



УДК 669

Поступила 22.09.2013

А. Б. СТЕБЛОВ, С. Н. БЕРЕЗОВ, ООО «ЛИТОН ТЕХНОЛОГИЯ»

ТЕХНОЛОГИЯ МНЛЗ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ

Представлены некоторые технологические параметры литейно-прокатного комплекса на участке машина непрерывного литья заготовки – прокатный стан.

Some technological parameters of the foundry and rolling complex at the area of the machine of the rolling steel slug continuous casting are presented.

В [1] кратко изложен опыт реализации проекта микроразлива литейно-прокатного комплекса (ЛПК) для производства арматуры для строительства в объеме до 30 тыс. т в год. Проектирование и управление проектом осуществляет ООО «ЛИТОН ТЕХНОЛОГИЯ». Поставщиком основного технологического оборудования является фирма СИММ (Китай).

В данной работе представлены некоторые технологические параметры ЛПК на участке МНЛЗ – прокатный стан. Основная задача – оптимизация технологии разлива стали, обеспечивающей максимальную производительность ЛПК при выполнении всех требований по качеству макроструктуры и поверхности непрерывнолитой заготовки. Второстепенная задача – определение координаты установки ножниц МНЛЗ и обеспечение необходимого теплосодержания заготовки в момент ее подачи в черновую клетку прокатного стана.

Сталь для производства строительной арматуры по ГОСТ Р 52544 выплавляется с химическим составом соответствующих марок Ст 3СП и 35ГС. Жидкая сталь после выпуска из 5-тонной печи раскисляется и доводится до заданного химического состава при сливе металла в сталеразливочный ковш. Металл сливается в ковш, разогретый до 1100 °С с перегревом относительно ликвидуса на 40–50 °С. В зависимости от химического состава температура ликвидуса рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{ликв}} = 1537 - 88C - 8Si - 5Mn - 1,5Cr - 4Ni - 2Mo - 5Cu - 2V - 30P - 25S. \quad (1)$$

Металл из плавильной печи выпускается в сталеразливочный ковш при температуре 1580–1610 °С. Одновременно на струю металла подаются необходимые раскислители и ферросплавы. По-

сле перелива металла в промежуточный ковш МНЛЗ поверхность металла утепляется и ковш закрывается футерованной крышкой. Перепад температуры металла между стальковшом и промковшом составляет 80–90 °С. Промковш разогрет до 1000 °С и вмещает 1,8 т жидкого металла. В момент слива металла огнеупоры имеют температуру около 750 °С, но в процессе разлива кладка промковша разогревается до 850 °С. Огнеупорная кладка ковша забирает около 15% тепла от массы жидкой стали, поэтому для сохранения стабильной температуры во время разлива 1540–1560 °С, кроме утепления зеркала металла и закрытия крышкой, включаются две газовые горелки с общим расходом природного газа до 1,2 м³/ч.

Оборудование фирмы СИММ позволяет переливать металл в промковш через носик наклоняемого ковша или через донное отверстие при открытом стопоре. Разливка стали производится в сечение 70×70 мм, а при увеличении годового производства до 50 тыс. т – в сечение 80×90 мм. При радиусе разливочной дуги МНЛЗ 4 м возможно и производство товарной заготовки сечением 100×100 мм. Для обеспечения более легкого запуска МНЛЗ и уменьшения затягивания разливочного отверстия дозатора ($d_p = 10,5$ мм) внизу дозатора установлена кольцевая газовая горелка с расходом газа 0,3 м³/т.

Скорость разлива и интенсивность охлаждения кристаллизатора являются важными параметрами управления процессом разлива. Заготовка должна выходить из кристаллизатора, имея достаточную толщину затвердевшего слоя (корочки), чтобы не произошло раздутия заготовки или прорыва из-за ферростатического давления жидкого металла. Для случая разлива углеродистой стали малых сечений была найдена зависимость формирования толщины корочки δ , мм, от скорости

разливки V , м/мин, и длительности кристаллизации t , мин:

$$\delta = 4,3 - 1,22V + 0,9t. \quad (2)$$

Для улучшения жидкотекучести стали и получения легкоплавких неметаллических включений производится присадка 1,2–1,3 кг/т силикокальция. Улучшает разливку стали использование в качестве раскислителя феррованадия до 0,8 кг/т, однако это увеличивает себестоимость заготовки. Известно, что пораженность металла поверхностными дефектами во многом зависит от температуры разливки стали и степени окисленности металла при разливке. Было установлено, что при температуре разливки стали >1570 °С количество продольных и поперечных трещин на поверхности заготовок резко возрастает. Минимальное количество поверхностных дефектов соответствует температуре стали в проковше 1545 °С при соотношении $Mn/S \leq 25$ и $C/10 + [S] \leq 0,035$. Технология выплавки и разливки стали была отработана при среднем содержании углерода в стали 0,17%. Количество дефектов, связанных с жидкотекучестью стали, зависит и от соотношения марганца к кремнию, которое рекомендуется выдерживать $Mn/Si \geq 2,0-2,5$. Для снижения окисленности струи металла при выпуске металла из стальной ванны на проковш укладывается кольцо из волокнистого огнеупора. Для защиты струи металла при выпуске из проковша в кристаллизатор к днищу проковша крепится гофрированная труба из огнестойкой ткани, которая поднимается специальным рычагом при удалении разливщиком образующегося шлака на мениске металла в кристаллизаторе. Газовая горелка также препятствует образованию окислительной среды вокруг струи металла.

Известно, что осевая неоднородность, рыхлость, дефекты макроструктуры в сечении заготовки зависят как от качества самой жидкой стали, так и от условий разливки (скорости и температуры разливки). Особенно это проявляется при уменьшении сечения заготовки, поскольку снижается ферростатическое давление столба жидкой стали. Если скорость охлаждения – кристаллизация стали высока, то столбчатые кристаллы встречаются в центре сечения и зона твердо-жидкого состояния не получает развития. В возникающую осевую пористость ликвидируют С, S и P. В результате необходимо решать компромиссную задачу определения оптимального соотношения скорости разливки V , температуры разливки T_p , скорости охлаждения металла в кристаллизаторе и в ЗВО (зона вторичного охлаждения). При мягком охлаждении в ЗВО, когда температура поверхности заготовки постоян-

на и составляет 1120 °С, зона столбчатых кристаллов снижается почти в 2 раза и составляет 8 мм. ЗВО имеет длину 1700 мм, при давлении воды 3 атм на заготовку подается 0,6 л/кг или $0,18$ м³/ч.

При таком режиме охлаждения зона равноосных кристаллов в центре заготовки увеличивается, что почти в 3 раза снижает осевую рыхлость. При скорости разливки 3 м/мин и мягком охлаждении ликвационная неоднородность соответствует 1–2-му баллу, тогда как при интенсивном охлаждении – 4-му баллу. Механизм качания кристаллизатора – синусоидальный с амплитудой 5–10 мм.

Учитывая ограничение по габаритам ЛПК, необходимо точно установить момент реза заготовки на ножницах, чтобы не попасть при порезке в зону жидкой фазы. Из практики работы МНЛЗ ВНИИМЕТМАШ на заготовках сечениями 60×80 и 82×82 мм было получено выражение, позволяющее с достаточной точностью определить металлургическую длину L_m , при которой в центре заготовки происходит окончательная кристаллизация:

$$L_m = 0,024a^2V, \quad (3)$$

где a – расстояние от центра заготовки до поверхности, см; V – скорость разливки, м/мин.

Формула справедлива при температуре разливки $T_p = 1550-1560$ °С.

Рассматривая вариант разливки на МНЛЗ заготовки сечением 70×70 мм при $V = 3$ м/мин, по формуле (3) получаем $L_m = 3,52$ м.

На заготовках с максимальным сечением 80×90 мм при той же скорости разливки полная кристаллизация произойдет на расстоянии $L_m = 5,17$ м от оси мениска кристаллизатора, при разливке товарной заготовки сечением 100×100 мм $L_m = 7,2$ м.

Необходимой технологической операцией для обеспечения качества поверхности заготовки является подача масла на мениск кристаллизатора. Первоначально поставщик оборудования рекомендовал использование рапсового масла в количестве до 700 г/т. Однако при этом на поверхности заготовки образовывались дефекты в виде плен и раскатанных пузырей. Качество поверхности заготовок значительно улучшилось при использовании смеси парафина (50%) и петролатума (50%) при расходе смеси 270 г/т. Эта смесь позволяет увеличить температуру вспышки масла с 115 до 260 °С. В данном случае смазка не сгорает сразу на зеркале металла, а доходит до зоны контакта кристаллизатора с образующейся корочкой металла. В момент порезки на ножницах температура поверхности составляет 980 °С, а в центре заготовки – 1460 °С. Поскольку длина раскатного поля на стане составляет 9 м в одну сторону, то заготовка на

МНЛЗ режется на длины от 1,5 до 2,1 м, соответственно масса заготовки меняется от 60 до 80 кг. В черновой реверсивной клети заготовка катается в 5–7 проходов, цикл прокатки в черной клети – до 120 с, поэтому заготовка остывает на рольганге в течение 120–150 с. Для выбора технологии прокатки и калибровки необходимо знать теплосодержание заготовки перед прокаткой.

В настоящее время в научно-технической литературе опубликованы десятки статей, описывающих модели расчета температурного поля и теплосодержания заготовки перед прокаткой и в процессе прокатки. Однако точность всех расчетов по этим моделям зависит от установленного $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{и} + \alpha_{к}$, где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплообмена; $\alpha_{и}$ и $\alpha_{к}$ – соответственно коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией.

Полагаем, что зависимость распределения температуры по сечению заготовки подчиняется параболическому закону:

$$T_I = T_{ц} (1 - KX^2), \quad (4)$$

где T_I , $T_{ц}$ – соответственно температура в расчетной точке сечения и центре заготовки; K – коэффициент, зависящий от размеров сечения и марки стали; X – расстояние от расчетной точки до центра. Принимаем, что в течение рассматриваемого времени разность температуры центра и поверхности постоянна, т. е. $\Delta T = T_{ц} - T_{п} = \text{const}$. Авторами [2] установлено, что в зависимости от размера сечения заготовки коэффициент K хорошо описывается гиперболической зависимостью. С некоторым приближением его можно рассчитывать по выражению: $K = 1,05 / a$. Потерями тепла от контакта нижней поверхности заготовки с рольгангом пренебрегаем.

Средняя по сечению температура будет равна:

$$T_{cp} = \frac{1}{X} \int_0^X T dX = T_{ц} \left(1 - \frac{KX^2}{3} \right). \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) $T_{ц}$ из выражения (4), получаем температуру поверхности:

$$T_{п} = T_{cp} (1 - 0,67Ka^2), \quad (6)$$

где T_{cp} – средняя температура по сечению заготовки в момент $t = 0$.

В работе [2] после численных преобразований уравнения Стефана-Больцмана для расчета потери температуры горячего металла лучеиспусканием получено выражение для расчета углеродистых сталей квадратного сечения:

$$T_{п} = \frac{T_{0п}}{1 + \frac{FCT_{0п}^3 t}{cG \cdot 10^8 (1 - 0,67Ka^2)}}, \quad (7)$$

где $T_{0п}$ – температура поверхности заготовки в момент времени $t = 0$; F – теплоотдающая поверхность; $C = \varepsilon C_s$ – постоянная лучеиспускания охлаждаемого тела ($\varepsilon = 0,8-0,94$, $C_s = 4,8-5,2$). Тогда $C = 4,8$ кал/(м²·ч·град⁴); c – теплоемкость стали, кал/(кН·град); G – масса металла, т.

После подстановки этих показателей в уравнение (7) получим упрощенное выражение для расчета температуры поверхности:

$$T_{п} = \frac{T_{0п}}{1 + \frac{13,6T_{0п}^3 t}{(1 - 0,17KH^2)H \cdot 10^{11}}}, \quad (8)$$

где $H = 2a$.

Потеря температуры в заготовке может быть найдена по упрощенной формуле, где время задается в секундах. Для расчета T_{cp} принимаем $T_{ц} = 1495$ °С, равной температуре солидуса в момент резки заготовки на ножницах.

Тогда по формуле (5) расчетная $T_{cp} = 1449$ °С.

$$\Delta T = \frac{CF}{Gc} \left(\frac{T_{cp} + 273}{1000} \right)^4 \frac{t}{0,36} \quad (9)$$

для сталей при температуре выше 800 °С можно принять $c = 0,166$ кал/(кг·°С).

Подставляя данные в формулу (9), рассчитываем снижение температуры:

$$\Delta T = (432 - 273) = 162 \text{ °С.}$$

Средняя температура заготовки через 150 с охлаждения составит 1017 °С. Температура поверхности, вычисляемая по формуле (8), составит 860 °С. При расчете температуры поверхности $T_{0п}$ подставляется в градусах Кельвина.

Практика работы на линейном стане СИММ показывает, что мощность двигателей стана позволяет начать прокатку заготовки при таком теплосодержании, тем более, что в результате прокатки заготовка разогревается от работы деформации. В данном случае разогрев может составить не менее 40°С по массе заготовки. Прирост температуры от прокатки можно определить по формуле [3]:

$$\Delta T_{деф} = 4,28P \lg \frac{1}{\eta}, \quad (10)$$

где $P = \sigma_B (T_{лик} - T_I - 75) / 1500$ (σ_B – предел прочности стали при 20 °С, кг/мм², T_I – температура

(средняя) в конкретном проходе, °С); $\frac{1}{\eta} = \frac{h_i}{h_{i+1}}$ –

коэффициент деформации.

Для повышения теплосодержания заготовки перед началом прокатки в непосредственной близости от ножниц МНЛЗ был установлен индуктор общей мощностью 1140 кВт, состоящий из двух блоков длиной по 1500 мм.

Характеристики установки индукционного подогрева: $U_{\text{вх}} = 380$ В; $U_{\text{вых}} = 800$ В; $f = 10$ кГц. В случае подогрева заготовки сечением 70×70 мм потребляемая мощность ≤ 400 кВт/т, при нагреве заготовки сечением 80×90 мм – ≤ 360 кВт/т.

Установка обеспечивает температуру заготовки перед прокаткой $T_{\text{ср}} = T_{\text{п}} = T_{\text{ц}} = 1100$ °С, что позволяет получать хорошее качество арматуры при минимальных затратах электроэнергии на прокатном стане.

Выводы

Для предотвращения появления дефектов на поверхности заготовок необходимо выдерживать требуемое соотношение в стали $Mn/S \leq 25$

и $C/10 + [S] \leq 0,035$. Жидкую сталь сливать в разогретый ковш с температурой футеровки не менее 1000 °С. Для снижения падения температуры металла при разливке следует накрывать промковш футерованной крышкой и обеспечить работу газовой горелки над зеркалом металла.

При скорости разливки заготовки 3 м/мин на сечение 100×100 мм необходимое расстояние от оси мениска кристаллизатора до установки ножниц для порезки заготовок составляет 8–10 м.

После порезки на ножницах заготовка в течение 10 с должна передаваться по рольгангу на прокатный стан. Упрощенные инженерные формулы позволяют рассчитать теплосодержание заготовки перед прокаткой. В момент входа заготовки в прокатную клетку среднемаховая температура заготовки составляет 1017 °С, поверхности – 860 °С. Для выравнивания температуры заготовки по сечению и подогрева поверхности металла целесообразно подогреть заготовку на установке индукционного нагрева мощностью 1140 кВт. В процессе прокатки выделяется тепло деформации, эквивалентное приросту температуры на 40 °С.

Литература

1. Стеблов А. Б., Березов С. Н., Таирбеков М. М. и др. Проектирование и строительство металлургического микроразвода // *Литье и металлургия*. 2013. № 1. С. 17–20.
2. Р и м е н В. Х., Б р о в м а н М. Я., К у л и к А. Б. Инженерная методика расчета температурного режима прокатки на заготовочных станах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1974. № 8. С. 66–69.
3. С т у к а ч А. Г. Расчет охлаждения металла при горячей прокатке // *Сталь*. 1955. № 7. С. 626–629.