

УДК 621.74.046

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИТЬЯ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ НА НАКЛОННОЙ МАШИНЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

© 2013 В.В. Аникеев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 27.11.2013

Разработана математическая модель затвердевания стальных слитков большого сечения при полунепрерывном литье на наклонной машине полунепрерывного литья заготовок. Результаты расчёта сопоставлены с экспериментальными данными. Приведены данные по качеству слитков.

Ключевые слова: *полунепрерывное литье, наклонная машина, сталь, слиток, моделирование, качество*

Применение полунепрерывнолитых стальных слитков большого сечения (до 1000 мм) в качестве расходимых электродов для электрошлакового переплава (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП) и заготовок для кузнечнопрессового производства позволяет механизировать процесс литья, повысить культуру производства и улучшить экологию процесса разлива. Наиболее перспективными для литья стальных слитков большого сечения являются наклонные машины полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ). Они, сохраняя все преимущества традиционно применяемых вертикальных, легко располагаются в цехах, имеют меньшие размеры по высоте и меньшую массу оборудования, что уменьшает капитальные затраты на их строительство. Ферростатическое давление на корку слитка намного меньше, чем на вертикальной МПНЛЗ, что позволяет повысить скорость литья без ухудшения точности размеров слитка. На наклонной МПНЛЗ уменьшаются усилия вытягивания, так как в перемещении слитка частично участвует сила тяжести. Наклонное расположение машины повышает удобство её ремонта и обслуживания; создаёт более безопасные условия труда.

В Краматорском НИИПТмаш спроектирована и изготовлена наклонная МПНЛЗ для литья кузнечных слитков восьмигранного сечения [1-3]. Наклонная МПНЛЗ является одноручевой машиной, её технологическая ось наклонена под углом 30° к горизонту. Основными составными частями являются кристаллизатор, затравка и

устройство для вытягивания слитка. Механизм качания кристаллизатора отсутствует. Охлаждение слитка на воздухе. При проектировании машины решалась задача исследования теплофизических процессов, происходящих в формируемом слитке в машине с наклонной технологической осью. Основными этапами математического моделирования процесса литья на наклонной машине являлись:

- разработка на основе дифференциального уравнения теплопроводности и соответствующих граничных условий математической модели затвердевания слитка;
- построение на основе модели расчётной схемы и алгоритма;
- разработка программ, численно реализующих данный алгоритм;
- проверка адекватности модели путём анализа результатов численного моделирования и сопоставления их с имеющимися данными.

В основе математической модели применено дифференциальное уравнение теплопроводности, решаемое в трёхмерной цилиндрической системе координат при соответствующих граничных и начальных условиях. При разработке расчётной схемы применялся метод конечных разностей, реализованный на неравномерной пространственно-временной сетке. При моделировании процесса разлива на наклонной машине были сделаны следующие основные предпосылки:

- теплофизические свойства материалов системы описываются известными температурными зависимостями, значения которых берутся из таблиц для каждого материала;
- распределение температуры в начальный момент времени известно (в частном случае

Аникеев Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии». E-mail: tlp@samgtu.ru

может рассматриваться однородное температурное поле);

- на границе взаимодействия с окружающей средой задаются граничные условия третьего рода;

- по оси слитка используется условие ограниченности решения задачи;

- величина среднего теплового потока за промежуток времени через ограничивающую поверхность пропорциональна её площади и градиенту температуры на этой поверхности;

- выделение скрытой теплоты кристаллизации в интервале затвердевания учитывается введением эффективной теплоёмкости;

- конвективный перенос тепла в жидкой фазе металла учитывается эффективным значением коэффициента теплопроводности.

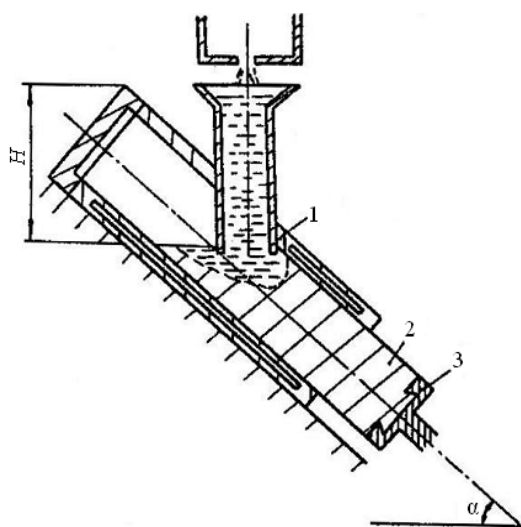


Рис. 1. Расчётная схема наклонной машины полунепрерывного литья: 1 – кристаллизатор, 2 – слиток, 3 – затравка

Разрабатываемая модель позволит расчётным путём определить распределение температур и градиентов внутри слитка, определить местоположение изотерм ликвидуса и солидуса на текущий момент времени и скорость их передвижения, толщину затвердевшей корки, время затвердевания слитка и на основе этих характеристик определить рациональные режимы технологии для различных марок стали и размеров слитка.

Рассматривается теплофизическая система, включающая в себя слиток, кристаллизатор и затравку, которая взаимодействует с окружающей средой (рис. 1). Слиток имеет в поперечном сечении форму круга. Технологическая ось слитка наклонена к горизонту под углом $\alpha=30^\circ$. Уровень заливки от верхней кромки кристаллизатора задаётся расстоянием H . При вытягивании слитка этот уровень остаётся постоянным, т.е. скорость разливки должна соответствовать скорости вытягивания слитка. Процессы теплопередачи протекают в слитке в двух зонах: в кристаллизаторе и зоне охлаждения на воздухе. В нижней части кристаллизатора возможно появление неравномерного по высоте слитка и по его периметру газового зазора и соответствующее замедление процесса теплопередачи от слитка к кристаллизатору.

В зоне воздушного охлаждения интенсивность теплопередачи определяется соответствующими коэффициентами теплоотдачи. По мере вытягивания слитка из расчёта исключали кристаллизатор; полное затвердевание слитка и его дальнейшее охлаждение проходило на воздухе. Процессы теплопередачи в системе описываются дифференциальным уравнением теплопроводности [4-6]. Уравнение теплопроводности в трёхмерной цилиндрической системе координат Орфу запишется в виде [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(cT) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$0 \leq t < t_k; \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq y < l(t); \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

где $c = c(T)$ – теплоёмкость, ккал/м³·ч; T – температура, °С; $\lambda = \lambda(T)$ – теплопроводность, ккал/м·ч·град; t – время, ч; R – радиус слитка, м; l – длина слитка, м, на момент времени t .

На поверхностях раздела с окружающей средой задаются граничные условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_3(\varphi, y) [T(R, \varphi, y) - T_3^c],$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_1(r, \varphi) [T(R, \varphi, 0) - T_1^c]$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = \alpha_2(r, \varphi) \{T[r, \varphi, l(t)] - T_2^c\}, \quad (2)$$

где T_1^c , T_2^c , T_3^c – температуры окружающей среды; α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты теплоотдачи на соответствующих поверхностях.

Тепловое сопротивление при наличии зазора на границе слиток-кристаллизатор определяется по формуле

$$\lambda_3 = \lambda + \alpha_3 \delta_3, \quad (3)$$

где λ_3 – теплопроводность материала зазора при температуре, равной средней температуре слитка и кристаллизатора; α_3 – коэффициент теплопередачи излучением; δ_3 – ширина зазора, мм.

Дополнительное граничное условие ограниченности решения на оси симметрии при $r = 0$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Учёт влияния конвективного переноса тепла в жидкой фазе осуществляется с помощью эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$, рассчитываемого по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \varepsilon_i \lambda_i, \quad (5)$$

где $\varepsilon_i = 0,0623\sqrt{A_i}$, при $A_i \leq 10^7$; $\varepsilon_i = 0,224\sqrt{A_i}$, при $A_i > 10^7$; $A_i = B l_i (T_i - T_1)$, $B = \rho \beta_{\text{ж}} / a \mu$; $l_i = (r_i + r_{li}) / \cos \alpha$, ε_i – коэффициент конвекции для i -го слоя жидкого металла; ρ – плотность жидкого металла, кг/м³; $\beta_{\text{ж}}$ – коэффициент объёмной усадки, 1/град; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/м·с; r_i – радиус i -ой расчётной точки; r_{li} – радиус фронта затвердевания; α – угол наклона технологической оси к горизонтальной поверхности.

Реализация модели (1)-(5) осуществлялась методом конечных разностей, для чего на основе разностного представления уравнений была составлена неявная схема [8] с использованием способа расщепления и прогонки по трем независимым направлениям. В связи с этим уравнение (1) представлено в виде

$$\begin{aligned} C_{Vi} \frac{T'_i - T_i^M}{\tau} &= \frac{1}{r_i h_i} \left[\frac{r_{i+1/2} \lambda_{i+1/2}}{h_{i+1}} (T'_{i+1} - T_i) - \frac{r_{i-1/2} \lambda_{i-1/2}}{h_i} (T_i - T_{i-1}) \right], \\ C_{Vj} \frac{T''_j - T_j}{\tau} &= \frac{1}{r_j h_j} \left[\frac{\lambda_{j+1/2}}{h_{j+1}} (T''_{j+1} - T_j) - \frac{\lambda_{j-1/2}}{h_j} (T''_j - T''_{j-1}) \right], \\ C_{Vk} \frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\tau} &= \frac{1}{h_k} \left[\frac{\lambda_{k+1/2}}{h_{k+1}} (T_k^{n+1} - T_k^n) - \frac{\lambda_{k-1/2}}{h_k} (T_k^{n+1} - T_k^n) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $h = 0,5(h_{i+1} + h_i)$; $r_{i-1/2} = r_i - 0,5h_i$; $r_{i+1/2} = r_i + 0,5h_i$; $\lambda_{i+1/2} = 0,5(\lambda_i + \lambda_{i+1})$; $\lambda_{i-1/2} = 2\lambda_i \lambda_{i+1} / (\lambda_i + \lambda_{i+1})$; h_i, h_j, h_k – шаг сетки вдоль осей r, φ, y ; $T_{i,j,k}^n$ – температура в точке (i, j, k) на начало временного шага; $T_{i,j,k}^{n+1}$ – температура на конец временного шага; r – расстояние вдоль радиуса от оси слитка до расчётной точки (M); C_{Vi}, λ_i – соответственно объёмная теплопроводность λ и теплоёмкость в i -ой расчётной точке; $\alpha_{i+1/2}$ – значение теплопроводности в точках между узлами сетки.

Аналогично преобразовывались и зависимости (2-5). Таким образом, задача была сведена к последовательному решению уравнений вида (6), а температуры поверхностей отыскивались итерационным методом, исходя из условия сохранения теплового баланса с использованием $\lambda_{\text{эф}}$ при расчёте температурного поля в незатвердевшей части слитка. В частном случае при $\alpha = 90^\circ$ описанная модель использована для расчёта вертикального слитка диаметром 500 мм, длиной 2200 мм, разливаемого в медный

кристаллизатор длиной 860 мм. Высота заполнения кристаллизатора 700 мм, скорость вытягивания слитка 0,10 м/мин. Коэффициент теплоотдачи в зоне кристаллизатора принимали равным 350 ккал/м²·с·град. Вывод изотерм осуществлялся через каждые 5 мин до окончания затвердевания. Начальная температура 1570 °С, материал слитка – сталь 45, $T_{\text{л}} = 1485^\circ\text{C}$, $T_{\text{с}} = 1400^\circ\text{C}$, $T_{\text{в}} = 1451^\circ\text{C}$. Типичные графики продвижения изотерм представлены на рис. 2. Время полного затвердевания слитка 56,08 мин. Средняя толщина затвердевшей корки на выходе из кристаллизатора 13,9 мм. Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными по [8], показало их полную идентичность и подтвердило адекватность разработанной модели.

На наклонной МПНЛЗ отливали кузнечные слитки восьмигранного сечения, эквивалентного по площади кругу диаметром 500 мм, массой 2,8-3,2 т стали 45, 40Х, 5ХНМ [9-11]. Основные технологические параметры литья приведены в табл. 1. Внешний вид, макроструктура, серный отпечаток по Бауману слитков с наклонной МПНЛЗ приведены на рис. 3. Результаты

исследований показывают, что геометрические параметры поперечного сечения отлитых слитков, независимо от разливаемой марки стали постоянны; изгиб слитков отсутствует. Масса головной обрезки в сравнении со слитками с вертикальной МПНЛЗ уменьшается в среднем на 25%.

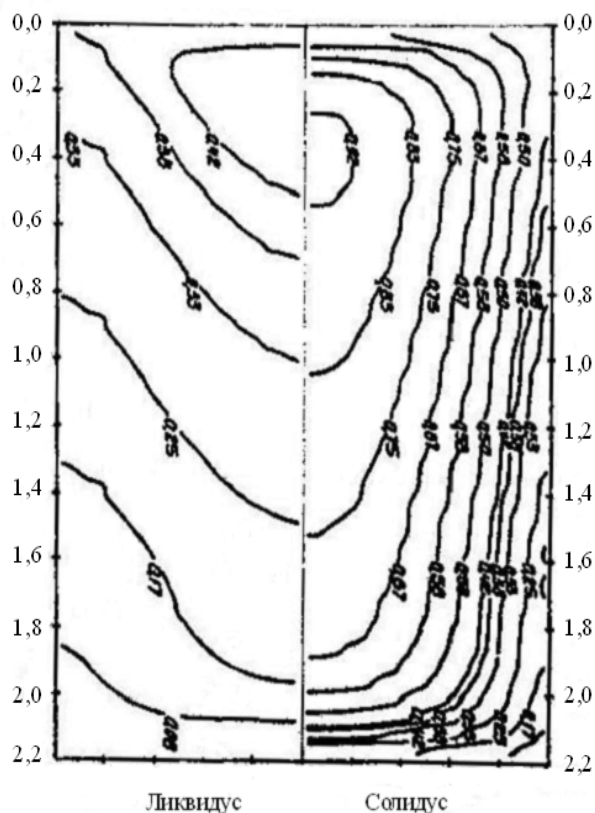


Рис. 2. Графики продвижения изотерм ликвидуса и солидуса при затвердевании слитка диаметром 500 мм, длиной 2,2 м из стали 45

Поверхность слитков, в основном, без видимых дефектов: заворотов, плен и шлаковых включений. На некоторых слитках по нижним граням донной части наблюдались отдельные заливны глубиной до 5 мм из-за разбрызгивания металла в начальный период заполнения кристаллизатора. Заливны удаляются при нагреве слитков под ковку, поэтому дополнительной их обработки перед ковкой (зачистки, вырубки по дефектам) не требуется. Макро-

структура слитков достаточно плотная, лишь на отдельных темплетах по нижним граням донной части слитков наблюдаются локально расположенные поры диаметром 2-4 мм. Смещение осевой зоны от верхней грани слитка составляет 210-215 мм, от нижней грани – 225-230 мм. Ликвация серы на серных отпечатках по Бауману не выявляется. Химический состав по высоте и сечению слитков по основным элементам однороден. Плотность металла по высоте и сечению слитков находится в пределах 7,80-7,90 г/см³. Содержание неметаллических (оксиды, сульфиды, преобладающий размер 10-20 мкм) и газовых включений (кислород, азот) находится на одном уровне в сравнении со слитками того же сечения, отлитыми на вертикальной МПНЛЗ.

Слитки ковали на гидравлическом прессе усилием 7,8 МН; нагрев металла под ковку и его охлаждение послековки осуществляли по режимам, принятым при производстве поковок из слитков, отлитых в изложницы. Были откованы валы диаметром 300 мм (уков 2,8). Ковка слитков проходила без замечаний. От слитков при их ковке отбирали поперечные темплеты для изучения макроструктуры и ликвационной неоднородности по серным отпечаткам: с донной стороны слитка, с 1/3 части поковки со стороны донной части, с 1/3 части поковки со стороны головной части и от головной части. Результаты исследований показывают, что макроструктура всех поковок плотная и отвечает требованиям ГОСТ 8479-70 «Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия». Дефекты, свидетельствующие о недостаточной проковке металла, отсутствовали. Ликвационная неоднородность (по серным отпечаткам) имеет вид точек, равномерно расположенных по сечению поковки. Макроструктура кованого металла из слитков с наклонной МПНЛЗ принципиально не отличается от структуры кованого металла из слитков с вертикальной МПНЛЗ и отлитых в изложницы. Слитки с наклонной МПНЛЗ полностью пригодны для производства поковок, удовлетворяющих по качеству ГОСТ 8479-70.

Таблица 1. Технологические параметры литья слитков на наклонной МПНЛЗ

Марка стали	Параметры литья				
	температура металла перед разливкой, °С	время заполнения кристаллизатора, мин	скорость вытягивания слитка, м/мин	время выдержки слитка, мин	охлаждение кристаллизатора, м ³ /час
45	1600	4,0	0,13	60	180
40Х	1610	5,0	0,12	60	180
5ХНМ	1600	5,0	0,11	60	180

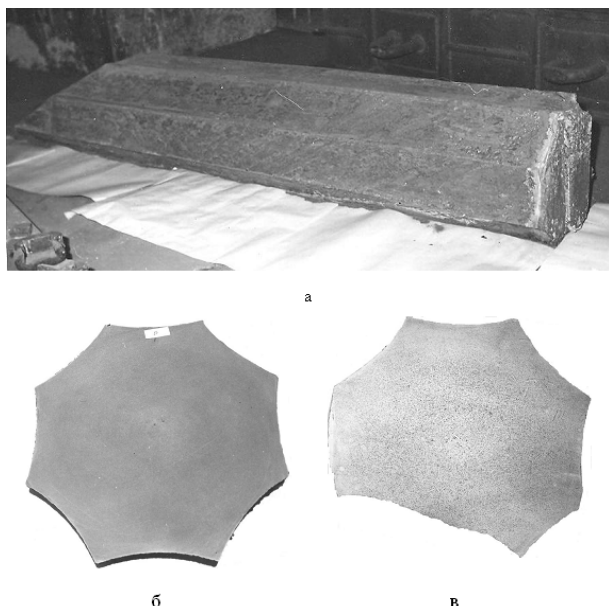


Рис. 3. Внешний вид слитка с наклонной МПНЛЗ (а), макроструктура поперечного сечения (б) и серный отпечаток по Бауману (в) из стали 45

Выводы: разработана математическая модель затвердевания стальных слитков большого сечения на наклонной МПНЛЗ. Проведенные расчёты продвижения изотерм ликвидуса и солидуса показали идентичность разработанной модели с результатами экспериментальных данных. Приведены технологические параметры литья слитков на наклонной МПНЛЗ. Представлены результаты исследований качества слитков и поковок из них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. А.с. № 1324750 СССР, В 22 D 11/00. Способ непрерывного литья заготовок в сквозной наклонно-прямолинейный кристаллизатор / Ю.В. Будников, И.К. Марченко, М.Я. Бровман, В.В. Аникеев. № 3998253/22-02; заявл. 30.12.85; опубл. 23.07.87, Бюл. №27.
2. А.с. № 1214314 СССР, В 22 D 11/04. Кристаллизатор горизонтальных и наклонных машин непрерывного и полунепрерывного литья заготовок / В.В. Аникеев, И.К. Марченко, В.В. Суворов и др. № 3755866/22-02; заявл. 16.04.84; опубл. 28.02.86, Бюл. №8.
3. Бровман, М.Я. Непрерывная разливка металлов. – М.: «ЭКОМЕТ», 2007. 484 с.
4. Борисов, В.Т. Современное состояние квазиравновесной теории двухфазной зоны и её применение к затвердеванию сплавов / В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, И.Л. Тяжельникова // Оптимизация тепловых процессов литья. – Киев: Институт проблем литья, 1977. С.39-59.
5. Самарский, А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. 350 с.
6. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. 312 с.
7. Кравченко, В.И. Математическая модель полунепрерывного литья стальных слитков на наклонной машине и её реализация на ЕС ЭВМ / В.И. Кравченко, А.А. Марчук, В.В. Аникеев, Н.А. Цвященко // Тематич. сборник науч. трудов «Компьютерная технология проектирования в тяжелом машиностроении». – Краматорск: НПО НИИПТмаш, 1990. С. 30-36.
8. Расчёт затвердевания круглого полунепрерывного слитка / И.К. Марченко, Н.В. Гуменный, Т.А. Рохлина и др. // Программа № 176/ПОО3923, ОФАП НИИПТмаш, 1979.
9. Марченко, И.К. Отливка на наклонной МПНЛЗ восьмигранных слитков большого сечения / И.К. Марченко, В.В. Аникеев, Ю.В. Будников и др. // Сталь. 1992. №1. С. 31-32.
10. Марченко, И.К. Особенности литья кузнечных слитков на МПНЛ / И.К. Марченко, В.В. Аникеев, Ю.В. Будников и др. // Тяжёлое машиностроение. 1992. №1. С. 29-30.
11. Аникеев, В.В. Особенности литья стальных слитков на наклонной МПНЛЗ // Сталь. 2013. №6. С. 18-23.

MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HEAVE-GAUGE STEEL INGOTS CASTING ON SLANTING MACHINE OF BILLETS SEMICONTINUOUS CASTING

© 2013 V.V. Anikeev

Samara State Technical University

The mathematical model of hardening the heave-gage steel ingots at semicontinuous casting on slanting machine of billets semicontinuous casting is developed. Results of calculation are compared with the experimental data. Data on quality of ingots are provided.

Key words: semicontinuous casting, slanting machine, steel, ingot, modeling, quality

Vladimir Anikeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Casting and High Effective Technologies". E-mail: tlp@samgtu.ru