

Федосов А.В.¹, Казачков Е.А.², Чичкарев Е.А.³, Исаев О.Б.⁴

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И УСАДКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Разработана математическая модель процессов кристаллизации и усадки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе МНЛЗ, на основе которой проведены исследования динамики искажения профиля поперечного сечения сляба и предложен метод определения оптимальной конусности кристаллизаторов.

Повышение требований к качеству непрерывнолитых заготовок заставляет производителей более детально подходить к технологии их производства. В связи с этим ужесточаются требования к точности прогнозирования технологических параметров разлива, что приводит к необходимости создания более совершенных математических моделей.

Отдельной, важной задачей математического моделирования процесса разлива стали на МНЛЗ, является описание процессов формирования сляба в кристаллизаторе. Кристаллизатор МНЛЗ оказывает существенное влияние на качество формируемого сляба. Вопросом моделирования затвердевания стали в кристаллизаторе МНЛЗ занимались как зарубежные, так и отечественные исследователи [1 – 3]. Формирование слитка в кристаллизаторе это сложный и многофакторный процесс. Чем выше требования к точности модели, тем большее количество факторов должно учитываться в ней. Поэтому авторами продолжается поиск решений, которые обеспечивали бы максимальную точность расчетов и высокую производительность программы.

Целью данной работы являлось создание математической модели формирования и усадки слябовой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ, обеспечивающей высокую точность расчетов, и позволяющей учитывать большое количество технологических параметров разлива. Данная модель позволяет проводить детальные исследования усадки сляба с целью повышения качества непрерывнолитых заготовок.

Большинство представленных в литературе математических моделей это одномерные модели позволяющие рассчитать температурный профиль заготовки и ее усадку по одной из осей сляба. По результатам расчетов таких моделей невозможно определить искривление профиля сляба, возникающее вследствие неодинаковой усадки слитка в различных сечениях [1]. С помощью двухмерной модели можно провести расчет температуры и профиля сляба, с учетом усадки в заданный момент времени. Однако представленные в литературе подобные модели обладают рядом недостатков. Одним из них является способ задания физических свойств стали (теплопроводность, теплоемкость, плотность, линейная усадка) зависящих от ее температуры. Как правило, выделяется три температурных интервала, соответствующих твердой, жидкой стали и двухфазной области, в пределах которых значения физических параметров задаются постоянными [2, 3], хотя известно, что температурные зависимости физических свойств стали нелинейные функции. Таким образом, представленный способ задания параметров стали уже вносит погрешность в расчет модели. Еще одним часто встречающимся недостатком является способ задания расчетной сетки модели, который заключается в делении линейного размера на n равных по размерам элементов [2, 3]. Такой способ разбиения на элементы не учитывает особенностей распределения температурных градиентов и является не экономичным. Неравномерные расчетные сетки, давно применяются при расчетах методом конечных элементов, но не используются при создании конечно-разностных моделей.

Принимая вышесказанное во внимание, авторами была разработана конечно-разностная модель процессов кристаллизации и усадки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе МНЛЗ, в которой применяется неравномерная расчетная сетка, учитывающая распределение градиентов температуры по сечению слитка. Линейные размеры элементов увеличиваются по сложной гиперболической зависимости в направлении от внешней границы к центру сечения, в которой учитывается связь размеров элементов с законом роста корки стали (закон квадратного корня) (рис. 1).

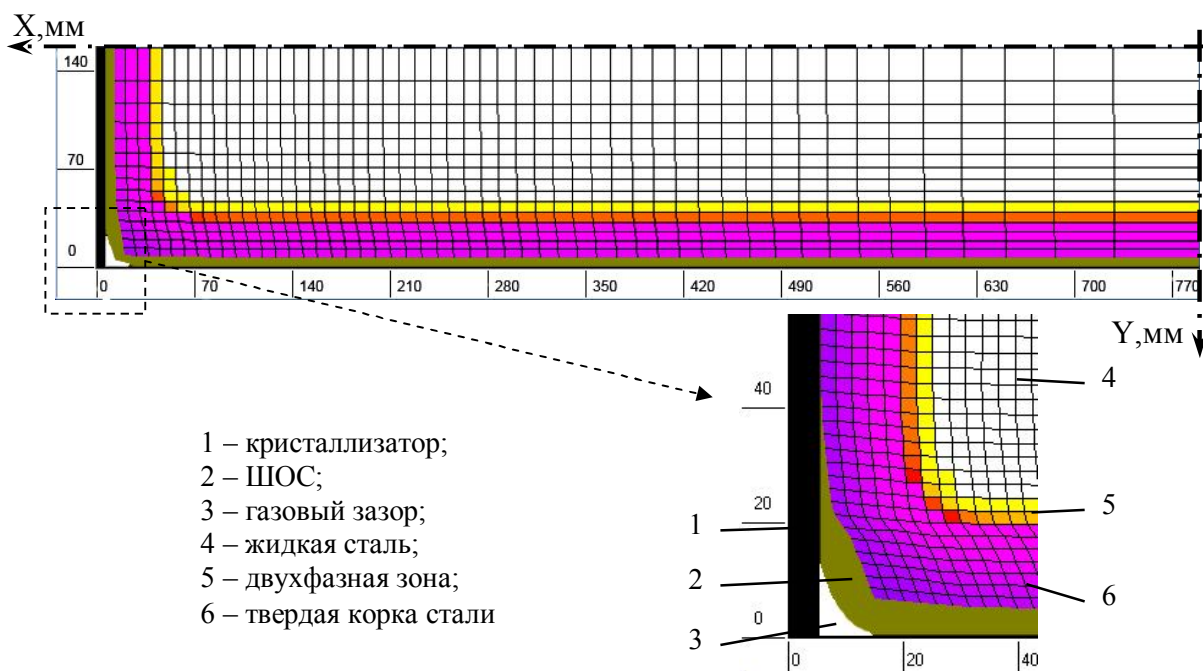


Рис. 1 – Схема расчетной сетки модели формирования сляба в кристаллизаторе МНЛЗ

Применение представленного метода построения расчетной сетки позволяет без потери точности расчетов сократить общее количество элементов примерно в два раза по оси. Уменьшение количества элементов по двум осям двумерной модели позволяет сократить объем расчетной сетки в четыре раза и повысить скорость расчетов в три раза. Сэкономленное машинное время может быть использовано для повышения точности расчетов за счет уменьшения линейных размеров граничных элементов, и усложнения структуры расчетов путем замены постоянных значений физических параметров на их функциональные зависимости от температуры. Такой подход задания физических параметров, к примеру, с успехом применяется в моделях зарубежных авторов [3]. Это позволяет учитывать изменения физических свойств стали при ее структурных преобразованиях во время охлаждения. Необходимые температурные зависимости определялись с помощью анализа различных литературных источников [3 – 5].

Описываемая модель позволяет варьировать такие параметры, как геометрия кристаллизатора (ширина, высота, конусность), расход воды на его охлаждение, теплофизические параметры ШОС, состав и начальная температура стали и скорость разливки.

Условия охлаждения в кристаллизаторе принимаются симметричными, поэтому расчетная область модели представлена в виде четверти сечения заготовки. Математическая модель построена на основе дифференциального уравнения теплопроводности и граничных условий третьего рода. Тепловой поток оценивался в зависимости от толщины газового зазора [6].

Расчет изменения линейных размеров элементов (усадки) производится по следующему уравнению:

$$l_{(x,y)}^{\tau+1} = l_{(x,y)}^{\tau} \cdot \left(1 + \frac{(\alpha_{T_{(x,y)}^{\tau+1}} + \alpha_{T_{(x,y)}^{\tau}})}{2} (T_{(x,y)}^{\tau+1} - T_{(x,y)}^{\tau}) \right), \quad (1)$$

где $l_{(x,y)}^{\tau}, l_{(x,y)}^{\tau+1}$ – линейный размер расчетного элемента в текущий и следующий момент времени, соответственно, м; α_T – коэффициент линейного расширения стали, зависящий от температуры расчетных элементов, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $T_{(x,y)}^{\tau}, T_{(x,y)}^{\tau+1}$ – температура расчетного элемента в текущий и следующий момент времени, соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Процесс моделирования заключается в вычислении распределения температуры по поперечному сечению слитка, пошагово по слоям, начиная сверху кристаллизатора, через промежуток времени Δt . Для каждого слоя проводится расчет изменения размеров сляба по двум

осям поперечного сечения (x, y) и расчет новых условий охлаждения в каждый момент времени. Результатами расчета математической модели являются объемное распределение тепловых и геометрических параметров слэба в кристаллизаторе, величины образующихся зазоров между слитком и кристаллизатором по его периметру, распределение тепловых потоков по всей теплообменной площади (слиток-кристаллизатор), температура поверхности кристаллизатора. С помощью полученных данных можно оценить степень и характер искривления профиля затвердевающего слэба.

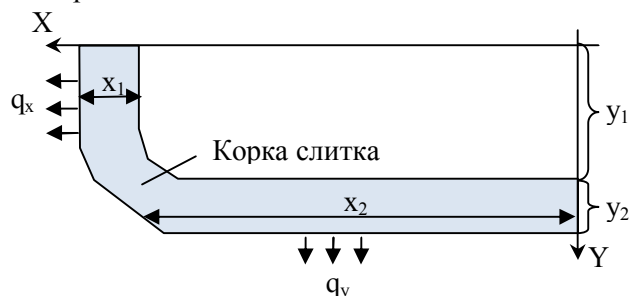


Рис. 2 – Схема усадки поперечного сечения слэба

зависит от температуры слоя x_2 которая определяется величиной теплоотвода по широкой грани q_y . Усадка на уровне y_1 зависит от температуры слоя x_1 , которая определяется величиной теплоотвода по узкой грани q_x . Такие зависимости определяют сложный характер изменения величин усадки профиля, зазоров слиток-кристаллизатор, теплоотвода не только по высоте кристаллизатора, а и по его периметру.

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования для условий кристаллизации стали с содержанием углерода 0,12 %, скорости разливки – 0,9 м/мин, в прямом кристаллизаторе высотой 1 м, при конусности узких граней 0,8 %, широких – 0,1 %. Сечение слэба 1550×300 мм. Кривые 1 – 4 демонстрируют динамику искривления профиля слэбовой заготовки в процессе ее затвердевания в кристаллизаторе МНЛЗ. Наибольшая усадка наблюдается в граничных слоях широкой грани слэба и практически линейно уменьшается в глубину слэба на ширину корки стали. Ближе к оси слитка его размеры изменяются значительно медленнее. Это приводит к образованию различных по величине зазоров между слитком и кристаллизатором по периметру. Величины этих зазоров также изменяются по высоте кристаллизатора. В начальный момент времени, за счет высокой скорости усадки в углах слэба величина зазора резко возрастает, в свою очередь также резко снижается и тепловой поток, что приводит к некоторому торможению усадки и зазор начинает плавно уменьшаться вследствие изменения сечения кристаллизатора.

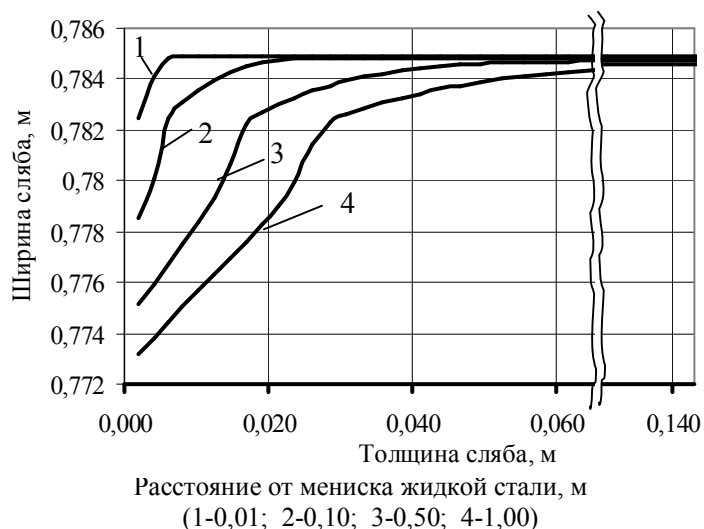


Рис. 3 – Искривление профиля слэбовой заготовки при ее формировании в кристаллизаторе МНЛЗ

На рис. 2 представлена общая картина усадки слитка. Очевидно, что усадка по оси X на интервале y_2 больше, чем на y_1 , что объясняется меньшей средней температурой на интервале y_2 . Усадка слитка на уровне y_2 значительно больше, что определяет искажение профиля слэба как это и видно на рис. 1 – 3. Аналогично искажается профиль слэба и по оси Y. Величина усадки и возникающего зазора (слиток-кристаллизатор) на уровне y_2

Изучив результаты математического моделирования и приняв во внимание тот факт, что ширина слэбов значительно больше их толщины (в 5 – 6,2 раза), а следовательно и количество тепла, отводимого от широкой грани кристаллизатора также примерно в пять раз больше чем от узкой грани, можно утверждать, что конусность узких граней кристаллизатора слабо влияет на теплообмен в общем, а выполняет роль формообразователя слэба. При недостаточной конусности узких граней наблюдается выпучивание слэба, при избыточной происходит затирание узких граней перпендикулярной к ним затверде-

шей коркой широкой грани слитка. Оба эти варианта характеризуются нежелательным искажением профиля сляба, что может повлечь за собой растрескивание поверхности сляба.

Таким образом, изменение профиля кристаллизатора по узким граням должно соответствовать изменению ширины формирующейся корки стали по широкой грани сляба. Идеальное изменение профиля кристаллизатора по высоте описывается нелинейной зависимостью, тогда как на отечественных предприятиях применяются кристаллизаторы с постоянным значением конусности по высоте. В таком случае оптимальная конусность должна обеспечивать на выходе из кристаллизатора сечение, соответствующее ширине корки стали по широкой грани сляба (x_2 на рис. 2). Принимая затвердевшую корку стали за единичный элемент, температура которого определяется как среднее значение между температурой ликвидус и температурой на поверхности корки можно рассчитать оптимальную конусность кристаллизатора:

$$w = l_{в.к.} - \frac{100 \cdot l_{в.к.}}{\left[1 + k \sqrt{\frac{h_{кр}}{v}} \cdot \left(\frac{\rho_{тв}}{\rho_{ж}} \right) \right] \cdot h_{кр}}, \quad (2)$$

где w – конусность узких стенок кристаллизатора, %; $l_{в.к.}$ – ширина верхнего сечения кристаллизатора, м; $h_{кр}$ – высота расчета и высота кристаллизатора соответственно, м; $\rho_{ж}$, $\rho_{тв}$ – плотность жидкой и твердой стали соответственно, м³/кг; v – скорость разливки, м/мин; r – толщина сляба, м; k – коэффициент учитывающий кинетику затвердевания корки стали (0,23 – 0,25), мин^{-0,5}.

Расчеты по итоговой формуле хорошо сходятся с расчетами по математической модели. Однако для более полного анализа процесса искажения профиля сляба в представленную модель предполагается добавить расчеты по учету термонапряженного состояния формирующейся корки слитка.

Выводы

1. Предложенный способ построения расчетной сетки математической модели затвердевания сляба в кристаллизаторе, учитывающий особенности распределения температурных градиентов по поперечному сечению сляба, позволяет повысить точность расчетов модели.
2. Разработанная математическая модель процессов кристаллизации и усадки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе МНЛЗ, позволяет проводить исследования искажения профиля поперечного сечения сляба при изменении основных технологических параметров разливки.
3. Предложенный метод определения оптимальной конусности узких стенок для кристаллизаторов с постоянным значением конусности, позволяет получить профиль сляба с минимальными искажениями, что положительно сказывается на качественных показателях слябов.

Перечень ссылок

1. Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка / И.О. Мищенко, А.В. Дуб, Е.В. Макарычева и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 3. – С. 15 – 21.
2. Гридин С.В. Исследование усадочных явлений при формировании слябовой заготовки в зоне кристаллизатора / С.В. Гридин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 176 – 180.
3. Ya Meng Heat transfer and solidification model of continues slab casting / Meng Ya, Thomas Brian G. // Metallurgical and materials transaction. – 2003. – V.34B. – № 5. – P. 685 – 705.
4. Зиновьев В.Е Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М.:Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Шатов А. Я. Линейная усадка стальных отливок, ее связь с диаграммой состояния Fe-Fe₃C / А.Я. Шатов, Д.А. Бойков, А.А. Ступак // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2007. – № 2. – С. 20 – 26.
6. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки / Д.А. Дюдкин. – К.: Тэхника, 1988. – 253 с.

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 27.02.2009