теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора проводится также, как для плоской стенки толщиной δ. Если известна плотность теплового потока q, проходящего через рабочую стенку кристаллизатора, то температура поверхности основания канала, заполненного водой, определяется выражением:

$$t_{\text{осн. кан}} = t_{\text{в}} + q/\alpha_{\text{эф}}. \qquad (14\text{а})$$

Температуру рабочей поверхности стенки, контактирующей со слябом, можно оценить по выражению:

$$t_{\text{раб. пов}} = t_{\text{осн. кан}} + q \cdot \delta/\lambda = t_{\text{в}} + q \cdot \left(\delta/\lambda + 1/\alpha_{\text{эф}}\right). \qquad (14\text{б})$$

Выражения (14) позволяют достаточно точно рассчитывать $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$, если плотность теплового потока q незначительно изменяется по высоте рабочей стенки кристаллизатора. В действительности величина q быстро изменяется в верхней части кристаллизатора, что приводит к перетеканию теплоты вдоль рабочей стенки, и действительные температуры $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ получаются несколько другими, чем дают формулы (14 а, б). В верхней части кристаллизатора действительные температуры $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ будут меньше, чем рассчитанные по формулам (14 а, б), а в нижней части кристаллизатора – несколько больше. Так как надежность работы кристаллизатора во многом зависит от температур $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ на уровне мениска жидкого метала, где плотность теплового потока q является максимальной, то определение величин $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ по формулам (14 а, б) дает некоторый запас при расчетах надежной работы кристаллизатора.

Выводы. Представлена инженерная методика расчета теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок, позволяющая достаточно точно учитывать эффект оребрения рабочей стенки со стороны охлаждающей воды.

Литература

1. *Калягин, Ю.А.* Исследование теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ с круглыми щелевыми каналами / Ю.А. Калягин, Н.И. Шестаков, О.В. Манько, С.В. Лукин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 12. – С. 29 – 31.

2. *Лыков, А.В.* Тепломассообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М., 1978.

3. *Петухов, Б.С.* Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции / Б.С. Петухов, А.Ф. Поляков. – М., 1986.

УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, В.В. Мухин

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

В статье обоснована возможность утилизации низкопотенциальной теплоты, образующейся в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Также предложен способ использования данной теплоты в системе теплоснабжения металлургического завода и близлежащего города.

Утилизация, низкопотенциальная теплота, машина непрерывного литья заготовок.

The article gives proof of the possibility of utilization of low potential heat in the cooling system of the machine of the continuous casting billets. The way of using the heat in the heating supply system of the metallurgical plant and the nearby town is suggested in the paper.

Utilization, low potential heat, machine of the continuous casting billets.

Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является современным высокотемпературным металлургическим агрегатом, в котором температура жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор МНЛЗ, достигает значений 1520÷1550 °С. Доля жидкой стали, разливаемой на МНЛЗ, непрерывно растет во всем мире. В ведущих странах (США, Япония) эта доля приблизилась к 100 %. Наибольшее количество стали разливается на слябовых криволинейных МНЛЗ, получивших распространение благодаря относительно небольшим капитальным затратам и большой производительности.

Основная технологическая задача МНЛЗ – превратить жидкую сталь в твердую заготовку правильной формы (сляб), для чего нужно отвести от металла значительное количество теплоты. Приблизительно 50 % теплоты жидкой стали, подаваемой в МНЛЗ, отводится элементами оборудования МНЛЗ – кристаллизатором и роликами, охлаждаемыми водой, водой, подаваемой непосредственно на поверхность сляба, и паровоздушной смесью, образовавшейся при испарении части воды и удаляемой из бункера МНЛЗ [1], [2].

В настоящее время теплота, отведенная от металла в пределах МНЛЗ, практически никак не используется и теряется в окружающей среде, несмотря на значительное количество. Так, на пяти слябовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК ОАО «Северсталь»

может разливаться до 9 млн. т стали в год. При числе часов в году, равном 8760 ч, средняя производительность 5-ти МНЛЗ составит примерно 10^6 кг/ч. Количество теплоты, поступающей с жидким металлом в МНЛЗ, составляет 1500 ГДж/ч. Половина этой теплоты (750 ГДж/ч) отводится в пределах МНЛЗ. Эта цифра сопоставима с количеством теплоты, отпускаемой из отопительных отборов турбин ТЭЦ-ПВС ЧерМК, где, например, в январе 2012 г. из отопительных отборов турбин отпускалось в среднем 725 ГДж/ч теплоты на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение (эта теплота отпускалась не только для нужд комбината, но также для нужд г. Череповца).

Несмотря на то, что температура поверхности затвердевающего сляба в МНЛЗ превышает 900 °С, при утилизации физической теплоты сляба может быть получена, как правило, лишь низкопотенциальная теплота в виде горячей воды до 100 °С.

В настоящее время из-за низкого температурного уровня теплоты, сбрасываемой в окружающую среду, теплота охлаждения металла, разливаемого на МНЛЗ, сейчас не используется (температура охлаждающей воды, нагретой в кристаллизаторе и роликах МНЛЗ, обычно не превышает 40÷45 °С; температура паровоздушной смеси, образовавшейся в бункере МНЛЗ, составляет 50÷60 °С; температура неиспарившейся воды, сливающейся со сляба, составляет 40÷80 °С).

Цель данной статьи – показать, что утилизация теплоты охлаждения металла, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ, может дать значительный энергетический, экономический и, главное, экологический эффекты (уменьшение тепловых выбросов в атмосферу от МНЛЗ), что никак не снизит технические показатели процесса непрерывной разливки стали.

Исследования свидетельствуют о том, что в кристаллизаторе и роликах отводится примерно 70 % всей теплоты, отводимой от сляба системой охлаждения МНЛЗ. На долю паровоздушной смеси и воды, сливающейся со сляба, приходится около 30 % отводимой теплоты.

В настоящее время наиболее реально осуществить утилизацию теплоты воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики МНЛЗ (эта теплота, как уже отмечалась, составляет примерно 70 % всей теплоты, отводимой от сляба в МНЛЗ). Для этого нужно, в первую очередь, перевести кристаллизаторы и ролики МНЛЗ с охлаждения оборотной технической водой на охлаждение химически очищенной водой, циркулирующей по замкнутому контуру; охлаждение нагретой воды производится в промежуточном поверхностном теплообменнике. На некоторых слябовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК) кристаллизатор и ролики уже переведены на охлаждение химически очищенной водой, которая не дает отложений накипи в охлаждаемых каналах. При этом в промежуточном теплообменнике за счет теплоты нагретой химоочищенной воды нагревается вторичная техническая вода, которая затем охлаждается в градирне.

Если не изменять конструктивных размеров кристаллизатора и роликов, то расходы охлаждающей воды на кристаллизатор и ролики и скорости воды в каналах следует оставить такими же, какие применяются в настоящее время, но при этом вода будет нагреваться в кристаллизаторе, например, не от 30 °С до 40 °С, а от 90 до 100 °С; в роликах вода будет нагреваться не от 30 °С до 50 °С, а от 80 до 100 °С. В промежуточном противоточном теплообменнике химочищенная вода будет охлаждаться, нагревая вторичную сетевую воду, например, от 70 °С до 95 °С. При этом надежность работы оборудования и производительность МНЛЗ практически не изменятся.

Температурный режим рабочей стенки кристаллизатора (наиболее ответственного узла МНЛЗ) при этом изменится несущественно [2]. Расчеты показывают, что при скорости воды в круглых каналах рабочей стенки кристаллизатора диаметром d = 20 мм, равной w = 6 м/с, коэффициент теплоотдачи от поверхности канала при температуре воды $t_в$ = 30 °С (на выходе из кристаллизатора) составляет α = = 17600 Вт/(м^2 К), а при температуре воды $t_в$ = 90 °С α =26500 Вт/(м^2 К), т.е. в 1,5 раза больше, чем при $t_в$ = 30 °С, что объясняется значительным снижением вязкости воды при увеличении температуры. Максимальная плотность теплового потока в рабочей стенке слябового кристаллизатора соответствует уровню мениска жидкого металла в кристаллизаторе и составляет приблизительно 2,5 МВт/м^2. При шаге между каналами 40 мм максимальная эффективная плотность теплового потока на поверхности канала достигает значения q_{max} = 3,0 МВт/м^2. Расчет показывает, что при температуре воды $t_в$ = 30 °С температура поверхности канала равна $t_{кан}$ = 200 °С, а при $t_в$ = = 90 °С, будет равна $t_{кан}$ = 203 °С. Максимальная температура рабочей поверхности стенки также будет практически одинакова при $t_в$ = 30 °С и $t_в$ = 90 °С и будет определяться толщиной рабочей стенки (расстоянием от рабочей поверхности до поверхности каналов), которая может изменяться в пределах 0,02÷0,03 м.

По высоте кристаллизатора плотность теплового потока q в рабочей стенке достаточно быстро уменьшается (на выходе из кристаллизатора q = = 0,5÷0,6 МВт/м^2), поэтому необходимый температурный режим остальной части рабочей стенки кристаллизатора также будет соблюдаться, несмотря на значительное повышение температуры охлаждающей воды.

При увеличении средней температуры охлаждающей воды с 35 до 95 °С, как показывают расчеты [1], тепловой поток от сляба к кристаллизатору уменьшится всего на 3 %, что практически не отразится на прочности оболочки сляба на выходе из кристаллизатора. Стойкость кристаллизатора при этом практически не изменится, поскольку температурный режим рабочей стенки останется на том же уровне.

При увеличении средней температуры охлаждающей воды в каналах роликов с 40 до 90 °С (т.е. на 50 °С) при том же расходе и скорости воды в каналах

средняя температура ролика вырастет, как показывают расчеты [3], примерно на 35÷40 °С. Максимальная температура поверхности ролика в месте контакта с поверхностью сляба слабо зависит от температуры охлаждающей воды. Поэтому незначительное повышение средней температуры ролика (на 40 °С) возможно несколько снизит его механическую прочность, однако уменьшит при этом термические напряжения в теле ролика, возникающие при его вращении. Как будут служить ролики при повышенной температуре охлаждающей воды, однозначно покажет только эксперимент. Можно лишь утверждать, что если стойкость роликов и уменьшится, то незначительно. Тепловой поток, отводимый роликами от сляба, при этом практически не изменится, так как ролик получает теплоту от сляба во многом за счет излучения, и при температуре поверхности сляба порядка 950 °С небольшое увеличение температуры поверхности ролика (которая обычно меньше 400 °С) практически не повлияет на теплообмен ролика со слябом.

Таким образом, не изменяя конструкции кристаллизатора и роликов МНЛЗ и сохраняя прежними расходы охлаждающей воды, можно без ущерба основному технологическому процессу нагревать химически очищенную охлаждающую воду до температуры 100 °С; за счет теплоты охлаждающей воды можно нагревать вторичную сетевую воду до 95 °С в компактных пластинчатых теплообменниках.

За счет совершенствования геометрических размеров, формы и расположения охлаждаемых каналов в элементах оборудования МНЛЗ при неизменном температурном уровне кристаллизатора и роликов можно значительно снизить расходы охлаждающей воды и, соответственно, увеличить ее нагрев в охлаждаемых элементах.

Другой проблемой является сбор и использование горячей воды, полученной на МНЛЗ. Примем, что при работе пяти криволинейных слябовых МНЛЗ ЧерМК при охлаждении кристаллизатора и роликов можно в среднем утилизировать $Q_{ср}$ = 0,7 · 750 = = 525 ГДж/ч теплоты охлаждения металла (0,7 – доля теплоты охлаждения металла, отводимая в кристаллизаторах и роликах). Максимальное количество утилизированной теплоты составит $Q_{max} = Q_{ср}/\varphi$ = = 656 ГДж/ч, где $\varphi \approx 0{,}8$ – коэффициент загрузки МНЛЗ в течение года. В общем случае одна, две или даже три МНЛЗ могут временно не работать, поэтому количество утилизированной теплоты Q (ГДж/ч) будет меньше величины $Q_{мах}$. Чтобы использовать теплоту, полученную от МНЛЗ, для нужд теплоснабжения, можно использовать схему, показанную на рис. 1. Сетевая вода, нагретая в промежуточных теплообменниках МНЛЗ до средней температуры $t_м \le 95$ °С, поступает в пиковый водогрейный котел (ПВК), в качестве которого может выступать районная котельная, где при необходимости нагревается до температуры прямой сетевой воды $t_{п.с}$.

Примем, что тепловая сеть работает по графику 50÷130 °С, где $t_{о.с}$ = 50 °С, $t_{п.с}$ = 130 °С – расчетные температуры обратной и прямой сетевой воды. Расход сетевой воды $G_{с.в}$, подогреваемой на всех МНЛЗ, определяется из условия, что при расчетном режиме температура сетевой воды после всех МНЛЗ равна $t_м$ = 95 °С. Отсюда определяем:

$$G_{с.в} = \frac{Q_{мах}}{c_в \cdot (t_м - t_{о.с})} = \frac{656}{4{,}19 \cdot (95-50)} = 3{,}48 \text{ тыс. т/ч.}$$

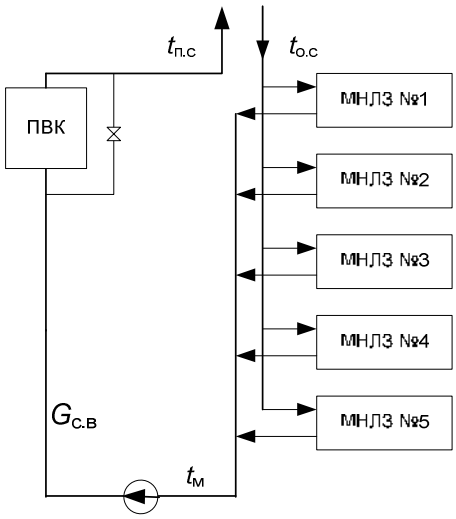


Рис. 1. Схема утилизации теплоты МНЛЗ

Расход сетевой воды, проходящей параллельно через все МНЛЗ, должен быть постоянным для всех режимов работы МНЛЗ и тепловой сети. Полный расход $G_{с.в}$ распределяется между отдельными МНЛЗ пропорционально расчетным тепловым мощностям этих МНЛЗ.

При пониженной температуре обратной сетевой воды ($t_{о.с} < 50$ °С) при расчетном режиме работы 5-ти МНЛЗ ($Q = Q_{max}$) подогрев сетевой воды в МНЛЗ будет неизменным и равным: $\delta t_{max} = t_м - t_{о.с}$ = 45 °С. Если какие-то МНЛЗ работают на нерасчетном режиме или вообще не работают ($Q < Q_{max}$), то подогрев сетевой воды будет равен: $\delta t = (Q/Q_{max}) \cdot \delta t_{max}$. Температура сетевой воды, нагретой в МНЛЗ и поступающей на ТЭЦ, в общем случае определяется выражением:

$$t_м = t_{о.с} + \delta t_{max} \cdot (Q/Q_{max}).$$

Например, при $t_{о.с}$ = 50 °С и Q/Q_{max} = 3/5 (работают 3 МНЛЗ из 5), подогрев сетевой воды на МНЛЗ составит δt = 27 °С, а температура подогретой воды – $t_м$ = 77 °С.

При утилизации теплоты в количестве $Q = Q_{ср}$ = = 525 ГДж/ч (работают в среднем 4 МНЛЗ) экономия условного топлива, сжигаемого в ПВК, составит:

$$\Delta B = \frac{Q}{\eta_{кот} \cdot 29{,}3} = 525 \cong 17{,}9 \text{ т.у.т/ч},$$

где $\eta_{кот} \approx 0{,}9$ – КПД пикового котла; 29,3 – теплота сгорания условного топлива, ГДж/т.

В течение отопительного периода, длящегося 8 месяцев в году, экономия топлива на ПВК составит 103,1 тыс. т.у.т., или 86 млн м^3 природного газа. При настоящей цене на природный газ на внутреннем рынке РФ в 3 руб./м^3, экономия денежных затрат на топливо, сжигаемого в ПВК, в течение отопительного периода составит примерно 260 млн руб. При цене на природный газ, которую платит Украина – 0,4 долл/м^3 = 12 руб/м^3, экономия денежных затрат в течение отопительного периода составит приблизительно 1 млрд руб. Кроме того, теплота, полученная на машинах непрерывного литья заготовок, в летнее время может использоваться для горячего водоснабжения, обеспечивая дополнительную экономию топлива и денежных затрат.

Экономические затраты на реализацию данного мероприятия получаются не очень значительными, так как промежуточные теплообменники для охлаждения химочищенной воды, нагретой в кристаллизаторе и роликах, на некоторых МНЛЗ уже имеются, а другие МНЛЗ планируют перевести на охлаждение химочищенной водой (для увеличения срока службы оборудования МНЛЗ). Требуется проложить лишь дополнительный участок тепловой сети, связывающий сталеразливочный цех с водогрейной котельной.

В данной работе показано, что, не изменяя конструкции охлаждаемых элементов криволинейных слябовых МНЛЗ, можно утилизировать примерно 70 % теплоты охлаждения разливаемого металла, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ, нагревая при этом сетевую воду до 95 °С. Окончательный подогрев сетевой воды следует производить в пиковой водогрейной котельной. Результатом данного мероприятия являются значительные экономический и экологический эффекты.

Литература

1. *Лукин, С.В.* Тепловые процессы при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин. – Череповец, 2008.

2. *Лукин, С.В.* Уменьшение теплового загрязнения при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, В.М. Аленичев, А.Н. Кибардин // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 5. – С. 48 – 53.

3. *Шестаков, В.И.* Теплообмен в роликах машины непрерывного литья заготовок / Н.И. Шестаков, В.Я. Тишков // Черметинформация. – 1992.

УДК 621.746.27

А.И. Павздерин, Д.И. Бородин, Н.Е. Хисамутдинов, З.К. Кабаков

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАГОТОВОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА МАШИНАХ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

В статье предложена методика расчета технологических параметров зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок со сложной формой поперечного сечения, которая позволяет прогнозировать длину зоны вторичного охлаждения, количество секций, расходы воды и участки охлаждаемой поверхности заготовки.

Заготовки сложной конфигурации, ЗВО.

The method of calculating the technological parameters of secondary cooling of the machine of the continuous casting billets with complex shape of cross section is presented in the paper. The technique allows to predict the length of the secondary cooling, the number of sections, water discharge and the plots of a cooled surface of the billet.

Billets of complicated configuration, secondary cooling.

Для получения круглой трубной заготовки ВНИИМЕТМАШем был создан опытно-промышленный литейно-прокатный агрегат, состоящий из МНЛЗ радиального типа и непрерывного четырехклетевого стана с трехвалковыми клетями. Особенностью литейно-прокатного агрегата является отливка слитка трефовидного сечения (рис. 1). Как отмечается в [3], такой профиль затвердевает в 1,3 раза быстрее, чем круглый, а вогнутость граней слитка снижают вызванным ферростатическим давлением напряжения в металле, что, в свою очередь, снижает склонность заготовки к трещинообразованию. Кроме того, трефовидная форма поперечного сечения заготовки удачно сочетается с трехвалковыми прокатными клетями. Это позволяет повысить скорость вытяжки металла и устранить кантовку раскатов [2].

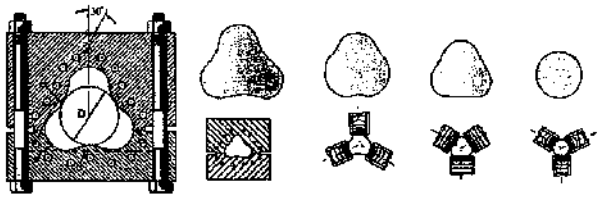


Рис. 1. Кристаллизатор и схема обжатий в прокатных станах трубной заготовки трефовидного сечения