесса горячей обработки металлов давлением [1]. Во многом температурный режим прокатки определяется конструктивными особенностями стана – расположением основного технологического оборудования, техническими характеристиками его основных агрегатов и вспомогательного оборудования.

Вместе с тем, температурный режим прокатки тесно связан с деформационными и скоростными параметрами, что, в свою очередь, определяет выбор технологических схем производства проката на стане и калибровки валков его рабочих клетей. Кроме того, характер изменения температуры металла по длине непрерывного стана во многом определяет уровень энергозатрат на прокатку.

В начале деформационной обработки в черновой группе рабочих клетей стана происходит значительное снижение температуры прокатываемого металла. Это приводит к росту энергосиловых параметров процесса. Затем, в процессе формирования профиля и структуры готового проката (чистовая группа рабочих клетей стана), температура прокатываемого металла повышается за счет деформационного разогрева.

Следует отметить, что при производстве готовой продукции на сортовых и проволочных станах преобладают затраты, связанные с нагревом заготовок. В связи с этим снижение энергозатрат на производство проката достигается путем понижения температуры нагрева исходных заготовок и уменьшения тепловых потерь раската в процессе его транспортировки в потоке стана.

В настоящее время известны два направления решения температурной задачи прокатки. Одно из них базируется на теоретических зависимостях процесса теплопередачи, а другое – на статистическом анализе результатов экспериментальных исследований температуры прокатываемого металла [2].

Теоретический анализ предусматривает составление уравнений суммарного теплового баланса, включающего потери тепла раскатом вслед-

ствии его соприкосновения с рабочими валками, потери тепла излучением и конвективные потери, потери тепла из-за попадания на раскат воды, необходимой для охлаждения рабочих элементов клетки, и приток тепла вследствие превращения работы деформации металла в тепловую энергию, а также от преодоления сил контактного трения. Расчет суммарного теплового баланса затруднен, так как отсутствуют строгие математические зависимости, описывающие стадии процесса теплопередачи и их взаимную обусловленность, а также достаточно точные данные о теплофизических контактах, характеризующих исследуемый процесс.

Второе направление предполагает описание процессов теплопередачи статистическими зависимостями. Статистическую модель температурных условий прокатки строят на основе данных экспериментального изучения изменения температуры раската на различных участках стана. При этом общая структура модели должна отображать физическую природу явления и содержать, в качестве аргумента, основные параметры технологического процесса, легко поддающиеся контролю и регулированию.

Температура деформируемого материала зависит от температуры нагрева, охлаждения на воздухе, контакта с валками или охлаждающими средствами, излучения и от тепла, выделяющегося в процессе деформации [3].

Количество тепла, передаваемого во время горячей обработки давлением, зависит от теплопередачи между инструментом и раскатом, а также от разделяющего их слоя окалина. В особых случаях решающее влияние на теплопередачу могут также оказать слои смазки или охлаждающей жидкости.

При расчете теплопередачи между раскатом и инструментом за основу берутся температуры в средней части (внутри) раската и инструмента. При этом допускается, что тепловой поток через границы раздела раскат – окалина и окалина – инструмент постоянен. Кроме того, предполагается, что количество поступающего тепла должно быть равно количеству уходящего тепла, через элемент площадью  $dA$  за единицу времени  $dt$  от раската инструменту может быть отдано количество тепла равное:

$$d^2Q = \alpha_z (T_{z,\omega,g} - T_{z,m}) dA dt; \quad (1)$$

где:  $\alpha_z$  – коэффициент теплоотдачи на границе раздела раскат – окалина, отнесенный к половине толщины слоя окалина;  $d^2Q$  – количество тепла;  $T_{z,\omega,g}$  – температура поверхности контакта окалина – раскат;  $T_{z,m}$  – температура середины слоя окалина.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_z$  рассчитывается по формуле:

$$\alpha_z = \frac{2\lambda_z}{S}, \quad (2)$$

где:  $\lambda_z$  – коэффициент теплопроводности;  $S$  – толщина слоя окалина.

Таким образом, в общем случае, при расчетах теплопередачи необходимо учитывать коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и теплопроводности  $\lambda$  материалов, участвующих в процессе теплопередачи, а также толщину их слоя  $S$ , в частности для окалины, смазки или охлаждающей жидкости.

**Изложение основных материалов исследования.** При обработке давлением необходимо соблюдение определенного температурного режима для осуществления собственно процесса деформации и получения свойств материала (в частности, зависящих от температуры конца прокатки), необходимых для дальнейшей обработки или применения готового проката. Существуют несколько видов теплопередачи от одной среды к другой: передача тепла контактным путем, передача тепла конвекцией и передача тепла излучением. Указанные виды теплопередачи относятся к расходной части теплового баланса системы «прокатный стан – прокатываемая полоса». Далее рассмотрим отдельно каждый из них.

#### Передача тепла контактным путем.

Потери тепла в этом случае осуществляются через валки, при гидросбиве окалины, а также при контакте с охлаждающей водой.

*Теплопроводность через валки.* Если отнести количество тепла  $Q$  к поверхности очага деформации, возникающей во время обработки давлением, и учесть объем  $V$ , плотность  $\rho_{ог}$  и удельную теплоемкость  $c_{pог}$  материала раската то разность температур  $\Delta T_L$  можно рассчитать по формуле:

$$\Delta T_L = \frac{[2 \cdot A_d \cdot (T_{ог} - T_{\omega}) \cdot t_U \cdot \alpha_L]}{c_p \cdot \rho \cdot V}, \quad \alpha_L > k_L \quad (3)$$

Коэффициент  $k_L$ , описывающий теплопередачу между двумя полубесконечными (бесконечными с одной стороны) телами, рассчитывается с помощью гауссовой функции ошибок  $\Phi(n)$  по формуле:

$$k_L = \left( \frac{b_{ог}}{2 \cdot \sqrt{t_U}} \right) \left\{ \left( \frac{e^{n^2}}{n} \right) \cdot [1 - \Phi(n)] - \frac{1}{n} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right\}; \quad (4)$$

причем  $n$  зависит согласно выражению (5) от коэффициента теплопроводности слоя окалины  $\lambda_z$ , коэффициента глубины прогрева изделия  $b_{ог}$  (рассчитывается по формуле (6)), коэффициента температуропроводности изделия  $\alpha_{ог}$  (рассчитывается по формуле (7)), времени контакта, т.е. времени деформации  $t_U$  и толщины слоя окалины  $S_z$ .

$$n = \left( \frac{2\lambda_z}{b_{ог}} \right) \cdot \sqrt{\frac{t_U}{S_z}}; \quad (5)$$

$$b_{ог} = \frac{\lambda_{ог}}{\sqrt{a_{ог}}} = \sqrt{\lambda_{ог} \cdot c_{p_{ог}} \cdot \rho_{ог}}; \quad (6)$$

$$a_{\omega g} = \frac{\lambda_{\omega g}}{\left( c_{p,\omega g} \cdot \rho_{\omega g} \right)}; \quad (7)$$

Формула (4), позволяющая определить коэффициент теплопередачи теплопроводностью  $k_L$ , получена с учетом допущения о линейном распределении температуры по толщине слоя окалины. Эта формула оказывается тем менее точной, чем больше толщина слоя окалины и чем меньше время деформации.

Теплопередача получается наилучшей, когда толщина слоя окалины невелика. При  $S_z \rightarrow 0$  можно получить значение  $K_{Lmax}$  по формуле:

$$K_{L \max} = \frac{b_{\omega g}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{t_U}}; \quad (8)$$

Поскольку окалина действует как теплоизолятор, с увеличением толщины ее слоя теплопередача ухудшается. В случае  $S_z \rightarrow \infty$  по формуле (9) рассчитывается значение  $K_{Lmin}$ :

$$K_{L \min} = \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \cdot \left[ \frac{b_{\omega g} \cdot b_z}{\left( \frac{b_{\omega g}}{\omega g} + b_z \right)} \right] \cdot (t_U)^{-0,5}; \quad (9)$$

При прокатке толстых листов и фасонных профилей для значений  $\alpha_L$  могут быть использованы данные расчета по формуле (10).

$$\alpha_L = \exp\left( 8,9245 - 0,50699 \ln t_s \right); \quad (10)$$

*Потеря тепла при гидросбиве окалины.* Снижение температуры зависит от диаметра ламинарной струи высокого давления  $D_K$ , расстояния водяных сопел от середины ширины полосы  $L_K$ , коэффициента ее теплопроводности  $\alpha_k$  и от разности температур материала на входе  $T_{0\omega g}$  и охлаждающей воды на входе  $T_{0k}$ . Потери тепла при гидросбиве окалины можно определить по формуле:

$$\Delta T_K = \left( \frac{\pi \cdot D_K^2}{2 \cdot l_K \cdot D_K \cdot h_{\omega g} \cdot \rho_{\omega g} \cdot c_{p,\omega g}} \right) \cdot \lambda_K \cdot (T_{0\omega g} - T_{0k}) \cdot \sqrt{\frac{D_K}{\pi \cdot \alpha_K \cdot v_{\omega g}}} \quad (11)$$

*Потери тепла теплопроводностью в валки и с охлаждающей водой.* Потери тепла теплопроводностью и с охлаждающей водой можно определить с помощью эмпирической формулы (12), которая позволяет учесть эти потери при прокатке катанки в черновой и промежуточной группах клетей [10].

$$\Delta T_K + \Delta T_L = \left( \frac{l}{A} \cdot \frac{d}{d} \right) \left( T_{\omega g} - T_m \right) \sqrt{a \cdot \alpha \cdot L \cdot U} \quad (12)$$

*Передача тепла конвекцией*

Потеря тепла путем конвекции сопровождается меньшим снижением температуры раската, чем потеря тепла путем теплопроводности. Потеря тепла конвекцией зависит от времени, разности температур между раскатом и окружающей средой, от геометрических и термодинамических параметров материала раската, а также различного расположения поверхности раската по отношению к направлению передачи тепла конвекцией.

За основу расчета снижения температуры под влиянием конвекции при прокатке толстых листов принята формула (1.13), а при прокатке катанки принята приближенная формула (14):

$$\Delta T_K = \left( \alpha_1 \cdot A_1 + \alpha_2 \cdot A_2 + \alpha_3 \cdot A_3 \right) \cdot \left[ \frac{t \cdot \left( T_{\omega g} - T_{Ug} \right)}{V \cdot c \cdot \rho \cdot \omega g} \right] \quad (13)$$

Для вертикальных поверхностей ( $A_1$ ):

$$\alpha_1 = 2,56 \cdot \left( T_{\omega g} - T_{Ug} \right)^{0,25} \quad (13a)$$

Для  $A_2 = b_1 \cdot l_1$  (верхняя поверхность):

$$\alpha_2 = 3,26 \cdot \left( T_{\omega g} - T_{Ug} \right)^{0,25} \quad (13б)$$

Для  $A_3 = A_2$  (нижняя поверхность):

$$\alpha_3 = 1,32 \cdot \left( T_{\omega g} - T_{Ug} \right)^{0,25} \quad (13в)$$

$$\Delta T_K = \left( \frac{2A \cdot t}{V \cdot c \cdot \rho \cdot \omega g} \right) \cdot \alpha_K \cdot \left( T_{\omega g} - T_{Ug} \right) \quad (14)$$

$$\alpha_K = 8,38 + 41,76 \cdot \sqrt[3]{u^2}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) \quad (14a)$$

**Снижение температуры в результате теплоизлучения.** Количество тепла, отдаваемого поверхностью раската (покрытого окалиной) путем излучения, может быть рассчитано согласно закону Стефана–Больцмана по формуле:

$$Q_S = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left[ \left( \frac{T_{\omega g}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Ug}}{100} \right)^4 \right] \cdot t \cdot A \quad (15)$$

где:  $\varepsilon=0,8$  для поверхности проката, покрытой окалиной;  $C_S$  – коэффициент излучения (абсолютно) черного тела, равный  $C_S=1,067 \cdot 10^{-6}$  кДж/( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}$ ).

**Повышение температуры за счет выделения тепла деформации.** Согласно первому закону термодинамики механическая работа может быть превращена в тепловую энергию. Математически этот закон записывается в виде выражения (16). Разность температур  $\Delta T_U$ , вызванную теплом деформации, можно рассчитать по формуле (17). Эта разность зависит от материала раската и условий деформации. Расчет  $\Delta T_U$  по вышеупомянутой формуле ведется по значениям среднего давления течения и отношения  $F/A_d$ .

$$Q = V \cdot c_{p, \omega g} \cdot \rho_{\omega g} \cdot \Delta T_{\omega g} = V \cdot k_{\omega, m} \cdot \varphi_g \quad (16)$$

$$\Delta T_U = k \cdot \varphi \cdot \left( \frac{1}{c_{p, \omega g} \cdot \rho_{\omega g}} \right) \quad (17)$$

**Повышение температуры за счет преодоления сил контактного трения.** Повышение температуры раската в результате трения  $\Delta T_R$ , наряду с повышением температуры, вызываемой механической работой, необходимо учитывать, в случае если деформируемый объем мал по сравнению с площадью его поверхности.

Величина  $\Delta T_R$  при прокатке фасонных (сортовых) профилей может быть рассчитана по формуле (18). Входящая в нее относительная скорость вращения валков  $V_{rel}$  зависит от частоты вращения  $\omega$  и от высоты раската после прохода.

$$\frac{\Delta T}{R} = \left( \frac{2 \cdot F \cdot V_{rel} \cdot \mu}{V \cdot c \cdot \rho \cdot \omega_g \cdot \omega_g} \right) \cdot t \cdot U ; \quad (18)$$

$$V_{rel} = \frac{0,15}{\omega \cdot h_{1max}} ; \quad (18a)$$

Таким образом, расходную часть теплового баланса составляют передача тепла контактным путем, передача тепла конвекцией и передача тепла излучением. Причем передача тепла теплопроводностью вызывает более существенное снижение температуры прокатываемого металла по сравнению с другими составляющими расходной части теплового баланса.

К доходной части теплового баланса относятся повышение температуры прокатываемого металла под влиянием тепла деформации (деформационный разогрев) и повышение температуры под влиянием трения.

С учетом того обстоятельства, что в Украине стоимость энергоносителей для нагрева заготовок в нагревательной печи стана достаточно высока (кроме того, стоимость топлива для нагревательных печей существенно выше стоимости электроэнергии, расходуемой на деформацию металла в линии стана), особую актуальность приобретает использование энергоэкономных технологий производства проката, позволяющих как снизить расход энергоресурсов, так и обеспечить равномерное распределение температуры раската вдоль линии стана.

В некоторой степени снизить расход энергоресурсов на нагрев заготовок и получить равномерное распределение температуры раската по длине стана позволяет применение технологии прокатки сортовых профилей из заготовок с пониженными температурами.

В мировой практике известны случаи, когда улучшения свойств проката достигают при пониженной температуре исходных заготовок (до 900<sup>0</sup>С). При этом необходимо контролировать нагрузку на двигатели рабочих клеток стана, которая ни в одной клетке не должна превышать допустимую. Увеличивающийся при этом расход электрической энергии на прокатку значительно перекрывается экономией при нагреве и уменьшением потерь при излучении и теплопередаче в процессе обработки на стане. Общая экономия при этом составляет около 15% [4].

Таким образом, применение технологии прокатки сортовых профилей из заготовок с пониженными температурами позволяет снизить себестоимость производства готовой продукции, уменьшить расходную часть теплового баланса системы «прокатный стан – прокатываемая полоса» и, тем самым, обеспечить благоприятное распределение температуры по длине стана. Это, в свою очередь, позволяет сформировать мелкозернистую структуру продуктов распада горячедеформированного аустенита, что

приводит к повышению механических свойств готового проката. Кроме того, для снижения потерь тепла раскатом в процессе его обработки в потоке стана, в дополнение к этому целесообразно использовать теплоизолирующие экраны (эндопанели), устанавливаемые как в промежутках между рабочими клетями, так и между группами рабочих клетей стана. Установка теплоизолирующих экранов эффективна сама по себе, а в сочетании с прокаткой при пониженных температурах исходных заготовок еще больше повышает эффективность применения этой технологии

### **Заключение.**

1. Температурный режим прокатки является важным технологическим параметром, определяющим условия реализации процесса горячей обработки металлов давлением. Во многом он определяется конструктивными особенностями стана – расположением основного и вспомогательного технологического оборудования, а также его техническими характеристиками.

2. Применение энергоэкономных технологий производства проката, в частности прокатки с пониженными температурами исходных заготовок позволит не только снизить расход энергоресурсов, но и обеспечить равномерное распределение температуры раската по длине стана. Деформационная обработка с пониженными температурами исходных заготовок обеспечивает формирование мелкозернистой структуры продуктов распада аустенита и повышение комплекса физико–механических свойств в целом.

3. При использовании энергоэкономных технологий, связанных с деформационной обработкой металла при пониженных температурах исходных заготовок, особое внимание следует уделить выбору температурно–скоростного режима прокатки на стане. Этот режим должен быть выбран таким образом, чтобы нагрузка на основное технологическое оборудование стана ни в одной из его рабочих клетей не превышала максимально допустимую, установленную техническими характеристиками оборудования стана.

1. *Прогнозирование температурного режима прокатки на непрерывном сортовом стане / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Л.В. Кулаков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.научн.тр. ИЧМ. – Вып.3. – К.:Наукова думка, 1999. –С.234–241.*
2. *Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки. – М.: «Металлургия», 1974. –176 с.*
3. *Оптимизация расхода энергии в процессах деформации / А.Хензель, Т.Шпиттель, М.Шпиттель и др. / Под ред. Т.Шпиттеля и А.Хензеля: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. –184 с.*
4. *Amano K., Hoshino T., Kawabata F. Recent activities in research of shapes, bars and wire rods // Kawasaki Steel Techn. Report. –1999. –№41. –P.52–54.*

*Статья рекомендована к печати канд.техн.наук И.Ю.Приходько*