

проводности цилиндра при неоднородных граничных условиях // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 12. – С. 94–97.

5. Горбунов А.Д., Гольдфарб Э. М. Нахождение корней трансцендентных уравнений в задачах теплопроводности пластины при неоднородных граничных условиях // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 8. – С. 104–108.

6. Горбунов А.Д., Гольдфарб Э. М. Нахождение корней трансцендентных уравнений в задачах теплопроводности шара при неоднородных граничных условиях // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 2. – С. 79–83.

7. Горбунов А.Д. К расчету термических напряжений при конвективном нагреве шара // Математичне моделювання. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. № 1(24). – С. 23–28.

8. Горбунов А.Д. К расчету термических напряжений при конвективном нагреве цилиндрических тел // Математичне моделювання. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. № 2(25). – С. 11–16.

9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 600 с.

пост. 26.01.12

Тепловые аспекты реализации совмещенных процессов разливки-прокатки

БИРЮКОВ А.Б.

Донецкий национальный технический университет

Разработаны приемы использования математической модели тепловой обработки материалов для изучения тепловых процессов в рамках литейно-прокатных модулей. Для эффективного и прозрачного анализа тепловых процессов предложен ряд зависимостей, позволяющих определять количества теплоты, необходимые для реализации конкретных операций на основании использования понятия среднемассовой энтальпии.

Розроблено заходи щодо використання математичної моделі теплової обробки матеріалів для вивчення теплових процесів в рамках ливарно-прокатних комплексів. Для ефективного і прозорого аналізу теплових процесів запропоновано ряд залежностей, що дозволяють визначити кількість теплоти, що необхідна для реалізації конкретних операцій на базі використання поняття середньомасової ентальпії.

Subways for material heat processing mathematical model use for casting-rolling complexes heat processes study are worked out. For heat processes effective and clear analysis some dependences that allow heat quantity demanded for concrete operations realization estimating on the base of mass average enthalpy concept use are proposed.

Постановка проблемы исследования. Известно, что технологии совмещенной разливки-прокатки необычайно перспективны с точки зрения повышения энергоэффективности. Данная работа посвящена исследованию тепловых аспектов реализации совмещенных процессов разливки-прокатки.

Анализ публикаций на тему исследования

Уже несколько десятилетий во многих странах активно ведутся исследования в области реализации совмещенных процессов разливки прокатки, что позволило накопить достаточно богатый практический и теоретический опыт. Усилия ученых, работающих в этом направлении, сосредоточены на минимизации расходов теплоты на нагрев материала перед прокатным станом. В идеальном случае должна реализовываться прямая прокатка без всякого подогрева. Значительные успехи в данной области достигнуты российскими исследователями. В рамках украинской черной металлургии совмещенные процессы разливки-прокатки до сих пор не нашли применения, а для цветной металлургии актуальной является задача совершенствования существующих литейно-прокатных модулей и создания новых конструкций [1-2].

Изложение основного материала. Для оценки эффективности использования литейно-прокатных модулей (ЛПМ) по сравнению с разомкнутым технологическим циклом и для сравнения тепловой работы различных ЛПМ в данной работе предложено ввести понятие эффективности использования тепла разливаемого металла:

$$\eta_{эф} = \frac{Q_{х.п.} - Q_{ЛПМ}}{Q_{х.п.}},$$

где $Q_{х.п.}$ – теплота, затрачиваемая на нагрев металла под прокатку при холодном посаде, Дж/кг;

$Q_{ЛПМ}$ – теплота, затрачиваемая на нагрев металла под прокатку с учетом использования тепла разливаемого металла (горячий посад или прямая прокатка), Дж/кг.

Крайними значениями эффективности использования тепла разливаемого металла являются «0» и «1», причем первое значение соответствует полному отсутствию использования тепла разливаемого металла и холодному посаду, а второе – прямой прокатке без промежуточного нагрева. Использование предложенного показателя позволяет сравнивать между собой

эффективность работы различных ЛПМ или одной и той же ЛПМ при разных режимах работы.

Таким образом, экономия тепла (ΔQ , Вт) при использовании ЛПМ по сравнению с разомкнутой схемой и холодным посадом составляет:

$$\Delta Q = Q_{хп} \cdot \eta_{эф} \cdot a \cdot b \cdot v \cdot \rho,$$

a, b – ширина и высота заготовки в поперечном сечении, м;

ρ – плотность материала заготовки, кг/м³;

v – скорость разливки, м/с.

Максимальная экономия будет достигнута при значении $\eta_{эф}$, равном единице. Однако на практике есть объективные причины, которые не позволяют реализовывать прямую прокатку без всякого промежуточного подогрева:

- реальные теплосодержание металла и его среднemasсовая температура могут быть недостаточны для того, чтобы начинать прокатку и иметь достаточный запас тепла для ее завершения;
- непрерывнолитые заготовки могут иметь дефекты, которые не позволяют получать прокатную продукцию заданного качества, что определяет необходимость осмотра заготовок и в случае, когда это возможно, устранения дефектов путем горячего ремонта.

Для наиболее эффективной синхронизации работы ЛПМ и достижения максимально возможной степени использования тепла заготовок для существующих и проектируемых комплексов помимо надежной и бездефектной работы отдельных технологических элементов необходимо иметь научный инструментарий для описания и изучения различных процессов в рамках ЛПМ.

В общем виде известны научные и инженерные подходы для комплексного описания процессов разливки – доводки теплового состояния заготовок – прокатки в рамках единого комплекса непрерывного действия [1]. Однако в рамках украинской металлургической науки они еще не отработаны в полной мере. Особенно важной является разработка теплотехнических параметров этой технологии, что необходимо для проектирования оборудования таких комплексов, выбора рациональных (оптимальных) параметров его работы и реализации эффективного автоматического управления.

Для решения названных вопросов в данной работе используется математическая модель тепловой обработки материалов, которая базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной

теплопроводности в двухмерной постановке в декартовой прямоугольной системе координат:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_{эф}} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где y, z – координаты, отсчитываемые вдоль осей симметрии поперечного сечения заготовки, м.

Задача определения температурного состояния материала решается для условно выбранного поперечного расчетного сечения, которое движется вдоль технологической оси ЛПМ со скоростью перемещения материала.

Поскольку расчетное поперечное сечение заготовки при движении вдоль технологической оси ЛПМ последовательно проходит участки с различными закономерностями теплообмена, необходимо вариантное задание граничных условий теплообмена на поверхности расчетного сечения. При использовании граничных условий третьего рода значение итогового коэффициента теплоотдачи α и температуры среды $T_{ср}$ для конкретных узлов на поверхности расчетного сечения задаются при помощи следующих выражений:

$$\alpha(x, y, z) = \begin{cases} \alpha_1(y, z) \text{ при } x \leq L_1; \\ \alpha_2(y, z) \text{ при } L_1 < x \leq L_2; \\ \dots \\ \alpha_i(y, z) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i; \\ \dots \\ \alpha_{n-1}(y, z) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n; \end{cases}$$

$$T_{ср}(x, y, z) = \begin{cases} T_{ср1}(y, z) \text{ при } x \leq L_1; \\ T_{ср2}(y, z) \text{ при } L_1 < x \leq L_2; \\ \dots \\ T_{срi}(y, z) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i; \\ \dots \\ T_{срn}(y, z) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n, \end{cases}$$

где x – координата расчетного сечения на технологической оси ЛПМ, м;

y, z – координата конкретного узла на поверхности расчетного поперечного сечения, м;

L_1, L_2, L_i, L_n – длины характерных участков ЛПМ, м;

n – число характерных участков ЛПМ.

Текущее положение расчетного сечения в зависимости от времени определяется как

$$x(\tau) = \begin{cases} v_1 \cdot \tau \text{ при } \tau \leq \tau_{пред1}, \text{ где } \tau_{пред1} = L_1 / v_1 \\ L_1 + v_2 \cdot (\tau - \tau_{пред1}) \text{ при } \tau_{пред1} < \tau \leq \tau_{пред2}, \text{ где } \tau_{пред2} = \tau_{пред1} + L_2 / v_2 \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{i-1} L_j + v_i \cdot (\tau - \tau_{предi-1}) \text{ при } \tau_{предi-1} < \tau \leq \tau_{предi}, \text{ где } \tau_{предi} = \tau_{предi-1} + L_i / v_i \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n-1} L_j + v_n \cdot (\tau - \tau_{предn-1}) \text{ при } \tau_{предn-1} < \tau \leq \tau_{предn}, \text{ где } \tau_{предn} = \tau_{предn-1} + L_n / v_n \end{cases}$$

где v_1, v_2, v_i, v_n – скорости движения расчетного сечения в пределах характерных участков, м/с;

$\tau_{пред1}, \tau_{пред2}, \tau_{пред3}, \tau_{предn}$ – время нахождения расчетного сечения в конечных токах соответствующих участков ЛПМ, с.

Предложены следующие подходы для определения скоростей движения расчетного сечения по участкам ЛПМ. Для МНЛЗ эта величина численно равна скорости разливки. Для порезки заготовок и их нахождения на холодильнике для осмотра и ремонта до посадки в печь вводится условная скорость движения $v_{усл}$ (в общем случае может быть выбрана любая величина), тогда условная длина такого участка определяется в зависимости от времени пребывания заготовки ($\tau_{зад}$) на нем, как $L_{усл} = v_{усл} \cdot \tau_{зад}$.

Для смежных участков, разделенных прокатным оборудованием, изменение скорости определяется изменением площади поперечного сечения. Согласно условию сплошности, скорости на таких участках относятся как $\frac{v_i}{v_{i-1}} = \frac{F_{i-1}}{F_i}$, где F_{i-1} и F_i – площади

поперечного сечения заготовки для двух соседних характерных участков ЛПМ.

Для максимальной информативности результатов математического моделирования тепловой работы ЛПМ, возможности их использования на стадии проектирования таких агрегатов или эффективного управления существующими агрегатами в литературе введено понятие среднemasсовой энтальпии металла [1], которую предложено вычислять для начального и конечного участков каждого элемента оборудования ЛПМ.

В данной работе величину среднemasсовой энтальпии предложено определять для каждого временного шага в рамках математической модели по следующим зависимостям.

Энтальпия произвольного элементарного объема металла определяется как

$$i = \begin{cases} Q_{кр} + T_c \cdot c_{тм}(T_c) + (t - T_{л}) \cdot c_{жм}(t) & \text{при } t \geq T_{л} \\ t \cdot c_{тм}(t) & \text{при } t \leq T_c \\ c_{тм}(T_c) + Q_{кр} \cdot \left(1 - \frac{T_{л} - t}{T_{л} - T_c}\right) & \text{при } T_c < t < T_{л} \end{cases},$$

где $c_{тм}, c_{жм}$ – удельные массовые теплоемкости твердого и жидкого металла соответственно, Дж/(кг·К);

$Q_{кр}$ – теплота кристаллизации, Дж/кг.

Тогда среднemasсовая энтальпия в зависимости от геометрических условий определяется следующим образом:

– для одномерной задачи и прямоугольной системы координат (моделирование температурного поля сляба)

$$i_{см} = \frac{\sum_{j=2}^{n-1} i_j}{n-2};$$

– для двухмерной задачи и прямоугольной системы координат (моделирование температурного поля сортовой заготовки, либо прецизионное моделирование

$$\text{температурного поля сляба)} \quad i_{см} = \frac{\sum_{j=2}^{n-1} \sum_{k=2}^{m-1} i_{j,k}}{(n-2) \cdot (m-2)};$$

– для одномерной задачи и полярной системы

$$\text{координат } i_{см} = \frac{\sum_{j=2}^{l-1} (i_j \cdot (R_{j+1} - R_j))}{R},$$

где n, m, l – число узлов сетки по толщине, ширине и радиусу заготовки соответственно.

Использование величины среднemasсовой энтальпии позволяет путем простых выражений определять количества тепла, требуемые для доведения теплового состояния заготовок от исходного состояния до заданного:

– для движущегося потока материала (Вт): $Q = a \cdot b \cdot v \cdot \rho \cdot (i_{см2} - i_{см1})$;

– для отдельной заготовки (Дж): $Q = a \cdot b \cdot L \cdot \rho \cdot (i_{см2} - i_{см1})$,

где $i_{см1}, i_{см2}$ – среднemasсовые энтальпии металла в исходном и заданном состояниях, Дж/кг;

L – длина заготовки, м.

Ниже систематизированы типовые задачи, решаемые при помощи предложенного инструментария:

– решение вопроса о достаточности теплосодержания заготовки после МНЛЗ для прямой прокатки без догрева (в случае если это допускается по технологическим соображениям: непрерывнолитая заготовка заведомо не имеет дефектов, которые вызовут отбраковку прокатной продукции, поэтому осмотр и ремонт не нужны). Для этого полученные в результате численных экспериментов данные о среднemasсовой энтальпии металла после МНЛЗ сравниваются со значением энтальпии, соответствующим среднemasсовой температуре, необходимой для прокатки;

– определение рационального времени выравнивания температурного поля заготовок, обладающих после МНЛЗ достаточным запасом тепла для прокатки, на основе анализа результатов численных экспериментов. Для этого проводятся численные эксперименты для комплекса: МНЛЗ – выравнивание температурного поля, при этом в качестве времени выравнивания задается величина, заведомо превышающая требуемое значение. Из анализа изменения температуры в узлах сетки по толщине заготовки на соответствующей диаграмме делается вывод о том, в какой момент времени достигается приемлемая величина перепада температур, и выравнивание может быть остановлено;

– определение общего количества тепла (тепловой мощности), которое необходимо подвести к металлу для догрева заготовок, не обладающих достаточным запасом тепла:

– для заготовки:

$$Q = a \cdot b \cdot L \cdot \rho \cdot (i_{см\text{зад}} - i_{см\text{МНЛЗ}}), \text{ Дж} \quad (1)$$

– требуемая тепловая мощность агрегата для догрева заготовок, например, для случая полной синхронизации МНЛЗ и стана имеем

$$Q = a \cdot b \cdot v \cdot \rho \cdot (i_{см\text{зад}} - i_{см\text{МНЛЗ}}), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где a, b – размеры граней заготовки в поперечном сечении заготовки, м;

v – скорость разливки, м/с;

ρ – плотность металла заготовок, кг/м³;

$i_{см\ зад}$, $i_{см\ МНЛЗ}$ – среднemasсовая энтальпия металла заготовок заданная и после МНЛЗ (или осмотра и ремонта на холодильнике) соответственно, Дж/кг.

– определение средней плотности теплового потока, который необходимо подводить в печном агрегате для догрева материала, при условии реализации этой операции в течение заданного промежутка времени τ_n :

– при нагреве сортовой заготовки с четырех сторон (методическая печь с шагающими балками):

$$\bar{q} = \frac{a}{4 \cdot \tau_n} \cdot \rho \cdot (i_{зад} - i_{послеМНЛЗ});$$

– при нагреве сортовой заготовки с двух сторон (толкательная методическая печь с двухсторонним обогревом):

$$\bar{q} = \frac{a}{2 \cdot \tau_n} \cdot \rho \cdot (i_{зад} - i_{послеМНЛЗ});$$

– при нагреве сортовой заготовки с одной стороны (толкательная методическая печь с односторонним обогревом):

$$\bar{q} = \frac{a}{\tau_n} \cdot \rho \cdot (i_{зад} - i_{послеМНЛЗ});$$

– при двухстороннем нагреве сляба (притоком тепла через узкие грани пренебрегаем):

$$\bar{q} = \frac{b}{2 \cdot \tau_n} \cdot \rho \cdot (i_{зад} - i_{послеМНЛЗ});$$

– при одностороннем нагреве сляба (притоком тепла через узкие грани пренебрегаем):

$$\bar{q} = \frac{b}{\tau_n} \cdot \rho \cdot (i_{зад} - i_{послеМНЛЗ}).$$

– выбор температуры печи, которая позволяла бы достичь заданную среднюю плотность теплового потока на поверхность материала – эту задачу можно решить, используя аналитические подходы (зная начальную температуру поверхности металла и заданный тепловой поток, напрямую рассчитать температуру печи) либо при помощи математической модели, задавая различные значения температуры печи для проведения численных экспериментов и зафиксировав значение температуры печи, позволяющее достичь заданный результат;

– анализ теплового состояния металла заготовок после нагрева на предмет приемлемости полученного значения теплового перепада.

Таким образом, в данном разделе создан комплекс инструментов, позволяющих решить как

тепловые аспекты вопросов предварительной конструкторской проработки комплексов совмещенной разливки-прокатки, так и производить углубленное исследование и оптимизацию работы существующего оборудования.

Пример исследования температурного поля заготовки при ее нахождении в рамках ЛПМ для производства толстолистового проката на участке МНЛЗ – охлаждение на холодильнике – нагрев в печи представлен на рис. 1. При этом использовались следующие исходные данные: геометрические размеры сляба в поперечном сечении 200x2000 мм, скорость разливки – 1,2 м/мин, длина технологической оси МНЛЗ – 22 м, длины секторов ЗВО: 1,35, 3, 5 м; установленные значения коэффициентов теплоотдачи: 500, 400, 200 Вт/(м²·К). Время формирования заготовки в пределах МНЛЗ определяется скоростью разливки и составляет 1100с.

Время охлаждения на воздухе выбиралось из условия снижения температуры поверхности до 815°С и составило 3500 с.

Нагрев осуществляется до достижения металлом среднemasсовой температуры 1200°С и его продолжительность составила (на основании анализа результатов численных экспериментов) 3400 с. Температура печи при этом была установлена на уровне 1350 °С, нагрев двухсторонний.

Необходимый расход тепла определен с использованием концепции среднemasсовой энтальпии материала при помощи выражения (2), а расход топлива при помощи известной зависимости:

$$V_{тр} = \frac{Q + Q_{пот}}{\eta \cdot Q_{нр}}$$

где $Q_{пот}$ – мощность теплотеря печного агрегата, Вт;
 $Q_{нр}$ – теплота сгорания топлива, Дж/м³;

η – коэффициент использования топлива, вычисленный для конкретных значений температуры уходящих газов, расхода уходящих газов и коэффициента рекуперации.

Для рассматриваемого примера требуемая тепловая мощность печного агрегата составила 13,32 МВт, а расход топлива 0,648 м³/с (при теплоте сгорания 35,8 МДж/м³, значении коэффициента рекуперации 0,4, значении температуры уходящих продуктов сгорания 1350°С).

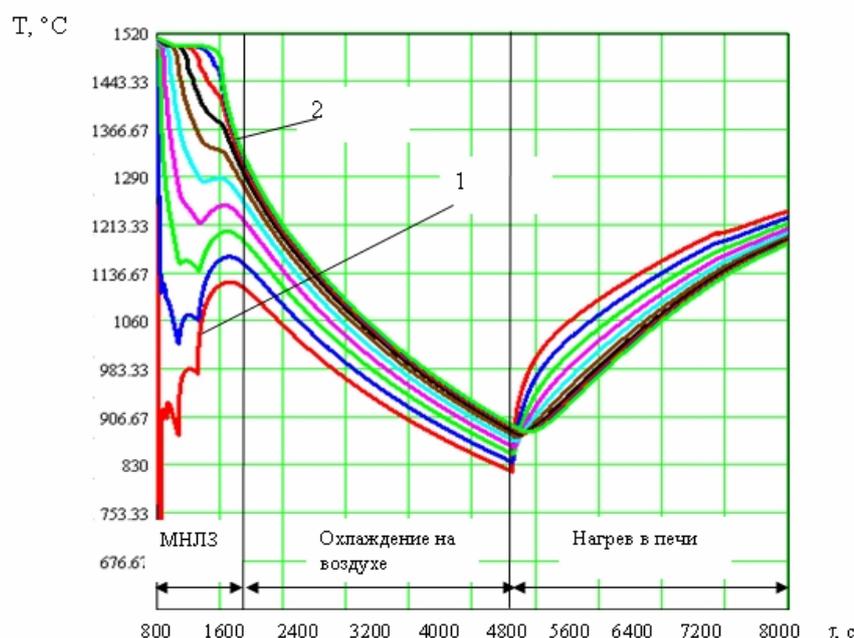


Рисунок 1 Изменение температурного поля расчетного сечения слывовой заготовки при ее перемещении в рамках участков: МНЛЗ – охлаждение на воздушной подушке (для осмотра и горячего ремонта) – нагрев в методической печи с шагающими балками (1 – точка на поверхности заготовки, 2 – точка на оси заготовки)

Выводы

1. Предложена величина для анализа тепловой работы ЛПМ – эффективность использования тепла разливаемого металла. Показано, что наибольшая эффективность достигается при возможности реализации прямой прокатки непрерывнолитых заготовок без промежуточного подогрева. Проиллюстрировано, что препятствиями на пути реализации такой технологии являются возможные дефекты непрерывнолитых заготовок, нуждающиеся в устранении и недостаточный запас тепла заготовок после МНЛЗ.

2. Разработаны приемы использования математической модели тепловой обработки материалов для изучения тепловых процессов в рамках ЛПМ. Для более эффективного и прозрачного анализа тепловых процессов предложен ряд зависимостей, позволяющих определять количества тепла, необходимые для реализации конкретных операций на

основании использования понятия среднemasсовой энтальпии.

3. Проиллюстрировано использование разработанного научного инструментария для описания тепловой работы участка ЛПМ, нацеленной на производство толстолистного проката: МНЛЗ – охлаждение (осмотр, ремонт) – нагрев в методической печи с шагающими балками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур И.П. Развитие теории и совершенствование технологии производства листового проката на литейно-прокатных комплексах: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.16.05 «Обработка металлов давлением»/ И.П. Мазур.– Липецк, 2003. – 40 с.
2. Минаев А.А. Совмещенные металлургические процессы/ Минаев А.А. – Донецк: Унитех, 2008 – 552 с.

пост. 01.02.12