УДК 669. 012. 033

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ УСАДОЧНОЙ РАКОВИНЫ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ СЛИТКА СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

[1]Ибраев И.К., [2]Ибраева О.Т.

[1]ТОО «Инновационный Евразийский Университет» МОН РК, Павлодар, e-mail: ibraevik@yandex.ru;
[2]РГКП «Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова» МОН РК, Павлодар, e-mail: ibraevaot@yandex.ru

Приведены результаты математического моделирования конфигурации усадочной рыхлости в головной части слитка спокойной стали. Отличительной особенностью разработанной модели является то, что подбор результирующих коэффициентов производился с использованием экспериментальных методов изучения макроструктуры осевых темплетов головной части промышленных слитков, результатов измерения температурных полей при формирования слитка. Разработанная модель учитывает гравитационное и конвективное перемешивание, процессы массопереноса примесей в жидкой сердцевине с учетом ликвационных и физико-химические процессы в двухфазной жидкости. Полученная система уравнений достаточно хорошо описывают конфигурацию усадочной раковины реальных производственных слитков спокойной стали.

Ключевые слова: слиток, усадочная раковина, модель, кристаллизация, ликвация, температурное поле

MODELING THE FORMATION CONFIGURATION SHRINK SINK HEAD PORTION OF THE INGOT QUIET STEEL

[1]Ibraev I.K., [2]Ibraeva O.T.

[1]TOO «Innovative University of Eurasia» MES, Pavlodar, e-mail: ibraevik@yandex.ru;
[2]RGKP «Pavlodar state University. S. Toraigyrov» MES, Pavlodar, e-mail: ibraevaot@yandex.ru

The results of mathematical modeling configuration shrink looseness in the head part of the ingot quiet steel. A distinctive feature of the developed model is that selection of the resulting coefficients were calculated using the experimental methods used to study the microstructure of the axial templates warhead industrial ingots, measurement results of temperature fields during the formation of the ingot. The developed model takes into account the gravitational and convective mixing, mass transfer of impurities in the liquid core with regard to liquation and physico-chemical processes in two-phase fluid. The obtained system of equations is fairly well describe the configuration of shrinkage shell real production of steel ingots.

Keywords: bar, shrinkage, model, crystallization, levacy, temperature field

В последних два десятилетия внимание специалистов, изучающих тепловую сторону кристаллизации стальных слитков, занято созданием расчетных методов, позволяющих предсказать структуру слитка и в частности, конфигурацию усадочной раковины по его исходным параметрам – массе, размерам, температуре заливки металла в изложницу, химическому составу и т.д. В результате подобных исследований появилось большое количество статей, докладов, монографий [1–14]. Авторы подобных работ, решая проблему расчетными методами, часто получают результаты, более чем на порядок отличающиеся от фактических, что, конечно же, далеко от требуемого. По-прежнему, наиболее достоверными остаются экспериментальные результаты, однако задача теоретических направлений исследования с повестки дня не снимается. На наш взгляд несовпадение расчетных методов с экспериментальными по кинетике затвердевания, распределение температурных полей в слитке и т.д. происходит из-за приближенного или достаточно произвольного выбора граничных условий при решении уравнения теплопроводности из-за невозможности учета ряда сложнейших явлении, протекающих в системе слиток – изложница – окружающая среда. Нет никакого сомнения в том, что теоретически проблему кристаллизации слитка необходимо рассматривать с позиции и теплопроводности и массопереноса. При этом недопустимо исключить из рассмотрения следующие вопросы:

1) гравитационное перемещение жидкого металла в сердцевине слитка с учетом изменения его вязкостных характеристик вследствие изменения его состава и температуры;

2) конвективное перемещение металла в жидкой сердцевине по направлению противоположному гравитационному перемещению;

3) процессы массопереноса примесей при кристаллизации и связанные с ними ликвационные явления и изменения физических свойств расплавов;

4) физические и химические процессы, протекающие в двухфазной области и их влияние на процессы теплоотвода от слитка.

Разработанные в настоящее время математические модели учитывают слабо или не

учитывают вообще выше перечисленные процессы, что и является основной причиной получения заведомо неточных результатов.

Наиболее точную информацию о протекающих сложных процессах при формировании стальных слитков дают экспериментальные методы исследования: изучение структуры слитков, измерение температурных полей в затвердевающем слитке и другие. Сочетание экспериментальных и расчетных методов является в настоящее время одним из оптимальных вариантов, позволяющих лучше объяснить наблюдающиеся закономерности кристаллизации стальных слитков.

Цель работы

Разработка математической модели формирования конфигурации усадочной раковине в слитке спокойной стали для прогнозирования уровня головной обрези и выхода годного.

Методика проведения исследований

В данной работе по имеющимся топографиям осевых темплетов 9 слитков спокойной стали строили уравнения кривой, описывающее конфигурацию усадочной раковины в слитке посредством решения системы дифференциальных уравнений. В плоском узком сечении слитка это линия пересечения фронта кристаллизации с одной стороны и уровня опускания жидкого металла в сердцевине слитка вследствие охлаждения и усадки с другой. Значения коэффициентов в итоговом уравнении находили подбором, варьируя значениями теплофизических параметров, отражающих условия теплопередачи от жидкого металла чугунной стенке и различных теплоизоляционных материалов. Признаком адекватности полученной математической модели являлось совпадение экспериментальной и расчетной формы раковины, когда сходимость соответственных значений не превышала + 5 %.

Затем по имеющимся уравнениям конфигурации усадочной раковины решалась обратная задача – определение тепловых потерь от головной части при различных режимах утепления. В качестве базовых вариантов были выбраны два способа утепления зеркала металла головной части асбеститом и отсевами алюминиевой стружки (ОАС) при утеплении внутренних боковых граней изложницы в верхней части теплоизоляционными плитами.

Самым существенным моментом в расчете конфигурации усадочной раковины является знание кинетики затвердевания металла в слитке. Затвердевание металла посредине широких граней бесконечной призмы прямоугольного сечения происходит почти так же, как и в бесконечной плите той же толщины. Затвердевание металла посредине граней призмы квадратного сечения приблизительно соответствует затвердеванию металла под слоем теплоизолирующей смеси и посредине широких граней изложницы и утеплителя в «листовом» слитке приближается к затвердеванию пластины.

Листовым считается слиток, в котором отношение широкой грани к узкой удовлетворяет условию: $A_2 / A_1 \geq 1{,}5$. Для таких слитков затвердевание металла посредине узких граней и дна приближено заменяют затвердеванием цилиндрической отливки радиусом A_1.

Построение математической модели и обсуждение результатов моделирования

Методика расчета конфигурации усадочной раковины предусматривает:

1. Расчет толщины слоя металла, затвердевшего за определенное время посредине одной из граней слитка или головной части (j = 1–6):

$$€_j = A_1 \xi^j = \sum_{\kappa=1}^{5} \mu_K^j F_0^{\kappa/2} \qquad (1)$$

где $F_0 = a_c \tau / x^2$ – безмерное время; μ_K^j – коэффициент, отражающий влияние теплофизическихпараметров материалов стенки, её толщины и формы слитка.

2. Расчет времени затвердевания расплава на любом горизонте H слитка и h головной части:

$$\tau = (A - H)/w + \tau_1 \text{ и } \tau = h_2/w + \tau_1 \qquad (2)$$

где t_1 – время, отсчитываемое с момента окончания наполнения слитка;

w – линейные скорости наполнения изложницы и головной части соответственно.

3. Расчет толщины Y_j затвердевшего слоя металла от соответствующих граней слитка и головной части, измеренной горизонтальной плоскости:

$$Y_j = €_j \sqrt{1 + p_j^2} \qquad (3)$$

где p_j – тангенс угла наклона j – той грани к вертикали (j = 1,2,5,6,).

4. Приближенное сглаживание фронта вблизи границы раздела слиток-головная часть.

Для расчета сглаживания вводят величину d_j и функции Z_1 и Z_2

$$D_j = \frac{1}{2}\,[(a_j - y_{j+1}) - (A_j - Y_j)]\,,\ j = 1{,}2 \qquad (4)$$

где y_{j-} значение на границе изложница – головная часть:

$$Z_1 = \begin{cases} y_5 - eh_1, eh_1 \le y_5 \\ 0, eh_1 > y_5 \end{cases}; \; Z_2 = \begin{cases} y_1 - EH; EH \le y_1 \\ 0, EH > y_1 \end{cases} \quad (5)$$

Операцию сглаживания фронта выполняют по формулам:

$$Y_j = Y_j - d_j(Z_1/Y_1)^2$$

$$Y_{j+4} = Y_{j+4} + (Z_1/Y)^2, j = 1,2 \quad (6)$$

Здесь е и E – вспомогательные эмпирические константы, определяющие степень взаимного влияния условий охлаждения металла в изложнице и утеплителе. Наиболее точное совпадение экспериментальной и расчетной формы раковины для различных слитков и при различных способах утепления получено при е ≈ 0,1 и $E \approx 1$.

5. Учет эффекта скругления углов.

Пусть $2A''_j$ и $2A''_{j+1}$ при j = 1,5 – размеры поперечного сечения слитка или головной части на некотором горизонте. Тогда максимальные размеры поперечного сечения жидкого расплава на том же горизонте в момент времени t будут $2(A''_j - Y_j)$ и $2(A''_j - Y_{j+1})$.

Площадь $S(h)$ ($h = h$ или $h = H$) жидкого металла на соответствующем горизонте

$$S(h) = [C - (c - \text{p})Y_j / A''_j]\,(A''_j - Y_j)\,(A''_{j+1} - Y_{j+1}),\ \text{j} = 1,5 \quad (7)$$

где: константа C задается равной 4 для прямоугольного и 3,14 для j эллиптического (или круглого) сечения.

6. Усадка металла при образовании поверхностной корочки – слоя металла, затвердевшего в изложнице и головной части при их наполнении, полостью компенсируется вновь поступающими порциями расплава. Поэтому при расчете усадочной раковины принимают во внимание только объем жидкого металла в изложнице и головной части (V^0_h и $V^0_{\text{П}}$) к моменту окончания наполнения.

7. Изменение объема расплава в головной части обусловлено как его затвердеванием, так и расходом на компенсацию усадки металла, затвердевшего к данному моменту времени в изложнице и в самом утеплители. Объем металла V_n, затвердевшего за время $t > 0$ в головной части после ее наполнения:

$$V_n = \left[V_h^0 - V_g - \delta(V_h^0 - V_n)\right] / (1 + \delta) \quad (8)$$

8. Вывод уравнения движения зеркала металла в головной части основан на балансе металла в процессе затвердевания слитка. При выводе принимают, что движение расплава в головной части обусловлено уменьшением объема стали при переходе ее из жидкого состояния в твердое и соответствующим потоком жидкости из головной части в тело слитка. При принятых обозначениях скорость опускания мениска жидкого металла в утеплителе составит $[(dh_1)/(d\tau)]$, а объемный расход металла из утеплителя $S(h_1)\,[(dh_1)/(d\tau)]$.

Снижение уровня расплава в утеплителе происходит за счет: питания металла, затвердевшего в изложнице:

$$(dVh)/(d\tau) = \delta\{[d(V_h^0 - V_n)]/d\tau\};$$

компенсации усадки металла, затвердевшего в утеплителе:

$$\delta[(dVh)/d\tau);$$

толщения моста Y_4 на мениске:

$$S(h_1)\{[d\,Y_4(\tau)/(d\tau)\}$$

Итак, расход жидкого металла из головной части при $h_1 > 0$ определяется уравнением:

$$S(h_1) = \frac{dh_1}{dt} = \delta\frac{d}{dt}\left(V_h^0 - V_h + V_n\right) + S(h)\frac{dy_4(\tau)}{dt} \quad (9)$$

а при $h_1 < 0$,т.е. при проникновении усадочной раковины в тело слитка, – уравнением:

$$S(h) = \frac{dH}{dt} = b\frac{d}{dt}\left(V_h^0 - V_h\right) + S(h)\frac{dy_4(\tau)}{dt} \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) представляют собой требования баланса расхода металла и являются ключевыми при расчете конфигурации усадочной раковины. В качестве граничного условия можно принимать либо уровень металла в головной части в начальный момент процесса:

$$h_1\big|_{r=0} = h \quad (11)$$

либо уровень металла в головной части в момент окончания затвердевания слитка:

$$h_1\big|_{\tau=\tau_k} = h_k \quad (12)$$

По физическому смыслу граничное условие (11) соответствует заданному объему металла в головной части, для которого расчетом определяют форму усадочной раковины и положение ее дна. Граничное условие (12) соответствует положению дна усадочной раковины, которая определяется требуемым запасом металла в головной части. В этом случае расчетом определяют

высоту налива металла в головной части, а, следовательно, и ее первоначальный объем, обеспечивающий заданную глубину усадочной раковины.

Объем жидкого металла в изложнице для любого момента времени определяем по формуле:

$$V_p = \int_0^H S(h)dh \qquad (13)$$

объем жидкого металла в головной части:

$$V_p = \int_0^H S(h_1)dh \qquad (14)$$

Решая уравнение (9) относительно $(dh_1)/(d\tau)$, получим изменение во времени уровня жидкого металла в утеплителе h_1 а также положение и количество жидкой фазы к концу затвердевания тела слитка.

Конфигурация самой усадочной раковины в слитке существенно зависит от поведения твердого металла «моста», образующегося при затвердевании стали сверху. В расчете принимают, что корочка затвердевшего сверху металла (мост) пластична. При опускании расплава и сужении площади жидкого металла под мостом материал на краях равномерно «размазывается» по корочке, намерзшей на боковых гранях утеплителя, увеличивая ее толщину.

Пусть r_1 и r – координаты границ видимой усадочной раковины вдоль осей симметрии на уровне $h = h_1 + Y_4 = h_2$. За время dτ уровень металла в головной части опускается на величину dh; на столько же опустится мост затвердевшего сверху металла. Если при этом сечение утеплителя сужается, то в новом положении края моста окажутся избыточными. Произойдет «намазывание» избыточного объема металла на твердую корочку, застывшую от боковых стенок головной части.

Рассчитываем время приращения этого избыточного объема на узкой (j = 1) и широкой (i = 2) сторонах утеплителя:

$$\frac{dv_i}{dt} = -2\frac{dri}{dt} r_{j+1} \cdot y_4; J = 1 \qquad (15)$$

В то же время это приращение избыточного объема может быть определено по толщине намазанного слоя b_j (j = 1,2 по узкой и широкой стороне утеплителя соответственно):

$$\frac{dv_i}{dt} = -2b_1 r_{j+1}\left(-\frac{dh_1}{dt}\right); j = 1$$

$$\frac{dv_i}{dt} = -2b_1 r_{j-1}\left(-\frac{dh_1}{dt}\right); j \le 2 \qquad (16)$$

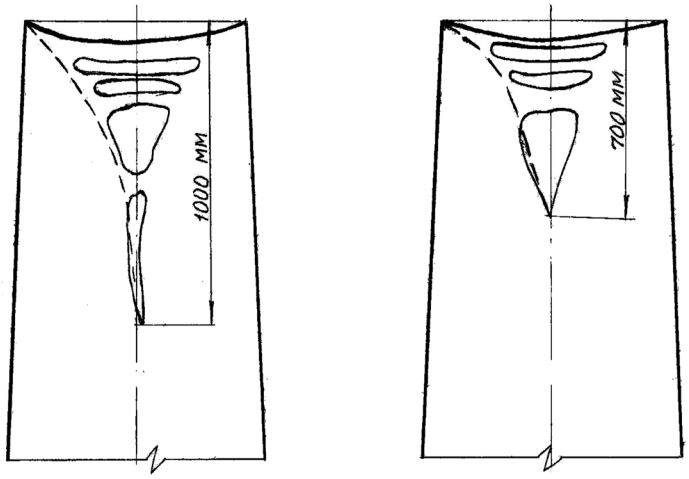
Из уравнений (15) и (16) определяем толщину b с двух сторон слоя: $b_j = y_4[(dr_j)/(dh)]$ j = 1,2. Обозначим $(dr_j)/(dh) = D''_j$

$$D_j = D_j = \begin{cases} D''_j \text{ при } D''_j > 0 \\ 0 \text{ при } D''_j < 0 \end{cases}$$

Тогда координаты видимой усадочной раковины можно рассчитать по формуле:

$$r_{j+2} = r_j + y_4(D''_j) \qquad (17)$$

Если при опускания мениска размеры его не уменьшаются ($D''_j \le 0$,) то размазывание моста происходить не будет ($r_{j+2} = r$).



а) *б)*

Сопоставление расчетной (------) и фактических данных (——) по форме усадочной раковине слитков, утепленных асбеститом (а) и отсевами алюминиевой стружки (б)

Таким образом, наряды с координатами зеркала расплава, опускающегося по мере затвердевания слитка, получаем координаты видимой усадочной раковины.

Расчет кинетики затвердевания слитков с различным режимом утепления головной части осуществляли по программе, составленной по уравнениям (1–17). Результаты расчета конфигурации усадочной раковины сопоставляли с конфигурацией реальных усадочных раковин слитков, отлитых в изложницы 16Н и 21Н, показаны на рисунке. Оба слитка отлиты в уширенные книзу изложницы с теплоизоляционными плитами, утепленными соответственно асбеститом и отсевами алюминиевой стружки (ОАС).

Размеры изложницы16Н принимались 1177х764 мм, 21Н-1574х764 мм, высота налива металла в обеих изложницах 2400 мм. Температура металла по окончании наполнения изложницы для всех вариантов принималась 1525 °С. Толщина теплоизоляционных плит – 40 мм, глубина погружения в металл 400 мм, толщина слоя наружного утеплителя 100, конусность изложницы 2 %.

Подбор коэффициентов в результирующем уравнении прекращался, когда различие в расчетных и фактических значениях по горизонтальной координате не превышал 5 %. Обращает на себя внимание, что касательная к продвижению фронта кристаллизации на начальном этапе затвердевания наклонена к горизонтали (вершинами) под углом 45°. Это свидетельствует о примерном равенстве скоростей кристаллизации от стенки изложницы и от теплоизоляционной засыпки. Действительно, после образования газового зазора между изложницей и слитком теплоотвод от слитка резко сокращается и становится примерно равным потерям через зеркало металла и теплоизоляционную засыпку.

Список литературы

1. Колосов М.И., Строганов А.И., Смирнов Ю.Д., Охримович В.П. Качество слитка спокойной стали. – М.: Металлургия. – 1978. – 408 с.

2. Ефимов В.А., Осипов В.П., Гребенюк В.П. Пути усовершенствования разливки стали. М.: Металлургиздат. – 1963. – 184 с.

3. Бакуменко С.П., Гуляев Б.Б., Верховец Э.В. Снижение отходов стального слитка. – М.: Металлургия.

4. Скобло С.Я., Казачков Е.А., Кирюшкин Ю.И., Молотков В.А. В кн. «Разливка стали и формирование слитка». – М.: Металлургия. – 1966. – С. 112–129.

5. Коновалов В.С., Птичник В.Д. Разливка стали в слитки и их качество. – М.: Металлургия. – 1978. – С. 14–18.

6. Дюдкин Д.А., Крупман Л.И., Максименко Д.М. Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках. М.: Металлургия. – 1983. – 136 с.

7. А.Я.Шнееров, Р.П.Коновалов, В.Ф.Поляков и др. Разливка стали в слитки и их качество. – М.: «Металлургия», 1979, №8,с.12-17.

8. Микульчик А.В. Разливка стали и формирование слитка. – М.: Металлургия. –1966. – № 1. – С. 130–143.

9. Винокуров Г.В., Гальперин Г.С., Михайлец С.Н. Совершенствование процессов разливки стали. – М.: Металлургия. – 1981. – С. 81–82.

10. Дудко Д.А., Крутиков Р.Г., Прохоренко К.К. Комплексное улучшение качества стальных слитков. – Киев: Техника. – 1968. – 180 с.

11. Крупман Л.И., Максименко Д.М, Житник Г.Г. и др. Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия. – 1976. – С. 307–309.

12. Шнееров Я.А., Коновалов Р.П., Поляков В.Ф.и др. Разливка стали в слитки и их качество. – М.: Металлургия. – 1981. – № 9. – С. 16–26.

13. Бакуменко В.Я., Новицкий В.К., Амельянчик А.В., Назаратин В.В. Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия. – 1976. – № 6. – С. 74–75.

14. Винокуров Г.В., Гальперин Г.С., Михайлец С.Н., Толстогузов Н.В. Разливка стали в слитки и их качество. – М.: Металлургия. – С. 57–60.