

Видно, что окатыши, содержащие ПМС связующее, характеризуются высокими показателями прочности на сжатие (~2,3 кг/ок) и низкими значениями пластичности (1,2–1,8 раз), аналогичные данные и у окатышей с ИПС добавкой. Однако, показатели качества сырых окатышей с бентонитовой глиной, показывает высокую пластичность (до 5 раз) и низкую прочность на сжатие ~1,8...2 кгс. Высокая пластичность окатышей с бентонитом обусловлена их высокой влажностью, по сравнению с окатышами с ИПС и ПМС связующими, влажность которых составила 8,4 % и 9,1 % соответственно.

Анализ зависимостей показателей механических свойств сырых окатышей от разного типа связующих добавок показывает, что окатыши, изготовленные из гематитового концентрата с удельной поверхностью 1800 и 2000 см<sup>2</sup>/г, характеризуются более высокими показателями, чем окатыши с удельной поверхностью 1530 см<sup>2</sup>/г и, поэтому для получения качественных сырых окатышей необходимо использовать гематитовый концентрат с удельной поверхностью выше 1800 см<sup>2</sup>/г.

#### **Список использованных источников**

1. *Tanaka H., Miyagawa K., Harada T.* FASTMET, FASTMELT, and ITmk3: Development of New Coal-based Ironmaking Processes // Direct from Midrex, RHF Technologies. 2007/2008. P. 8–13.
2. *Поколенко С.И.* Закономерности окомкования и сушки окатышей из гематитового концентрата / С.И. Поколенко, И. С. Вохмякова, Ю. Г. Ярошенко и [др.] // Сталь. 2010. № 9. С. 44–45.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВОДЫ С ГОРЯЧИМ МЕТАЛЛОМ**

© А.Р. Гареев, Д.Х. Девятов, 2012

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск

© С.А. Муриков, В.Н. Урцев, А.В. Шмаков, 2012

ООО ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск

Горячая прокатка стали – один из основных технологических процессов черной металлургии, с помощью которого отрасль производит значительную долю конечной продукции или полуфабрикатов для дальнейшей переработки. Одно из основных требований к технологии горячей прокатки – производство продукции с заданными механическими характеристиками. В настоящее время все больше развивается тенденция получения заданных свойств за счет прецизионной термомеханической обработки материала. Такой подход удешевляет продукцию, однако предъявляет очень высокие требования к гибкости управления технологическими (в частности – термическими) режимами.

Контроль термических режимов на участке ламинарного охлаждения является одной из наиболее сложных задач в металлургии. Сложность данного процесса обусловлена не только наличием большого количества влияющих факторов, но и невозможностью применения пирометров из-за наличия слоя воды на поверхности раската. В этих условиях моделирование тепловых процессов позволяет дать более полную и достоверную информацию о термическом состоянии металла. В тоже время строгая теория кипения при гидродинамическом обтекании тела струей жидкости отсутствует.

С целью обеспечения количественного совпадения расчета термического состояния металла на участке ламинарного охлаждения с реальностью был произведен анализ взаимодействия струи воды с горячим металлом.

Для определения теплофизических и кинетических констант, необходимых при расчетах, в ИТЦ «Аусферр» проведен ряд экспериментальных работ. Исследования проводились на углеродистых сталях в диапазоне от ст10 до У12. Не останавливаясь на деталях экспериментов, приведем их результаты:

1. Теплоемкость углеродистых сталей в аустенитном состоянии (измерения проводились при температурах 1100 – 600 °С) практически не зависит от концентрации углерода и может быть аппроксимирована прямой:

$$C(T) = 0.5083T + 121.44,$$

где  $C(T)$  – в Дж/кг·град;

$T$  – в градусах Цельсия.

2. Теплоемкость углеродистых сталей при низких температурах так же не зависит от концентрации углерода и аппроксимируется в диапазоне 350 – 650 °С зависимостью:

$$C(T) = 0.0021T^2 - 1.3157T + 663.37,$$

обозначения те же.

Рассмотрим взаимодействие струи воды с металлом на примере стана горячей прокатки 2000 ОАО «ММК». На стане 2000 трубки верхнего и нижнего коллекторов имеют одинаковый диаметр (16 мм х 2,2) и расположены на расстоянии 2200 и 125 мм относительно поверхностей стальной полосы. В первом случае вода падает вниз с ускорением свободного падения, а во втором – вода движется вверх равнозамедленно. Зная паспортный расход через трубку и изменение скорости движения воды, можно оценить диаметр и скорость струи в момент контакта с поверхностью полосы (рис.1).

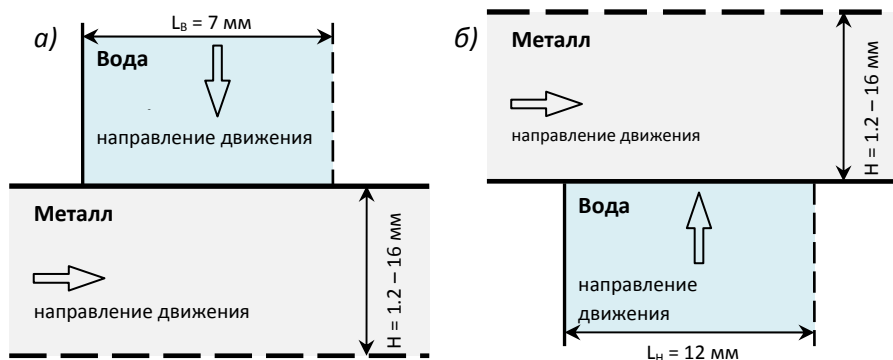


Рис. 1. Параметры взаимодействия струи воды со стальной полосой на участке ламинарного охлаждения стана 2000 ОАО «ММК»:

а) – струя сверху; б) – струя снизу

Время прохождения полосы через пятно контакта (время взаимодействия с водой) составляет:

$$\text{сверху:} \quad \tau = \frac{L_B}{V_0} = 0.35 - 3.5 \text{ мс}$$

$$\text{снизу:} \quad \tau = \frac{L_H}{V_0} = 0.6 - 6 \text{ мс}$$

1.1

и не превышает 0,006 с. При таком времени процесса можно пренебречь эффектами теплообмена по всем осям, кроме оси  $Y$ , по которой производится вынужденный теплообмен. Таким образом, анализ процесса можно проводить в одномерной постановке. Отметим также, что за указанные времена фазовые превращения не начинаются, поэтому при расчетах необходимо использовать истинную, а не эффективную теплоемкость.

Попадая на поверхность металла, вода нагревается до температуры кипения, а потом испаряется. Ниже приведена оценка максимальной мощности теплосъема с единицы площади поверхности металла при условии нагрева воды до 100 °С и ее полного испарения [1].

$$q = cm\Delta T = cpV(100 - T_0) \sim 1.76 \cdot 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad 1.2$$

$$Q = mv = pVv \sim 1.58 \cdot 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad 1.3$$

где  $c$  – теплоемкость,  $m$  – масса,  $\rho$  – плотность,  $v$  – теплота парообразования,  $V$  – объем,  $T_0$  – начальная температура (все ранее – для воды),  $q$  – теплоотдача за счет нагрева,  $Q$  – теплоотдача за счет кипения.

Сравним полученные цифры с оценкой мощности параллельно протекающих на установке процессов:

1. Мощность радиационной теплоотдачи [2]:

$$Q_R = \varepsilon \sigma T^4 \sim 8.6 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad 1.4$$

2. Кондуктивный тепловой поток в стали при градиенте 800° на 0,1 мм [2]:

$$Q_C = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \sim 8 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad 1.5$$

Очевидно, что предельная величина теплосъема в условиях установки ламинарного теплообмена недостижима – при соприкосновении воды с раскаленным металлом неизбежно интенсивное парообразование и разбрызгивание части массы падающей воды. Однако следует отметить, что:

- сечение струи невелико и не препятствует удалению пара из очага кипения;
- струя падает на поверхность металла перпендикулярно, инерция эффективно прижимает воду к поверхности;
- даже величина тепла, затраченного на нагрев воды до температуры кипения, очень велика и превышает возможности подвода тепла с глубины всего 0,1 мм.

Это означает, что поверхность металла практически мгновенно остывает до температуры кипения, и, пока тепловое сопротивление холодного приповерхностного слоя не станет слишком велико, поддерживается при этой температуре. По мере роста толщины холодного слоя снижается интенсивность парообразования, и в какой-то момент кипение прекращается. После завершения кипения температура поверхности определяется балансом подводимого и отводимого тепла:

$$Q_C = Q_h, \quad 1.6$$

где  $Q_C$  – кондуктивный подвод тепла к поверхности;

$Q_h$  – тепло, полученное нагреваемой водой.

Оценка компонентов этого баланса:

$$Q_C = cm(T_s - T_{0в}), \quad 1.7$$

$$Q_h = \lambda \frac{T_{0м} - T_s}{X}, \quad 1.8$$

где  $T_s$  – температура поверхности металла,  $T_{0в}$  – начальная температура воды,  $T_{0м}$  – начальная температура металла,  $X$  – глубина проникновения тепловой волны.

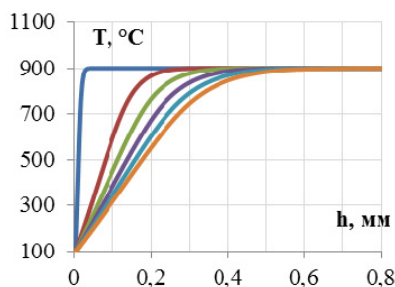


Рис. 2. Глубина проникновения тепловой волны с поверхности металла, слева направо: 0,01 м/с, 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с, 4 м/с, 5 м/с охлаждения водой

Выполним численный расчет взаимодействия струи воды и металла с использованием предложенного механизма. Рис. 2 иллюстрирует распространение тепловой волны внутрь металла.

Распространение тепловой волны в глубь металла приводит к увеличению толщины холодного слоя. Следствием этого является снижение величины теплового потока через поверхность металла. Несмотря на то, что расчет одномерный, движение металла приводит к тому, что развитие процесса по времени разворачивает картину по направлению движения. В

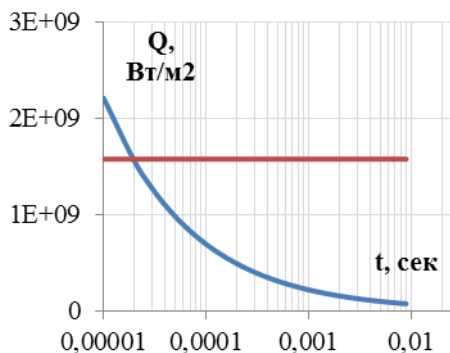


Рис. 3. Зависимость теплового потока через поверхность металла от времени взаимодействия со струей воды. Горизонтальная прямая – количество тепла, необходимого для нагрева воды до  $100^\circ\text{C}$

этой связи развертка по времени и по координате эквивалентны.

На рис. 3 приведена зависимость теплового потока от времени. Из графика на рис. 3 видно, что тепловой поток, доставляемый из глубины металла, выравнивается с потоком, требующимся для нагрева воды до кипения, примерно за 20 мкс. За это время металл при наибольшей скорости движения перемещается всего лишь на 0,4 мм. Таким образом, кипение, возникшее на фронте взаимодействия струи с металлом, практически мгновенно. Температура, до которой нагревается вода после прекращения кипения, определяется условиями теплового баланса (1,6–1,8). В графике рис. 3 мы выполняли расчет для температуры поверхности, равной температуре кипения. На самом деле она, по мере распространения тепловой волны вглубь металла и увеличения теплового сопротивления холодного слоя, снижается. Значение температуры, удовлетворяющей условию теплового баланса можно

определить итерационным расчетом. Результаты такого расчета приведены на рис. 4.

Температура поверхности металла ограничена сверху температурой кипения, а снизу – начальной температурой воды. На рис. 5 приведены результаты расчета тепловых потоков для температуры  $100^\circ\text{C}$  (кривая) и точки, соответствующие температуре, полученной методом теплового баланса.

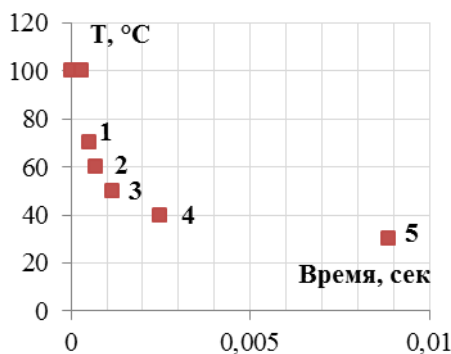


Рис. 4. Изменение температуры поверхности металла во времени при взаимодействии со струей воды

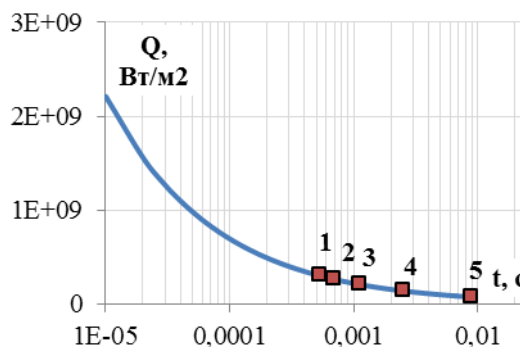


Рис. 5. Влияние выбора температуры поверхности на величину теплового потока. Кривая – расчет для температуры  $100^\circ\text{C}$ , маркеры – итерационный расчет температуры поверхности (соответствуют точкам на рис. 4)

Отличие величин теплового потока незначительно, снижение температуры поверхности от  $100^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$  приводит к изменению теплового потока на 0,5 %. Отметим, что вода при таком снижении температуры получает в несколько раз меньше тепла.

Таким образом, возможно не выполнять расчет теплового баланса для вычисления температуры поверхности – если мы при расчете теплового состояния металла оставим температуру поверхности постоянной, ошибка будет крайне невелика.

Вывод из сказанного очевиден: теплосъем полностью определяется скоростью доставки тепла к поверхности металла из его глубины. Если струя имеет достаточную скорость (напор), ее возможности по удалению доставленного тепла намного превышают возможности кондуктивных тепловых потоков. Вместе с тем очевидно, что струя должна быть хорошо сформированной – в частности, при использовании щелевых сопел сечение щели должно быть существенно меньше сечения подводящих труб.

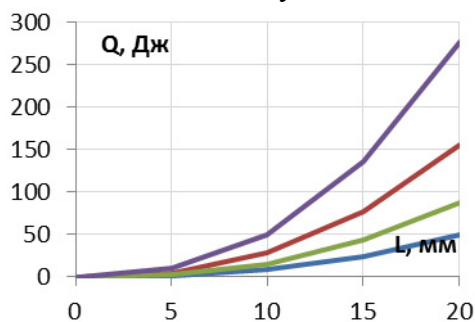


Рис. 6. Количества тепла, отнимаемое у металла одиночной струей воды диаметром L. Сверху вниз: 900 °C – 2 м/с; 600 °C – 2 м/с; 900 °C – 20 м/с; 600 °C – 20 м/с

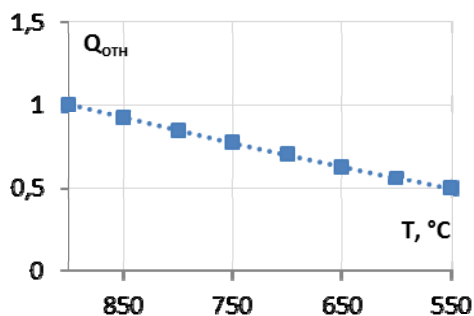


Рис. 7. Влияние на энергосъем температуры металла. За единицу принят энергосъем при 900 °C

Для иллюстрации возможностей расчета струйного охлаждения движущегося металла приведем результаты расчетов величин съема тепла одиночной струей. На рис. 6 приведена зависимость величины теплосъема от ширины струи.

Из приведенных данных видно, что основные факторы, влияющие на величину теплосъема – температура металла и скорость его движения. На рис. 7 приведена зависимость относительной величины энергосъема от температуры металла.

В результате проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. Теплосъем полностью определяется скоростью доставки тепла к поверхности металла из его глубины. Если струя имеет достаточную скорость (напор), ее возможности по удалению доставленного тепла намного превышают возможности кондуктивных тепловых потоков.

2. Кипение, возникшее на фронте взаимодействия струи с металлом, практически мгновенно прекращается и далее (в пределах площади струи) происходит теплообмен при ламинарном обтекании поверхности водой.

3. Изменение температуры поверхности от начальной температуры воды до температуры кипения практически не влияет на величину теплового потока через поверхность металла.

На примере моделирования процесса ускоренного охлаждения листа на линии стана горячей прокатки 5000 ОАО «ММК» продемонстрирована возможность получения расчетов, совпадающих с результатами, полученными при использовании технологии [3].

#### Список использованных источников

1. Бахмат Г.В., Кабес Е.Н. Теплотехника : учеб.-методич. комплекс. Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. 149 с.
2. Теплотехника : учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и [др.]; Под. ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
3. Шмаков А.В., Салганик В.М., Денисов С.В., Гареев А.Р., Пустовойтов Д.О. Комплексное моделирование технологии контролируемой прокатки микролегированных трубных сталей повышенных категорий прочности на толстолистовом стане 5000 // Сталь. 2012. № 2. С. 42.