

С. В. Лукин, А. Н. Кибардин

Череповецкий государственный университет,

А. А. Кочкин

Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА КРИВОЛИНЕЙНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

В статье разработан метод исследования теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Получены зависимости от скорости разливки потоков теплоты, отводимых с охлаждающей водой в кристаллизаторе и роликах, с паровоздушной смесью и неиспарившейся водой в бункере зоны вторичного охлаждения, и со слябом, выходящим из МНЛЗ.

Машина непрерывного литья заготовок, тепловой баланс, кристаллизатор, ролики, паровоздушная смесь.

The method of the heat balance studying in curved continuous casting machine (CCM) is developed in the paper. The dependences on the casting speed of heat flow taken with cooling water in the mould and rolls, with the steam-air mixture and non-evaporated water in the secondary cooling zone bunker, with the slab coming out of CCM, are obtained.

Continuous casting machine, heat balance, mould, rolls, steam-air mixture.

Введение.

В настоящее время наибольшее количество стали разливается на слябовых криволинейных машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Так, на пяти слябовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК ОАО «Северсталь» разливается примерно 10 млн т. стали в год; при числе часов в году, равном 8760 ч, средняя производительность 5-ти МНЛЗ составляет примерно 1140 т/ч. Энтальпия жидкой углеродистой стали, подаваемой в кристаллизаторы МНЛЗ, при температуре 1550 °С, отсчитанная от температуры окружающей среды и включающая теплоту затвердевания, составляет $h_{вх} \cong 1336$ кДж/кг [2]. Поток теплоты, поступающий с жидкой сталью в кристаллизаторы МНЛЗ в единицу времени, в среднем равен 1520 ГДж/ч [2]. Частично эта теплота теряется с водой, охлаждающей кристаллизатор и ролики, с паровоздушной смесью, удаляемой из бункера зоны вторичного охлаждения (ЗВО), с неиспарившейся водой, подаваемой из форсунок на поверхность сляба в ЗВО. Часть теплоты выводится из МНЛЗ с затвердевшим слябом, и, в конечном счете, также теряется – на складе, при транспортировке и т. д.

Чтобы разработать эффективные способы использования теплоты, подводимой к МНЛЗ с жидкой сталью, нужно знать отдельные статьи теплового баланса МНЛЗ. В нашей стране исследования теплового баланса МНЛЗ проводились более 30 лет назад [1], когда скорости разливки составляли 0,4÷0,6 м/мин. [1]. По результатам экспериментальных и расчетных данных многих авторов следует, что в пределах МНЛЗ от слитка отводится примерно 55 % теплоты жидкой стали, а остальные 45 % уходят из машины с горячим слитком. На современных МНЛЗ скорости разливки составляют 1,2÷1,4 м/мин. и выше, поэтому тепловой баланс МНЛЗ значительно изменился. Кроме того, на криволинейных слябовых МНЛЗ стало широко применяться водо-воздушное

охлаждение, поэтому существующие методы исследования теплового баланса непригодны, поскольку они не позволяют определять количество теплоты, отводимой с паровоздушной смесью.

Основная часть.

В данной статье разработан экспериментально-расчетный метод исследования теплового баланса криволинейной МНЛЗ с водовоздушными форсунками в зоне вторичного охлаждения при стационарных режимах разливки.

Тепловой поток Q , кВт, подводимый с жидкой сталью с температурой $t_{ж}$, °С, к кристаллизатору МНЛЗ, определяется по выражению:

$$Q = \rho \cdot (v / 60) \cdot F \cdot h_{ж}, \quad (1)$$

где ρ – плотность стали при температуре $t_0 = 0$ °С, кг/м³; $F = A \cdot B$ – площадь сечения охлажденного сляба, м²; A, B – ширина и толщина охлажденного сляба, м; v – скорость вытягивания сляба в МНЛЗ (скорость разливки), м/мин.; $h_{ж} = L + c \cdot t_{ж}$ – энтальпия жидкой стали, кДж/кг, отсчитанная от температуры $t_0 = 0$ °С; L – теплота затвердевания стали, кДж/кг; c – средняя массовая теплоемкость стали, кДж/(кг·К), в интервале температур $t_0 \div t_{ж}$.

Величины $v, t_{ж}, A, B$ регистрируются в АСУ МНЛЗ, поэтому определение величины Q не представляет сложности. Теплота Q распределяется следующим образом:

$$Q = Q_{кр} + Q_{рол} + Q_{ПВС} + Q_{сл} + Q_{пот} + Q_{сляб}, \quad (2)$$

где $Q_{кр}$ – теплота, отводимая водой, охлаждающей изнутри рабочей стенки кристаллизатора МНЛЗ; $Q_{рол}$ – теплота, отводимая водой, охлаждающей изнутри ролики и другое поддерживающее оборудование

МНЛЗ; $Q_{ПВС}$ – теплота, отводимая паровоздушной смесью (ПВС), удаляемой из бункера ЗВО; $Q_{сл}$ – теплота, отводимая неиспарившейся водой, сливающейся с поверхности сляба в ЗВО; $Q_{пот}$ – потери теплоты рассеянием в разливающий цех; $Q_{сляб}$ – физическая теплота сляба на выходе из МНЛЗ. Материальные и тепловые потоки на криволинейной МНЛЗ показаны схематично на рис. 1.

На один ручей МНЛЗ приходится один кристаллизатор, где происходит первичное затвердевание сляба и находится большое количество поддерживающих и тянущих сляб роликов (до 90 пар и более), между которыми в бункере ЗВО расположены водяные или водовоздушные форсунки, подающие распыленную воду на поверхность сляба. Вода, подаваемая из форсунок, частично превращается в пар, который, смешиваясь с воздухом, поступающим в бункер из-за подсосов, образует ПВС. Вода, которая не испарилась, сливается по открытому желобу из бункера.

Из статей теплового баланса в выражении (2) экспериментально проще всего определить величины $Q_{кр}$ и $Q_{рол}$, поскольку вода, охлаждающая кристаллизатор и ролики, циркулирует по замкнутому контурам, отдавая полученную теплоту либо в градирне, либо в промежуточных теплообменниках (при охлаждении химочищенной водой). Величины $Q_{кр}$ и $Q_{рол}$, кВт, определяются так:

$$Q_{кр} = c_v \cdot G_{кр} \cdot \Delta t_{кр}; \quad Q_{рол} = c_v \cdot G_{рол} \cdot \Delta t_{рол}, \quad (3)$$

где c_v – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $G_{кр}$, $G_{рол}$ – суммарные расходы воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики, кг/с; $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{рол}$ – средний нагрев воды в кристаллизаторе и в роликах, К. Величины $G_{кр}$, $G_{рол}$, $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{рол}$ регистрируются в АСУ МНЛЗ.

Остальные величины в выражении (2) не определить по данным, регистрируемым в АСУ МНЛЗ. Для этого дополнительно нужно измерить температуру $t_{пв}$, °С, давление $p_{пв}$, Па, и объемный расход $V_{пв}$, м³/с, паровоздушной смеси, удаляемой из бункера ЗВО по специальному паровоздуховоду, среднюю температуру $t_{возд}$ воздуха в цехе, который подсасывается в бункер ЗВО и составляет основную долю в ПВС, а также температуру сливающейся воды $t_{сл}$ на выходе из бункера ЗВО.

Из суммарного расхода $\Sigma G_{вод}$ воды, кг/с, подаваемой на все форсунки в ЗВО, получают расходы пара $\Sigma G_{п}$, кг/с, и неиспарившейся воды $\Sigma G_{сл}$, кг/с:

$$\Sigma G_{вод} = \Sigma G_{п} + \Sigma G_{сл}. \quad (4)$$

Долю воды, подаваемой из форсунок данной секции и превращающейся в пар, обозначим как $x_{п}$, и назовем коэффициентом выхода пара. Тогда $G_{п} = x_{п} \cdot G_{вод}$, где $G_{вод}$ и $G_{п}$ – расходы воды и пара для данной секции. Суммарный выход пара из всех секций ЗВО (число секций может быть до 10 и более), определяется так:

$$\Sigma G_{п} = \Sigma (x_{п} \cdot G_{вод}) = \bar{x}_{п} \cdot \Sigma G_{вод}, \quad (5)$$

где $\bar{x}_{п}$ – средний коэффициент выхода пара в ЗВО.

При смешении пара с воздухом, поступающим в бункер ЗВО, часть пара превращается в капельки взвешенного конденсата с расходом $G_{к}$. В результате расход ПВС, удаляемой из бункера, складывается из расхода пара $G'_{п} = \Sigma G_{п} - G_{к}$, неизвестного расхода воздуха $G_{возд}$, поступающего в бункер, и расхода конденсата $G_{к}$, частично выпадающего на стенки паровоздуховода.

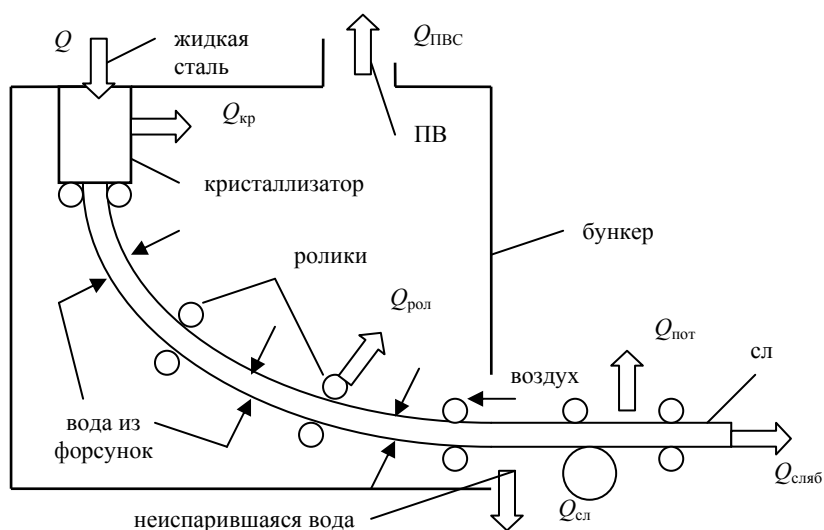


Рис. 1. Схема материальных и тепловых потоков на МНЛЗ

Величина $G_{\text{вод}}$ для каждой секции регистрируется в АСУ МНЛЗ; для определения суммарного расхода пара $\Sigma G_{\text{п}}$ получено выражение:

$$\Sigma G_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{пв}}}{\beta(1+d_{\text{п}})} \cdot V_{\text{пв}}, \quad (6)$$

где $\beta = G_{\text{возд}}/\Sigma G_{\text{п}}$, кг/кг, где $G_{\text{возд}}$ – расход воздуха в ПВС; $\rho_{\text{пв}}$ – плотность ПВС в паровоздуховоде без учета конденсата, кг/м³, и $d_{\text{п}} = G'_{\text{п}}/G_{\text{возд}}$ – паросодержание в ПВС, кг/кг; $V_{\text{пв}}$ – объемный расход ПВС. Величины $\rho_{\text{пв}}$ и $d_{\text{п}}$ однозначно определяются по известным выражениям по температуре $t_{\text{пв}}$ и давлению $p_{\text{пв}}$ ПВС, так как ПВС имеет влажность 100 %. Для расчета величины β получено выражение:

$$\beta = \frac{2676 - 4,19 \cdot t_{\text{пв}}}{t_{\text{пв}} - t_{\text{возд}} + d_{\text{п}} \cdot (2501 - 2,26 \cdot t_{\text{пв}})}. \quad (7)$$

Объемный расход $V_{\text{пв}}$ и давление $p_{\text{пв}}$ определялись с помощью трубок Пито, устанавливаемых в паровоздуховоде, температуры $t_{\text{пв}}$, $t_{\text{возд}}$, $t_{\text{сл}}$ – ртутными термометрами. Погрешность определения величины $\Sigma G_{\text{п}}$ не превышала 3 %.

Тепловой поток, отводимый ПВС, определяется выражением:

$$Q_{\text{ПВС}} = \Sigma G_{\text{п}} \cdot (h'' - h_{\text{вод}}), \quad (8)$$

где $h'' \cong 2676$ – энтальпия сухого насыщенного пара при атмосферном давлении в бункере, кДж/кг; $h_{\text{вод}} = c_{\text{в}} \cdot t_{\text{вод}}$ – энтальпия воды, подаваемой на форсунки; температура воды $t_{\text{вод}}$ регистрируется в АСУ МНЛЗ.

Тепловой поток, отводимый неиспарившейся водой, определяется выражением:

$$Q_{\text{сл}} = \Sigma G_{\text{сл}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{сл}} - t_{\text{вод}}), \quad (9)$$

где расход сливающейся воды определяется из (4): $\Sigma G_{\text{сл}} = \Sigma G_{\text{вод}} - \Sigma G_{\text{п}}$.

Потери теплоты рассеянием $Q_{\text{пот}}$ имеют место в основном вне бункера МНЛЗ. Эта величина зависит от конкретного оформления поддерживающих устройств (диаметра роликов, шага между ними и др.). При расчетах величина $Q_{\text{пот}}$ включалась в физическую теплоту сляба $Q_{\text{сляб}}$ (т. е. принималось $Q_{\text{пот}} = 0$).

На основе выражений (1)–(9) исследовался тепловой баланс ЗВО слябовой криволинейной МНЛЗ №3 (5-й ручей) сталеплавильного производства ЧерМК ОАО «Северсталь» при разливке слябов толщиной 250 мм и шириной 1450 мм при разных стационарных скоростях разливки. МНЛЗ №3 имеет две секции с водяным охлаждением (сразу после кристаллизатора) и семь секций с водовоздушным охлаждением.

Измеренный тепловой поток $Q_{\text{кр}}$, кВт кристаллизатора, высотой 900 мм, можно описать полуэмпирическим выражением:

$$Q_{\text{кр}} = 3315 \cdot \sqrt{v}, \quad (10)$$

где v – скорость разливки, м/мин.; 3315 – эмпирический коэффициент, кВт·(мин./м)^{0,5}.

Тепловой поток, отводимый роликами, слабо зависит от v , и в данном случае изменялся в диапазоне $Q_{\text{рол}} = 7900 \div 8200$ кВт.

Расходы воды на форсунки $G_{\text{вод}}$ выбираются согласно технологическим картам в зависимости от скорости разливки, ширины сляба и марки стали и регистрируется в АСУ. Суммарный расход $\Sigma G_{\text{вод}}$ изменяется приблизительно пропорционально скорости разливки v .

При обработке опытных данных получилось, что для секций с водяным охлаждением коэффициент выхода пара равен $x_{\text{п}} = 0,069 \div 0,076$; для секций с водовоздушным охлаждением – $x_{\text{п}} = 0,361 \div 0,371$. Температура $t_{\text{сл}}$ воды, сливающейся со сляба в секциях с водяным охлаждением, составляет $50 \div 70$ °С; в секциях с водовоздушным охлаждением $t_{\text{сл}}$ равна температуре насыщения (~ 100 °С).

Как следует из выражения (1), тепловой поток Q , поступающий в МНЛЗ с жидкой сталью, прямо пропорционален скорости разливки v . Введем величины $q_i = Q_i/Q \cdot 100$ – относительные статьи теплового баланса, %, где Q_i – тепловые потоки $Q_{\text{кр}}$, $Q_{\text{рол}}$, $Q_{\text{ПВС}}$, $Q_{\text{сл}}$, $Q_{\text{сляб}}$, $Q_{\text{охл}} = Q - Q_{\text{сляб}}$. Следует отметить, что величины Q , $Q_{\text{сляб}}$, $Q_{\text{охл}}$ прямо пропорциональны площади сечения сляба $A \times B$, а величины $Q_{\text{кр}}$, $Q_{\text{рол}}$, $Q_{\text{ПВС}}$, $Q_{\text{сл}}$ – прямо пропорциональны периметру сляба $2(A+B)$. Так как для слябов $A \gg B$, то все статьи теплового баланса примерно пропорциональны ширине сляба A .

На рис. 2 показаны расчетные зависимости величин q_i от скорости разливки v применительно к рассматриваемой МНЛЗ.

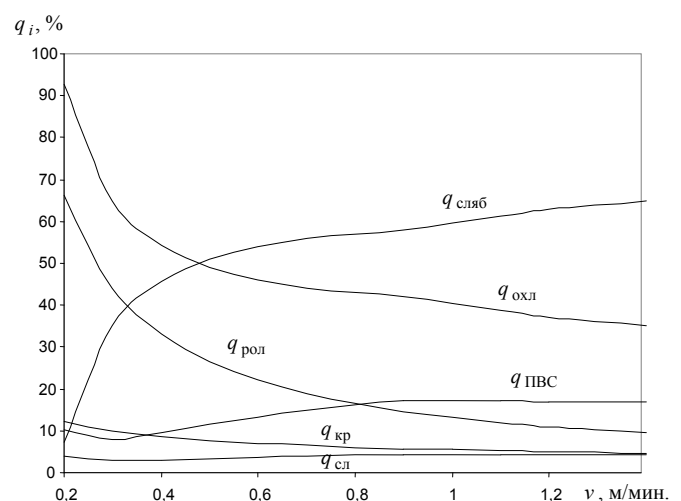


Рис. 2. Зависимости величин q_i от скорости разливки

Из рис. 2 следует, что с увеличением v увеличивается доля теплоты $q_{\text{сляб}}$, отводимой из МНЛЗ со слябом, и уменьшается доля теплоты $q_{\text{охл}}$, отводимой

в системе охлаждения МНЛЗ. При скорости разливки $v \approx 0,5$ м/мин. эти величины примерно равны. На современных МНЛЗ применяются скорости разливки 1,2÷1,4 м/мин. Так, при средней скорости 1,2 м/мин. в системе охлаждения отводится около $q_{\text{охл}} \approx 37$ % теплоты жидкой стали, из них на кристаллизатор приходится $q_{\text{кр}} \approx 5$ %, на ролики – $q_{\text{рол}} \approx 11$ %, на ПВС – $q_{\text{ПВС}} \approx 17$ %, на неиспарившуюся воду – $q_{\text{сл}} \approx 4$ %; с физической теплотой сляба, включающей потери тепла рассеянием, отводится $q_{\text{сляб}} \approx 63$ %.

В настоящее время вся теплота жидкой стали теряется: величина $q_{\text{сляб}}$ – при охлаждении разлитых слябов на складе; величина $q_{\text{охл}}$ – в системе охлаждения МНЛЗ. Физическую теплоту слябов $q_{\text{сляб}}$ наиболее целесообразно использовать в нагревательных печах прокатного производства, где можно получить большую экономию природного газа, а часть величины $q_{\text{охл}}$ можно утилизировать в системе теплоснабжения предприятия [3].

УДК 62-83:621.313.3

Выводы.

Разработан метод исследования теплового баланса криволинейной слябовой ролико-форсуночной МНЛЗ с водовоздушным охлаждением. Получены зависимости отдельных статей теплового баланса от скорости разливки.

Литература

1. Емельянов, В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / В. А. Емельянов. – М., 1988.
2. Кибардин, А. Н. Комплексное использование теплоты жидкой стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок / А. Н. Кибардин, С. В. Лукин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы IX Межд. науч.-техн. конф. – Вологда, 2014. – С. 105–107.
3. Лукин, С. В. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия / С. В. Лукин, Д. В. Поселужный, А. Н. Кибардин // Промышленная энергетика. – 2013. – №5. – С. 7–9.

А. А. Пугачев

Брянский государственный технический университет

МИНИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ СО СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, научный проект № 14-08-31274

Синтезирована система управления асинхронным двигателем, обеспечивающая работу электропривода в режиме минимума мощности потерь. Проведено моделирование в среде MatLab с учетом типовых нелинейностей и потерь в стали статора асинхронного двигателя. Результаты моделирования показывают, что применение предлагаемой системы управления приводит к уменьшению потерь до 25 % по сравнению с классическим вариантом системы скалярного управления.

Асинхронный двигатель, система скалярного управления, минимизация мощности потерь, экстремальное управление.

The control system of an induction motor maintaining electric drive operating mode with minimum power losses is synthesized. The MatLab simulation taking typical non-linearities and stator steel power losses of induction motor into account is carried out. The simulation results show that the suggested system leads to the power losses reduction up to 25 % relatively to classical scalar control.

Induction motor, scalar control system, power losses minimization, optimization mode.

Введение.

Постановка задачи. Анализ использования электроприводов, выполненных по схеме «полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель», выявил, что как в традиционных, так и в современных электроприводах существуют пока еще недоиспользованные резервы повышения энергетической эффективности электромеханического преобразования энергии. Это связано с тем, что по ряду практических соображений в них реализуются в большинстве случаев режимы работы двигателей с постоянством магнитного потока, отсутствует учет теплового состояния обмоток двигателей и др. [5]. Наиболее полно возможности повышения эффектив-

ности электромеханического преобразования энергии можно обеспечить путем оптимизации режимов работы двигателей при регулировании потока как в функции скорости, так и электромагнитного момента (при этом следует сохранять электромеханические статические и динамические характеристики электропривода, необходимые для решения основной технологической задачи).

Исторически первый способ, основанный на одновременном изменении амплитуды U_s и частоты ω_0 напряжения статора и получивший название скалярного управления, до сих пор является широко распространенным и находит свое применение в различных отраслях промышленности и транспорта.