

УДК 621.746.047

## Влияние инъекции аргона на формирующуюся оболочку сортовой непрерывнолитой заготовки

Е. В. Штепан, Г. А. Редько, В. Е. Ухин, А. В. Науменко,  
Е. Ю. Жибоедов

Донецкий национальный технический университет,  
Енакиевский металлургический завод, Украина

*Выполнены исследования влияния вдувания аргона в струю стали на стабильность непрерывной разливки. На основании данных физического и математического моделирования рекомендованы параметры вдувания аргона в струю стали при отливке сортовой заготовки.*

**В**ажнейшими проблемами производства сортовой заготовки в современных условиях являются повышение качества, снижение энергоемкости производства и себестоимости готовой продукции.

Решение вопросов, направленных на повышение качества и снижение стоимости заготовки, возможно путем детального изучения организации и воздействия струи металла, проникающей в жидкую ванну кристаллизатора, на процессы кристаллизации заготовки. Это особенно важно при отливке заготовки малого сечения с высокой скоростью, когда резко увеличивается (в 3–4 раза) соотношение площадей сечений струи металла и кристаллизатора. В этом случае размывание потоками стали твердеющего металла приводит к неравномерности нарастания твердой корочки и, как следствие, наличию ромбичности профиля заготовки.

Целью настоящей работы являлось определение возможности снижения воздействия струи стали на формирующуюся корочку заготовки. Одним из таких способов можно считать вдувание аргона через стопор-моноблок в струю металла [1–3].

Эффект торможения струи металла в кристаллизаторе при вдувании в нее газа изучали

на физической модели для разливки закрытой струей (рис. 1), где вместо аргона использовали воздух.

На рис. 2 представлены характерные примеры проникновения пузырьков в расплав в зависимости от расхода вдуваемого газа. Установлено, что глубина проникновения струи моделирующей жидкости в 2–4 раза снижается при вдувании в нее газа. При этом оптимальный расход вдуваемого газа зависит от скорости разливки и сечения струи. На практике большое значение на расход вдуваемого газа, по-видимому, будет оказывать также фактор увеличения объема аргона в струе при его нагревании, а также бурление зеркала металла, обусловленное всплыванием пузырьков газа на поверхность.



Рис. 1. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики потоков расплава в полости кристаллизатора криволинейной МНЛЗ:

1 — резервуар; 2 — опорные колонны; 3 — прозрачная модель промежуточного ковша; 4 — прозрачная модель кристаллизатора; 5 — система "стакан-дозатор-погружной стакан"; 6 — стопор-моноблок; 7 — компрессор; 8 — ресивер; 9 — ротаметр; 10 — насос; 11 — устройство синхронизации напоров жидкости; 12 — устройство визуализации и измерения скорости потоков

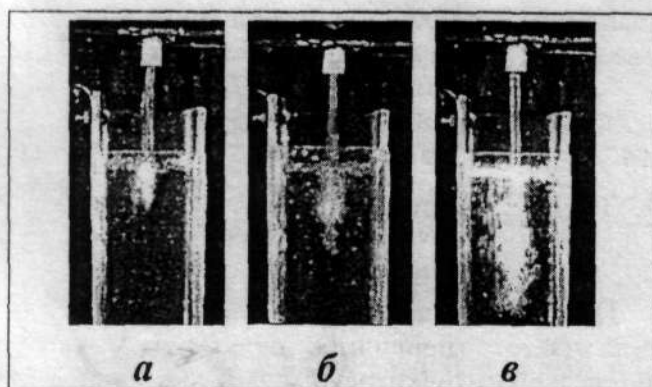


Рис. 2. Распределение потоков жидкости в модели кристаллизатора криволинейной МНЛЗ (а–в — обозначения в тексте)

Разливка стали на сортовую заготовку с использованием погружного стакана имеет существенные технологические преимущества перед разливкой открытой струей. Поэтому на многих металлургических заводах доля сортовой заготовки, отливаемой с погружным стаканом, постоянно возрастает. Практически все ведущие производители качественной сортовой заготовки наращивают долю стали, разливаемой с погружным стаканом. Эта доля в среднем колеблется в пределах 30–50 %, а для некоторых предприятий (например, металлургический завод "Saarstahl", Германия) она уже составляет 70–80 %.

В настоящей работе на основании результатов физического моделирования была сделана попытка математического моделирования процессов формирования заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ при вдувании аргона в струю стали (а — 2 мм<sup>3</sup>/с; б — 5 мм<sup>3</sup>/с) через стопор-моноблок и без продувки аргоном (в).

Теоретическая основа математической модели — стандартные уравнения теории теплопереноса, базирующиеся на фундаментальных законах термодинамики сплошных сред и физики неравновесных процессов [4, 5].

Процессы теплопереноса в затвердевающей непрерывнолитой заготовке описываются уравнением, отражающим энергетический баланс в системе [6]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{df_s}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $T$  — температура;  $\tau$  — время;  $x, y, z$  — пространственные координаты;  $V_x, V_y, V_z$  — компоненты скорости (отличны от нуля только в области жидкой фазы);  $\rho$  — плотность стали;  $C$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность стали;  $L$  — удельная теплота кристаллизации;  $f_s$  — доля твердой фазы.

Экспериментально установлено, что, хотя конвективный теплоперенос и приводит к увеличению в несколько раз стали в жидкой фазе (что способствует более быстрому устранению перегрева расплава в кристаллизаторе), данный фактор слабо влияет на толщину твердой корки и на поле температур [7]. Это объясняется тем, что достигаемый энергетический эффект составляет лишь небольшую долю от выделяющейся теплоты кристаллизации.

Механизм кондукции (теплопроводности) важен для переноса тепла в поперечном сечении ( $x, y$ ). Распространение же тепла в аксиальном направлении ( $z$ ) происходит, главным образом, в результате движения заготовки. Вклад кондукции пренебрежимо мал из-за низкой теплопроводности стали и относительно высокой скорости вытягивания заготовки [6].

Используя данные упрощения, а также учитывая, что время однозначным образом связано со значением аксиальной координаты ( $\tau = z/v_c$ , где  $v_c$  — скорость вытягивания заготовки, м/с), а доля твердой фазы является функцией температуры ( $f_s = f(T)$ ), можно преобразовать уравнение (1) к виду:

$$\rho C_{\text{эф}} v_c \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где

$$C_{\text{эф}} = C + L \frac{df_s}{dT},$$

Уравнение (2) позволяет найти распределение температуры  $T = f(x, y, z)$  в объеме затвердевающей заготовки.

Входящие в уравнение (2) теплофизические параметры  $\rho, \lambda$  и  $C$  являются функциями температуры и, в общем случае, полевыми переменными (функциями координат). Их значения в каждой точке заготовки рассчитывают по эмпирическим зависимостям [6]:

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= f_1(T), & \lambda(x, y, z) &= f_2(T), \\ C(x, y, z) &= f_3(T). \end{aligned}$$

Затвердевание металла является сложным комплексом физических процессов (сегрегация, рост дендритов, движение междендритного расплава и т. п.), которые недостаточно изучены, а их точное математическое описание было бы чрезвычайно сложным. Поэтому для моделирования затвердевания привлекают различные упрощающие гипотезы. Достаточно адекватным приближением для бинарных сплавов (в том числе стали) является модель квазиравновесной двухфазной зоны [4], которая позволяет рассчитать поле доли твердой фазы  $f_s$  как функцию температуры и теплофизических характеристик металла

$$f_s = 1 - \left( \frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{-1/(1-k)},$$

где  $k$  — равновесный коэффициент распределения примеси;  $T_0$  — начальная температура расплава (на поверхности мениска);  $T_L$  — температура ликвидуса.

При известном распределении твердой фазы  $f_s = f(x, y, z)$  рассчитывают все остальные параметры кинетики затвердевания (ширина и глубина жидкой лунки, ширина двухфазной области, толщина твердой корочки, локальные коэффициенты затвердевания).

Определяющее влияние на динамику изменения поля температур и характер затвердевания металла оказывает процесс отвода тепла с поверхности заготовки. Поэтому правильная постановка граничных условий играет решающую роль для получения адекватного решения задачи.

Можно с достаточной точностью предположить, что температура на поверхности стали в кристаллизаторе распределена равномерно по всему сечению и остается постоянной в течение всего периода формирования заготовки [8]. Ее значение зависит от скорости разливки и задается в начале расчета как константа. Также можно считать, что поверхность мениска является плоской и теплоизолированной (тепловые потери отсутствуют). Соответствующее граничное условие будет следующим:

$$T(x, y)|_{z=0} = T_0 = \text{const.}$$

Температура боковой поверхности заготовки для любого поперечного сечения связана с

плотностью теплового потока по закону Фурье [2]

$$z > 0: -\lambda \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L_x} = q, -\lambda \frac{dT}{dy} \Big|_{y=L_y} = q.$$

Значение теплового потока, в свою очередь, определяется механизмом теплоотвода и зависит от рассматриваемой области охлаждения.

При прохождении заготовки через кристаллизатор (первичное охлаждение) отвод тепла из заготовки осуществляется через ряд слоев с различными коэффициентами теплопроводности.

Наибольшее термическое сопротивление имеет газовый зазор, который образуется вследствие усадки стали и отхода твердой корочки от стенок кристаллизатора. Толщина газового зазора нестабильна и может изменяться по высоте и периметру кристаллизатора, поэтому определение термического сопротивления данного слоя значительно затруднено.

Так как объединение математической модели кристаллизации заготовки и гидродинамики струи стали, проникающей в кристаллизатор, представляет значительные затруднения, влияние струи на затвердевание заготовки учитывали следующим образом. На физической модели определяли параметры гидродинамики струи в полости кристаллизатора для разливки с вдуванием аргона с различным расходом и без вдувания аргона. В математической модели кристаллизатор делили на коаксиальные области (до 10 областей), для каждой из которых существовала возможность изменения коэффициента теплопередачи  $\lambda$ , а также на горизонтальные слои. Путем изменения коэффициента теплопередачи имитировали процессы влияния струи стали, проникающей в кристаллизатор из промежуточного ковша, на затвердевшую корочку заготовки.

Известно [7], что коэффициент теплопередачи в области внедрения струи металла в полость кристаллизатора может значительно возрастать (в 10 раз). Исходя из этого, для различных сечений кристаллизатора вводили свой закон для определения коэффициента теплоотдачи по его сечению. При выборе значений  $\lambda$  учитывали данные физического моделирования внедрения струи в полость кристаллизатора.

Расчет проводили для заготовки сечением 120×120 мм, отливаемой при скорости разливки стали 4 м/мин, при условии, что струя, защищенная погружным стаканом от контакта с атмосферой, проникает в кристаллизатор по его оси. Результаты расчета (рис. 3) показывают, что без вдувания аргона условия кристаллизации несколько ухудшаются, корочка тоньше, чем при вдувании аргона, кроме того, существует область оптимальных расходов газа, при которых толщина образующейся корочки максимальна.

Для проверки адекватности математической модели реальному процессу были проведены измерения толщины затвердевшей корочки "чулков", полученных с вдуванием аргона в струю стали Ст3 и без вдувания аргона (рис. 4). Измерения проводили на двух противоположных гранях заготовки через каждый сантиметр ее длины, начиная от уровня мениска металла и заканчивая на уровне выхода из кристаллизатора. Результаты измерения показывают, что при вдувании аргона с расходом 1,5—1,7 м/мин толщина корочки заготовки по разным граням колеблется в меньшей степени, чем при разливке без вдувания аргона. При этом разность длины диагоналей для заготовки, полученной с вдуванием аргона с указанным расходом, составила 6 мм, а без вдувания аргона — 11 мм. Результаты измерения толщины корочки заготовки хорошо согласуются с данными физического и математического моделирования.

Таким образом, в результате выполненных с использованием физического и математического моделирования исследований можно сделать выводы о том, что для обеспечения благоприятных условий формирования сорто-



Рис. 3. Изменение толщины корочки заготовки в зависимости от расхода аргона, вдуваемого в струю стали

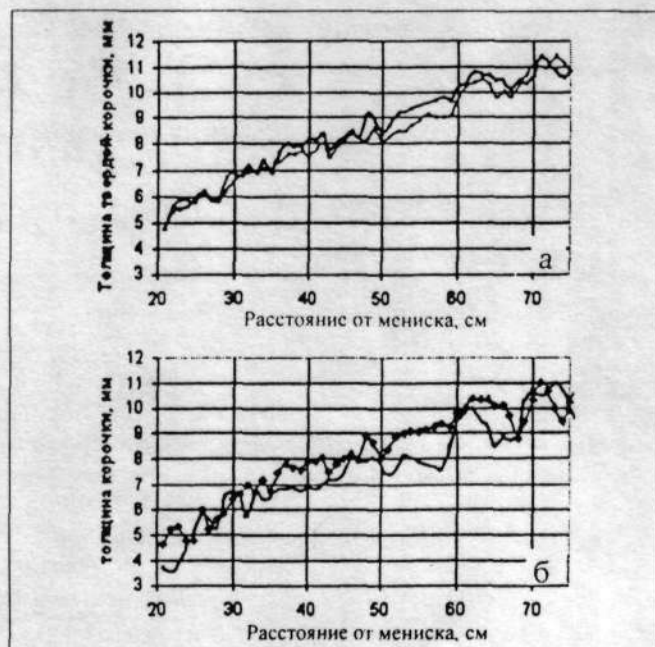


Рис. 4. Динамика нарастания корочки по двум противоположным граням заготовки при разливке стали Ст3 с вдуванием аргона (1,5 л/мин) в струю металла (а) и без вдувания аргона (б)

вой заготовки при разливке закрытой струей целесообразно вдувать аргон в струю стали на участке "промежуточный ковш—кристаллизатор". Рекомендуемый расход аргона при отливке заготовки сечением 120×120 мм составляет 1—2 л/мин, что приводит к уменьшению проникновения струи в кристаллизатор в 1,5—2 раза.

#### Список литературы

1. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. Донецк: ДонНТУ, 2002. 536 с.
2. Hua Bai, Brian G. Thomas. Effect of clogging, argon injection and continuous casting conditions on flow and air aspiration in submerged entry nozzles // Metallurgical and Materials Transactions. V. 32B. N 4. (August). 2001. P. 707—722.
3. Минаев А. А., Смирнов А. Н., Захур М., Момот С. В. Тенденции развития производства сортовых заготовок // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2001. № 6. С. 25—28.
4. Никитенко Н. И. Теория тепломассопереноса. К.: Наук. думка, 1983. 352 с.
5. Исаченко В. Л., Осипова В. Л., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергия, 1969. 439 с.
6. Mizikar E. A. Mathematical heat transfer model for solidification of continuously cast steel slabs // Transactions TMS-AIME. 1967. V. 239. P. 1747—1753.
7. Brimacombe J. K. Empowerment with knowledge — toward the intelligent mould for the continuous casting of steel billets // AIME SteelMaking Conference Proceedings (Dallas, USA, March 1993). Dallas, 1993. V. 76. P. 3—26.
8. Choudary S. K., Mazumdar D. Mathematical modelling of transport phenomena in continuous casting of steel // ISIJ International. 1994. V. 34. N 7. P. 584—592.