

Энергосбережение в нагревательных печах за счет оптимизации режимов разлива, охлаждения и нагрева стальных слитков

Лукин С. В., канд. техн. наук, Шестаков Н. И., доктор техн. наук,
Антонова Ю. В., аспирант

ФГБОУ ВПО “Череповецкий государственный университет”

На примере стальных слитков, разливаемых в изложницы, показано, что за счет оптимизации длительности нахождения слитка между разливочным агрегатом и нагревательной печью и использования физической теплоты слитков можно значительно (в несколько раз) повысить производительность нагревательных печей и снизить удельный расход топлива.

Ключевые слова: энергосбережение, непрерывная разливка, изложница, стальной слиток, нагревательная печь, оптимизация нагрева.

В настоящее время опубликовано немало работ, посвященных оптимизации работы нагревательных печей. Из последних источников можно указать монографию [1], в которой проанализированы известные материалы по данной тематике и рассмотрены способы, позволяющие минимизировать расход топлива в нагревательных печах за счет совершенствования их конструкций и режимов нагрева металла.

В большинстве публикаций по оптимизации работы нагревательных печей речь идет о нагреве холодной заготовки, поступающей в печь с температурой, практически равной температуре окружающей среды. Стальной слиток необходимо нагреть перед прокаткой или ковкой до 1200 – 1250 °С, поэтому нагрев массивных слитков в печи длится несколько часов. Однако, если осуществить нагрев горячей заготовки, поступающей непосредственно с разливочного агрегата, можно значительно ускорить процесс нагрева и уменьшить расход топлива в печи.

Стальные слитки в настоящее время получают, как правило, путем разлива жидкой стали либо в изложницы, либо на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), и теплота жидкой стали теряется частично или полностью при охлаждении слитков в разливочном агрегате, а далее — в окружающей среде. Так, на выходе из криволинейной МНЛЗ стальные слябы имеют среднемассовую температуру около 900 °С. После этого слябы обычно охлаждают, чтобы можно было визуально проконтролировать качество их поверхности. Если имеются трещины на поверхности слябов, их вырезают, иначе они проявятся далее при прокатке металла.

На современных МНЛЗ выход годного металла превышает 98 %, а на самых лучших МНЛЗ достигает 99 %, и 1 – 2 % брака при-

ходятся, в частности, на удаляемый с трещинами металл. Иногда, например на Череповецком металлургическом комбинате (ЧерМК) ОАО “Северсталь”, применяют машину огневой зачистки, которая срезает несколько миллиметров поверхностного слоя слябов. При этом выход годного металла уменьшается, но зачистку поверхности сляба можно осуществлять и в горячем состоянии.

В любом случае в нагревательные печи прокатного производства ЧерМК стальные слябы поступают в охлажденном состоянии, что связано также с удаленностью сталеразливочного цеха от прокатного. В результате слябы дополнительно охлаждаются при транспортировке. То же самое относится и к другим крупным металлургическим комбинатам нашей страны (Ново-Липецкому, Магнитогорскому), где имеются крупные МНЛЗ. Однако за рубежом ситуация иная. Например, еще в 1994 г. на комбинате “Запорожсталь” (Украина) впервые в практике эксплуатации широкополосных прокатных станов была внедрена в промышленном масштабе “транзитная” прокатка слябов, получаемых на вертикальных МНЛЗ. Сегодня по такой технологии прокатывается 95 % слябов, а удельный расход условного топлива в нагревательных печах снижен с 82,5 до 13,5 кг/т проката.

На российских металлургических комбинатах проблема совмещения непрерывной разлива стали с ее прокаткой до сих пор не решена. Чтобы ее решить, нужно исключить появление трещин на поверхности слябов при непрерывной разливке и совместить разливочный и прокатный цехи. На появление трещин на поверхности слябов во многом влияет режим их охлаждения в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения МНЛЗ. В [2, 3] описан способ охлаждения

слябов в криволинейных МНЛЗ, который позволяет выдерживать необходимый температурный уровень на их поверхности при любых режимах разливки. При этом обеспечиваются необходимые пластичность и прочность оболочки сляба, в результате чего значительно снижается вероятность возникновения поверхностных трещин.

При совмещении процесса непрерывной разливки с прокаткой стальные слябы будут поступать в нагревательные печи со средней температурой 900 – 1000 °С, и их нагрев до 1200 – 1250 °С потребует значительно меньше времени и расхода топлива, чем нагрев от температуры окружающей среды. Вследствие этого удельный расход топлива в печах уменьшается в 5 – 6 раз. Применительно к ЧерМК, где на МНЛЗ разливается около 10 млн т стали в год, экономия топлива (природного газа) в нагревательных печах прокатного производства составит около 0,7 млн т условного топлива.

Рассмотрим результаты исследований по затвердеванию, охлаждению и нагреву крупного стального слитка. В изложнице Р-4,5 из жидкой стали с начальной температурой 1560 – 1580 °С получается цилиндрический стальной слиток массой 4,5 т, длиной 2000 мм, диаметром 582 мм. По действующей инструкции длительность выдержки слитка в изложнице Р-4,5 составляет 3,0 – 3,5 ч. После этого слиток извлекают из изложницы на воздух и помещают в термостат (теплоизолированный короб), который транспортируют в ковочный цех. Продолжительность транспортировки в термостате и нахождения слитка на воздухе не превышает 40 мин. В ковочном цехе слиток извлекают из термостата и загружают в нагревательную печь камерного типа с температурой в рабочем пространстве 1200 °С, где происходит выравнивание температуры по сечению и длине слитка. Идеальный нагрев будет в том случае, если температура во всех точках слитка сравнивается с температурой в печи, что практически нереально. Качественным нагревом можно считать случай, когда максимальная разница температур на оси слитка и в печи Δt_{max} не превышает, например, 30 °С. При существующей технологии для качественного нагрева указанного слитка перед ковкой требуется почти 3 ч выдержки в печи.

Было выполнено численное моделирование процессов затвердевания слитка в изложнице Р-4,5, охлаждения на воздухе и в термостате и нагрева в печи при разных

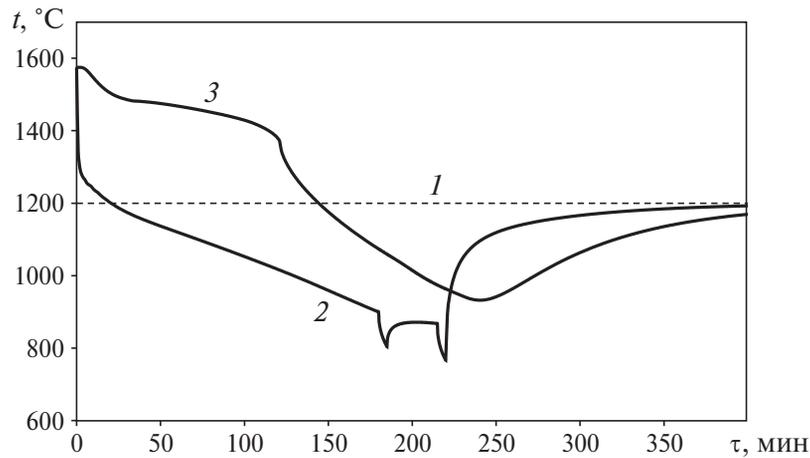
длительностях его пребывания в изложнице. Для этого рассчитывали температурное поле как по радиусу слитка, так и по его длине на всех этапах с момента разливки жидкой стали до момента выгрузки слитка из печи. Для расчета процессов его затвердевания и охлаждения использовали квазиравновесную модель затвердевания, описанную в [4]. Теплообмен на поверхности слитка в изложнице, на воздухе и в нагревательной печи рассмотрен в [5, 6]. Дополнительно была разработана математическая модель, описывающая теплообмен на поверхности слитка в термостате.

На примере стали 08Х18Н10Т рассмотрим результаты расчета для варианта, близкого к действительному, когда длительность нахождения слитка в изложнице составляет 180 мин, на воздухе после изложницы — 5, в термостате — 30, на воздухе после термостата — 5, в печи — до 180 мин.

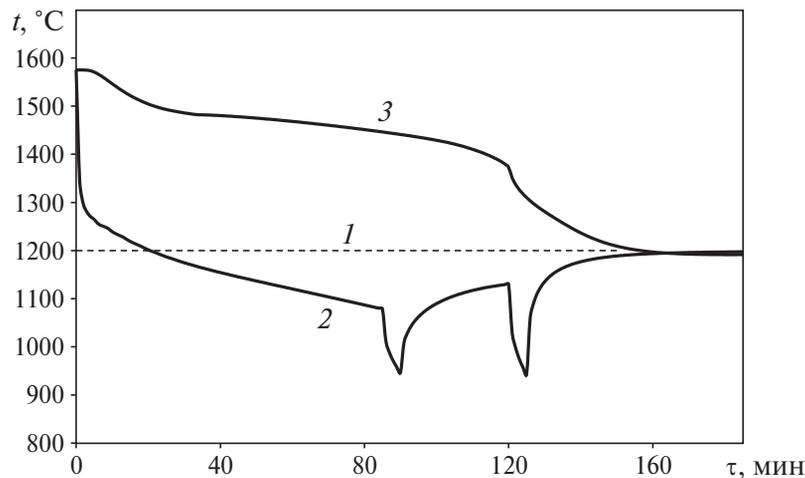
На рисунке, *a* показано изменение температуры t на поверхности (кривая 2) и на оси (кривая 3) слитка в его среднем сечении от времени τ с момента заливки жидкой стали в изложницу до момента извлечения из печи в исходном варианте. Температура в рабочем пространстве печи остается постоянной — 1200 °С (линия 1).

Как видно из рисунка, сразу после заливки жидкой стали в изложницу температура на поверхности слитка резко падает с 1575 до 1280 °С вследствие контакта жидкого металла с относительно холодным чугунным корпусом изложницы. После этого температура на поверхности снижается довольно медленно, поскольку в результате усадки слитка быстро образуется газовый зазор между ним и стенкой изложницы, и теплопередача от заготовки к изложнице резко ухудшается. Теплообмен на поверхности слитка в изложнице протекает в основном за счет излучения к внутренней поверхности изложницы (с учетом нестационарной теплопроводности в ее стенке) и теплообмена ее наружной поверхности с окружающим воздухом путем излучения и конвекции.

Температура на оси слитка сначала снижается медленно из-за наличия жидкой фазы внутри него вплоть до полного затвердевания заготовки, которое наступает при $\tau = 118$ мин. Затем температура на оси слитка начинает быстро уменьшаться. В момент извлечения слитка из изложницы ($\tau = 180$ мин) она составляет 1080 °С, а температура на поверхности — 900 °С. За 5 мин пребывания на воздухе температура на поверхности слитка



а)



б)

резко снижается до 795°C из-за более интенсивной теплоотдачи от раздетого слитка к окружающему воздуху, а температура на оси уменьшается до 1050°C . После помещения слитка в термостат температура на поверхности немного возрастает, а температура на оси слитка продолжает снижаться. В термостате происходит выравнивание температуры по сечению слитка при некотором уменьшении общего теплосодержания в нем из-за тепловых потерь через корпус термостата.

В момент загрузки слитка в печь ($\tau = 220$ мин) температура на оси составляет 960°C , на поверхности — 750°C . После загрузки в печь температура на оси еще в течение 20 мин снижается, затем начинает плавно возрастать. Температура на поверхности слитка быстро увеличивается, стремясь к температуре печи (1200°C). Через 120 мин после загрузки в печь максимальная разность температур Δt_{\max} на оси слитка и в печи составляет 70°C , через 150 мин — 40 , через 180 мин — 25°C .

Таким образом, в исходном варианте, близком к действительному, качественный прогрев слитка, соответствующий $\Delta t_{\max} = 30^{\circ}\text{C}$, может быть осуществлен более чем за 2,5 ч пребывания в печи. Такая большая длительность нахождения в печи обусловлена тем, что в момент загрузки в печь температура в центре слитка $t_{\text{центр}}$ ниже, чем температура в печи $t_{\text{печ}}$, а температура на поверхности слитка $t_{\text{пов}}$ еще меньше, т. е. выполняется условие $t_{\text{печ}} > t_{\text{центр}} > t_{\text{пов}}$. Поэтому после загрузки в печь температура на поверхности слитка быстро возрастает, стремясь к температуре в печи, а температура его центра из-за тепловой инерции еще некоторое время снижается и лишь потом начинает повышаться.

Если уменьшить суммарную продолжительность с момента начала разливки до момента загрузки слитка в печь, можно обеспечить условие, когда при загрузке в печь температура центра слитка будет больше температуры в печи, а температура на поверхности — меньше температуры в печи, т. е.

$t_{\text{центр}} > t_{\text{печ}} > t_{\text{пов}}$. В этом случае после загрузки в печь температура центра продолжает снижаться, стремясь к температуре в печи, а температура на поверхности быстро возрастает, также стремясь к температуре в печи. Выравнивание температуры по сечению произойдет гораздо быстрее, чем в исходном варианте.

Это подтверждается вариантными расчетами. Рассмотрим процессы затвердевания, охлаждения и нагрева указанного слитка в варианте, близком к оптимальному, когда необходимая продолжительность нагрева в печи минимальна. В данном случае длительность нахождения слитка в изложнице составляет 85 мин, что на 95 мин меньше, чем в исходном варианте, а длительности пребывания на воздухе и в термостате остаются такими же. При этом с момента разливки до момента загрузки в печь должно пройти 125 мин, тогда как в исходном варианте — 220 мин.

На рисунке, б показано изменение температуры на поверхности и на оси слитка в его среднем сечении в данном варианте. Как видно, полное затвердевание наступает в момент $\tau = 120$ мин, т. е. за 5 мин перед загрузкой слитка в печь. В момент загрузки температура на оси слитка составляет 1310°C , на поверхности — 920°C . После этого температура на оси довольно быстро и монотонно снижается до температуры в печи 1200°C , а на поверхности быстро возрастает до температуры в печи, причем не происходит пересечения во времени значений температур в центре и на поверхности слитка. Через 30 мин после помещения слитка в печь в среднем его сечении происходит выравнивание температуры: максимальное ее отклонение в среднем сечении от температуры в печи не превышает 5°C , однако в сечениях, близких к торцевым, как показали расчеты, максимальная разница температур Δt_{max} достигает 70°C . Через 60 мин пребывания слитка в печи $\Delta t_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$. Таким образом, в данном варианте качественный нагрев слитка в печи можно осуществить за 60 мин.

За счет сокращения интервала времени с начала разливки до загрузки в печь с 220 до 125 мин продолжительность нахождения слитка в печи, необходимая для его качественного нагрева, сократилась со 170 до 60 мин, т. е. почти в 3 раза. Соответственно в 3 раза повышается производительность печи и резко снижается удельный расход топлива. В оптимальном варианте подвод теплоты к слитку в печи незначителен, так как по существу в

печи происходит выравнивание температуры по сечению слитка.

Если еще уменьшить интервал времени с момента разливки до загрузки в печь по сравнению с оптимальным вариантом, то, как показали дополнительные расчеты, произойдет затягивание процесса выравнивания температуры по сечению слитка. В оптимальном варианте слиток загружается в печь со среднемассовой температурой $t_{\text{м}}$, несколько меньшей, чем температура в печи $t_{\text{печ}}$. Если в момент загрузки в печь $t_{\text{м}}$ будет равна $t_{\text{печ}}$, то сначала будет происходить подвод теплоты к слитку, поскольку в момент загрузки температура на поверхности $t_{\text{пов}}$ меньше $t_{\text{печ}}$. В результате этого $t_{\text{м}}$ станет выше $t_{\text{печ}}$, и потребуются отвести излишнюю теплоту от слитка, а для этого температура на поверхности должна превысить температуру в печи. Очевидно, что в данном случае выравнивание температуры в слитке будет происходить дольше, чем в оптимальном варианте.

Следует отметить, что в рассмотренном исходном варианте физическая теплота слитка, получаемого при разливке, частично используется, поскольку в печь он загружается со среднемассовой температурой около 900°C . Если бы в печь загружался холодный слиток с температурой окружающей среды, то необходимое время нагрева слитка и расход топлива в печи значительно бы увеличились. Итак, можно сформулировать следующие условия, обеспечивающие минимальную необходимую продолжительность выдержки слитка в печи камерного типа с постоянной температурой в рабочем пространстве $t_{\text{печ}}$:

1) в момент загрузки слитка в печь температура в его центре $t_{\text{центр}}$ должна быть больше температуры в печи $t_{\text{печ}}$, которая должна быть больше температуры на поверхности слитка $t_{\text{пов}}$; при этом среднемассовая температура слитка $t_{\text{м}}$ должна быть меньше $t_{\text{печ}}$;

2) после загрузки слитка в печь температура в его центре должна монотонно снижаться, стремясь к температуре в печи, а температура на поверхности — монотонно возрастать, также стремясь к температуре в печи.

Оптимальный суммарный интервал времени с момента разливки жидкой стали до загрузки слитка в печь $\tau_{\text{охл}}$, при котором необходима длительность выдержки в печи $\tau_{\text{нагр}}$ минимальна, зависит в основном от формы и массы стального слитка. Как показали дополнительные исследования, марка стали также влияет на оптимальное значение $\tau_{\text{охл}}$,

но значительно меньше. Кроме того, на $\tau_{\text{охл}}$ оказывают влияние длительности нахождения слитка в изложнице, на воздухе и в термостате, где условия теплообмена на поверхности слитка значительно различаются.

Значение $\tau_{\text{нагр}}$ зависит от формы и массы слитка, а также от требуемого качества прогрева, т. е. от максимальной разницы температур слитка и рабочего пространства печи Δt_{max} : чем крупнее слиток и меньше Δt_{max} , тем больше значение $\tau_{\text{нагр}}$.

Выводы

1. Большой резерв энергосбережения в нагревательных печах металлургического производства заключается в использовании физической теплоты стальных слитков, получаемых при разливке жидкой стали.

2. При непрерывной разливке физическая теплота разлитого металла в большинстве случаев теряется в окружающей среде, и в нагревательные печи прокатного производства поступает холодный металл, в результате чего удельный расход топлива в печах в несколько раз больше, чем при загрузке в печь горячего металла сразу после машины непрерывного литья заготовок.

3. При разливке стали в изложницы физическая теплота слитков частично используется в нагревательных печах камерного типа. За счет оптимизации интервала времени с момента разливки до момента загрузки слитка в печь можно также значительно сокра-

тить необходимую длительность выдержки в печи и снизить удельный расход топлива.

4. Существует оптимальный интервал времени с момента разливки жидкой стали до момента загрузки слитка в печь, зависящий от условий охлаждения слитка, его геометрии и марки стали, при котором необходимая длительность выдержки в печи при заданном качестве прогрева и удельный расход топлива минимальны.

Список литературы

1. Соколов А. К. Совершенствование и оптимизация нагрева металла в газовых печах методом математического моделирования. — Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т имени В. И. Ленина, 2012.
2. Теоретическое изменение интенсивности охлаждения и затвердевания сляба в машине непрерывного литья заготовок / С. В. Лукин, В. В. Мухин, Е. Б. Осипов и др. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2009, № 3.
3. Лукин С. В., Шестаков Н. И., Калягин Ю. А. Способ динамического управления вторичным охлаждением сляба на машинах непрерывного литья заготовок при стационарных и переходных процессах. Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). — М.: Машиностроение, 2003, № 3.
4. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горяинов, З. К. Кабаков. — М.: Металлургия, 1982.
5. Китаев Е. М. Затвердевание стальных слитков. — М.: Металлургия, 1982.
6. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. — М.: Металлургия, 1975.

s.v.luk@yandex.ru