

## Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия

Лукин С. В., канд. техн. наук, Поселожный Д. Н., Кибардин А. Н., инженеры  
ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

Обоснована возможность утилизации теплоты, образующейся при охлаждении и затвердевании разливаемого металла и отводимой системой охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Предложен способ ее использования в системе теплоснабжения металлургического завода и в промышленной части города.

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок, теплота охлаждения, утилизация, теплоснабжение.

В настоящее время наибольшее количество стали разливается на слябовых криволинейных машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Они представляют собой высокотемпературные металлургические агрегаты, в которых температура жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор, составляет примерно 1550 °С. Основная технологическая задача МНЛЗ — превратить жидкую сталь в твердую заготовку правильной формы (сляб), для чего нужно отвести от металла значительное количество теплоты. Энтальпия жидкой углеродистой стали  $h_{\text{вх}}$  (при температуре окружающей среды 0 °С), включающая в себя теплоту затвердевания (272 кДж/кг), примерно равна  $h_{\text{вх}} \approx 1337$  кДж/кг. На выходе из МНЛЗ затвердевший сляб имеет среднюю температуру около 850 °С, при которой энтальпия  $h_{\text{вых}} \approx 597$  кДж/кг. Количество теплоты, отдаваемой 1 кг жидкой стали в пределах МНЛЗ, составляет  $q = h_{\text{вх}} - h_{\text{вых}} \approx 740$  кДж/кг.

В настоящее время теплота, отведенная от металла в пределах МНЛЗ, практически не используется и теряется в окружающей среде, несмотря на значительное ее количество. Так, на пяти слябовых криволинейных МНЛЗ Череповецкого металлургического комбината (ЧерМК) ОАО «Северсталь» разливается примерно 10 млн т стали в год. При числе часов в году 8760 средняя производительность пяти МНЛЗ  $G \approx 1140$  т/ч. В пределах МНЛЗ отводится в среднем количество теплоты  $Q = Gq = 843$  ГДж/ч, что превышает количество 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 металлургического комбината и индустриальной части Череповца.

Цель данной статьи — показать, что утилизация теплоты охлаждения металла, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ, может дать значительный энергетический, экономический и экологический эффект, не снизив при этом технические показатели процесса непрерывной разливки стали.

Примерно 70 % теплоты охлаждения сляба в МНЛЗ отводится кристаллизатором и роликами, имеющими охлаждаемые водой внутренние каналы, причем в роликах отводится в несколько раз больше теплоты, чем в кристаллизаторе [1, 2]. В кристаллизаторе происходит первоначальное затвердевание и формирование заготовки. Ролики (верхние и нижние) служат для поддержания и транспортировки сляба, и число их пар составляет, например, на МНЛЗ № 3 ЧерМК 91 шт. Температура охлаждающей воды, нагретой в кристаллизаторе и роликах МНЛЗ, обычно не превышает 40–50 °С, а нагрев воды составляет 10–20 °С. Отводимую охлаждающей водой в кристаллизаторе и роликах теплоту целесообразно и возможно утилизировать, но для этого необходимо повысить ее температурный уровень.

Остальное количество теплоты (приблизительно 30 %) отводится от сляба паровоздушной смесью, образовавшейся при подаче водовоздушной смеси из форсунок непосредственно на поверхность сляба, а также неиспарившейся водой, сливающейся с поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ [2]. Утилизация этой теплоты также возможна, но ее сложнее осуществить.

В настоящее время теплота охлаждающей воды теряется в градирне. Несмотря на то, что температура поверхности затвердевающего сляба в МНЛЗ превышает 800 °С, при утилизации его физической теплоты может быть получена, как правило, лишь низкопотенциальная теплота в виде горячей воды до

100 °С (возможно, и выше), поскольку более высокий температурный уровень охлаждающих теплоносителей может снизить производительность основного технологического процесса, а также уменьшить надежность работы элементов оборудования МНЛЗ.

Наиболее реально осуществлять утилизацию теплоты воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики МНЛЗ. Для этого необходимо в первую очередь перевести их с охлаждения оборотной технической водой на охлаждение химически очищенной водой, циркулирующей по замкнутому контуру (охлаждение нагретой воды осуществляется в промежуточном поверхностном теплообменнике). На некоторых слябовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК кристаллизатор и ролики уже переведены на охлаждение химически очищенной водой, которая не оставляет отложений накипи в охлаждаемых каналах. При этом в промежуточном теплообменнике за счет теплоты нагретой химически очищенной воды нагревается вторичная техническая вода, которая затем охлаждается в градирне.

Нагрев охлаждающей воды в элементах МНЛЗ до 100 °С можно осуществить, если при той же схеме движения воды в несколько раз уменьшить расход охлаждающей воды на эти элементы при той же температуре воды на входе (около 30 °С). Однако при этом из-за снижения скорости воды резко уменьшится коэффициент теплоотдачи к охлаждающей воде и значительно возрастет температура рабочей поверхности элементов, что неблагоприятно отразится на их работе. Это связано с высокой плотностью теплового потока, отводимого в элементах МНЛЗ. Например, в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ максимальная плотность теплового потока, отводимого через рабочую стенку, достигает 2,5 МВт/м<sup>2</sup>, а средняя плотность теплового потока в кристаллизаторе составляет примерно 1 МВт/м<sup>2</sup> [1]. На поверхности роликов плотность теплового потока гораздо меньше (порядка 100 кВт/м<sup>2</sup>), при этом поверхность роликов в отличие от поверхности рабочей стенки кристаллизатора подвержена циклической тепловой нагрузке.

Чтобы не ухудшить работу элементов МНЛЗ при резком (в несколько раз) сокращении расхода охлаждающей воды, надо значительно изменить конструктивные размеры и число охлаждаемых каналов элементов МНЛЗ. При этом благодаря эффекту оребрения можно обеспечить необходимый коэффициент теплоотдачи к охлаждающей воде даже при пониженной скорости воды в каналах.

Если не изменять конструктивные размеры кристаллизатора и роликов, то расходы охлаждающей воды на них и скорости воды в каналах следует оставить такими же, как в настоящее время. При той же схеме охлаждения вода в кристаллизаторе будет нагреваться, например, не с 30 до 40 °С, а с 90 до 100 °С, в роликах — не с 30 до 50 °С, а с 80 до 100 °С.

Можно использовать последовательное движение воды, когда она проходит сначала через кристаллизатор, где нагревается, как обычно, с 30 до 40 °С, а нагрев воды с 40 до 100 °С будет происходить при последовательном ее прохождении через группы роликов. Такая схема предпочтительнее, поскольку температурный режим рабочей стенки кристаллизатора (наиболее ответственного узла МНЛЗ) в этом случае не изменяется, а тепловая работа роликов изменится незначительно. При достаточно протяженной МНЛЗ вода нагреется до температуры выше 100 °С.

Таким образом, не изменяя конструкции кристаллизатора и роликов МНЛЗ и сохраняя прежними расходы охлаждающей воды, можно без ущерба для основного технологического процесса нагревать химически очищенную охлаждающую воду до 100–110 °С. За счет теплоты охлаждающей воды возможно нагревать вторичную сетевую воду до 90–100 °С в поверхностных теплообменниках (пластинчатых или кожухотрубных).

Другая проблема — сбор и использование горячей воды, полученной на МНЛЗ. Примем, что при работе пяти криволинейных слябовых МНЛЗ ЧерМК при охлаждении кристаллизаторов и роликов можно в среднем утилизировать  $Q_{\text{ср}} = 0,7 \cdot 843 = 590$  ГДж/ч теплоты охлаждения металла (0,7 — доля теплоты охлаждения металла, отводимая в кристаллизаторах и роликах). Максимальное количество утилизированной теплоты составит  $Q_{\text{max}} = Q_{\text{ср}}/\varphi = 737$  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  $Q$  будет меньше  $Q_{\text{max}}$ .

Чтобы использовать полученную от МНЛЗ теплоту для нужд теплоснабжения, можно применить схему, приведенную на рисунке. Сетевая вода, нагретая в промежуточных теплообменниках МНЛЗ до средней температуры  $t_{\text{м}} \leq 100$  °С, поступает в водогрейный котел ВК, где при необходимости нагревается до температуры прямой сетевой воды  $t_{\text{п.с}}$ . Примем, что тепловая сеть работает по графику 50/130 °С, где  $t_{\text{о.с}} = 50$  °С и  $t_{\text{п.с}} = 130$  °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  $t_M = 100\text{ }^\circ\text{C}$ . Расход сетевой воды, проходящей параллельно через все МНЛЗ, должен быть постоянным во всех режимах их работы и тепловой сети. Полный расход  $G_{с.в.}$  распределяется между отдельными МНЛЗ пропорционально расчетным тепловым мощностям.

При пониженной температуре обратной сетевой воды ( $t_{о.с} < 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) в расчетном режиме работы пяти МНЛЗ ( $Q = Q_{max}$ ) подогрев сетевой воды в МНЛЗ будет неизменным и равным:  $\delta t_{max} = t_M - t_{о.с} = 50\text{ }^\circ\text{C}$ . Если какие-то МНЛЗ работают в нерасчетном режиме или вообще не работают ( $Q < Q_{max}$ ), то подогрев сетевой воды  $\delta t = (Q/Q_{max})\delta t_{max}$ . Температура сетевой воды, нагретой в МНЛЗ и поступающей на ТЭЦ, в общем случае определяется из выражения

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

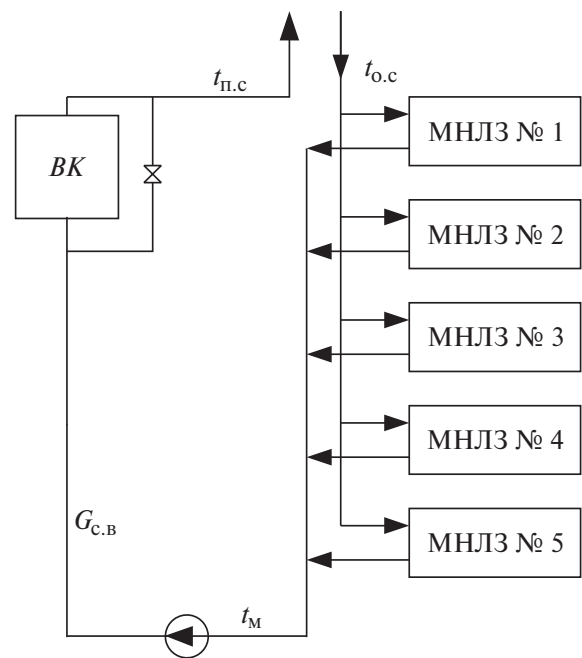
Например, при  $t_{о.с} = 50\text{ }^\circ\text{C}$  и  $Q/Q_{max} = 3/5$  (работают три из пяти МНЛЗ) подогрев сетевой воды на МНЛЗ  $\delta t = 30\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура подогретой воды  $t_M = 80\text{ }^\circ\text{C}$ .

При утилизации теплоты в количестве  $Q_{ср} = 590\text{ ГДж/ч}$  (работают в среднем 4 МНЛЗ) экономия сжигаемого в котлах условного топлива составит 22,3 т/ч (при КПД котла 0,9). В течение отопительного периода, длящегося 8 мес. в году, экономия топлива в котлах достигнет 103,1 тыс. т, или 86 млн м<sup>3</sup> природного газа. При цене на природный газ на внутреннем рынке РФ примерно 3 руб/м<sup>3</sup> экономия денежных затрат на сжигаемое в котлах топливо в течение отопительного периода составит примерно 260 млн руб. Кроме того, полученная на МНЛЗ в летнее время теплота может использоваться для горячего водоснабжения, что обеспечит дополнительную экономию топлива и денежных затрат.

Экономические затраты на реализацию данного мероприятия включают в себя проведение дополнительного участка тепловой сети, связывающего сталеразливочный цех с заводской или городской котельной. Промежуточные теплообменники для охлаждения химочищенной воды, нагретой в кристаллизаторах и роликах, на некоторых МНЛЗ уже имеются, а другие МНЛЗ планируется перевести на охлаждение химочищенной водой.

### Выводы

1. В системах охлаждения МНЛЗ теряется значительное количество теплоты, выделяе-



мой при охлаждении и затвердевании разливаемой стали. В настоящее время в кристаллизаторах и роликах МНЛЗ с охлаждающей водой отводится около 70 % всей теплоты от сляба. Утилизация данной теплоты представляет наибольший интерес.

2. Для повышения температурного уровня охлаждающей воды кристаллизаторы и ролики необходимо перевести на охлаждение химочищенной водой, которую можно без ущерба для основного технологического процесса нагревать до  $100 - 110\text{ }^\circ\text{C}$ . За счет теплоты нагретой охлаждающей воды в промежуточных теплообменниках возможно подогревать сетевую воду до температуры  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Окончательный подогрев сетевой воды следует осуществлять либо на заводской ТЭЦ, либо в городских котельных. При реализации этого мероприятия на ЧерМК экономия условного топлива в котельных в течение года составит примерно 100 тыс. т.

### Список литературы

1. **Исследование** теплообмена слитка с кристаллизатором сортовой машины непрерывного литья заготовок / С. В. Лукин, В. В. Мухин, Е. Б. Осипов и др. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2008, № 5.
2. **Контроль** процесса теплоотдачи от сляба в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / С. В. Лукин, Н. И. Шестаков, А. В. Зверев, С. А. Зимин. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2007, № 5.

s.v.luk@yandex.ru