

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РУЧЬЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ МНЛЗ

Макшанцев В. Г., Макшанцев Е. В.

Разработана математическая модель формирования непрерывнолитой слябовой заготовки, основанная на основных положениях теории тепломассобмена в многофазных средах, которая позволяет рассчитать параметры зоны мягкого обжатия и определить рациональное место приложения усилия деформирования к слитку. Для описания процессов теплопереноса внутри заготовки и расчета поля температуры используется уравнение, отражающее энергетический баланс в системе. Гидродинамические процессы в жидкой фазе, приводящие к конвективному теплообмену в жидкой лунке заготовки, учитываются неявно путем введения соответствующих поправок к коэффициенту теплопроводности в этой области. Еще одним преимуществом модели является учет зависимости температур ликвидус и солидус от химического состава сплава.

Розроблена математична модель формування непрерывнолітої слябової заготовки, заснована на основних положеннях теорії тепломасобміну в багатофазних середовищах, яка дозволяє розрахувати параметри зони м'якого обтиснення і визначити раціональне місце прикладення зусилля деформування до злитка. Для опису процесів теплоперенесення усередині заготовки і розрахунку поля температури використовується рівняння, що відображає енергетичний баланс у системі. Гідродинамічні процеси в рідкій фазі, що приводять до конвективного теплообміну в рідкій лунці заготовки, враховуються неявно шляхом введення відповідних поправок до коефіцієнту теплопровідності в цій області. Ще однією перевагою моделі є облік залежності температур ліквідус і солідус від хімічного складу сплаву.

The mathematical model of forming form cast steel slab is developed, based on the main the theory about heat transfer in multiphase media, which allows to calculate the parameters of soft reduction zone and determine the place of the rational application force to the soft reduction ingot. To describe the processes of transferring the heat into a ingot blank and to calculate the field of temperature equalization, reflecting power balance in the system, is used. Hydrodynamic processes in a liquid phase, resulting in a convective heat transfer in the liquid small hole of ingot blank, taken into account unobvious by introduction the proper amendments to the heat coefficient conductivity in this area. Another advantage of model is an temperature dependence liquids and solidus from chemical alloy composition.

Макшанцев В. Г.

канд. техн. наук, доц. каф. АПП ДГМА

vladmakshan@mail.ru

Макшанцев Е. В.

студент ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.746.047:669.14

Макшанцев В. Г., Макшанцев Е. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РУЧЬЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ МНЛЗ

Важнейшей проблемой, стоящей перед отечественной металлургией, является повышение эффективности производства и улучшение качества выпускаемой металлопродукции. В области непрерывной разливки стали это, прежде всего, создание современных конкурентоспособных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), расширение типоразмерного и марочного сортамента непрерывнолитой заготовки, по форме и профилю близкой к конечной продукции и обеспечение гарантированного качества металла при наименьших затратах по модернизации.

Современные методы математического моделирования позволяют с достаточной для практических целей точностью решить задачу определения динамики затвердевания слитка, включающую определение температурного поля, глубины залегания жидкой фазы и длины и положения зоны мягкого обжатия [1-8]. В этих работах представлены математические модели кристаллизации непрерывного слитка как результат одновременного протекания тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. При этом для упрощённого решения задачи затвердевания металлических сплавов используют теорию квазиравновесной двухфазной зоны для бинарного сплава. Также описано влияние таких факторов на зону затвердевания как: теплофизические параметры, высота кристаллизатора МНЛЗ, скорость вытягивания слитка, форма сечения заготовки, влияние химического состава разливаемой стали.

В двухфазной зоне, в которой сталь находится в жидко-твёрдом состоянии, в конце процесса кристаллизации образуются «мосты» из столбчатых или равновесных кристаллов, которые затрудняют поступление жидкого металла к расплаву, заключенному между ними. Это ведет к образованию пор и ликвационных дефектов при усадке расплава, лишенного «подпитки». Степень развития усадочных и ликвационных дефектов зависит от химического состава стали, температуры ее перегрева, кинетики затвердевания и т.п. Эти дефекты обнаруживаются на серных отпечатках продольных темплетов промышленных слябов в виде шнуровой ликвации с развитой усадочной пористостью [2].

Очевидно, что осевая ликвация может быть уменьшена, если усадка, вызванная изменением плотности твердой и жидкой фаз, будет при затвердевании компенсироваться сжатием непрерывнолитого слитка. Неуклонное повышение требований к качеству непрерывнолитой заготовки в осевой зоне стимулировало в последнее десятилетие развитие принципов регулирования конусности ручья путем мягкого обжатия (рис. 1) непрерывнолитой заготовки в конце затвердевания с целью подавления осевой пористости и ликвации.

Для исследования процесса мягкого обжатия разрабатываются математические модели, в которых учитываются влияние таких факторов на зону затвердевания как: теплофизические параметры, высота кристаллизатора МНЛЗ, скорость вытягивания слитка, форма сечения заготовки, влияние химического состава разливаемой стали [6–8].

Однако для эффективного управления процессом мягкого обжатия необходимо учитывать дополнительные значимые факторы: усадка стали по всей длине слитка, конвективный теплоперенос в жидкой и твёрдожидкой фазах и прогнозирование границ области мягкого обжатия.

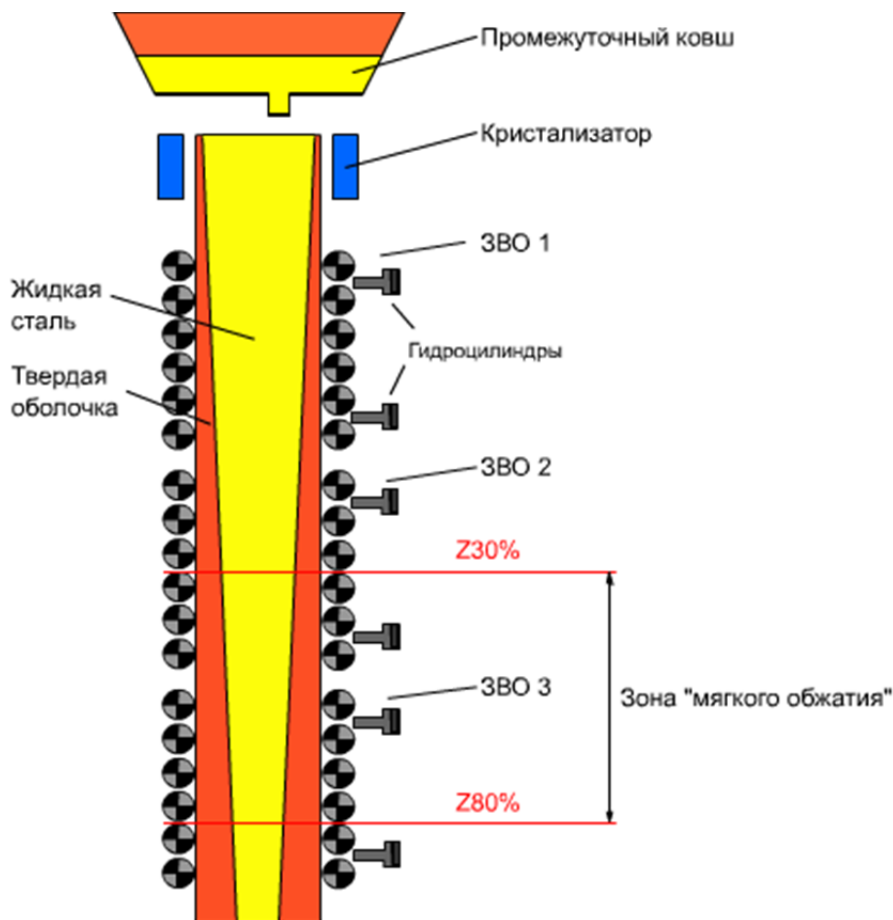


Рис. 1. Задача мягкого обжатия

Целью работы является повышение качества сляба путем разработки усовершенствованной математической модели для управления процессом мягкого обжатия. При этом для упрощения расчетов использованы следующие допущения:

- предполагается, что в начальном сечении (мениск металла в кристаллизаторе) температура распределена равномерно и тепловые потери отсутствуют;
- осцилляции кристаллизатора не учитываются;
- не учитываются неравновесные эффекты при образовании твердой фазы.

Для описания процессов теплопереноса внутри заготовки и расчета поля температуры используется уравнение, отражающее энергетический баланс в системе:

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

где T – температура, К;

τ – время, с;

x, y, z – пространственные координаты, м (рис. 1);

V_x, V_y, V_z – компоненты скорости, м/с (отличны от нуля только в области жидкой фазы);

ρ – плотность стали, кг/м³;

C – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·К);

λ – теплопроводность стали, Дж/(м·К·с);

L – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг;

f_s – доля твердой фазы.

Как показано в ряде исследований [3,5], для широких слябов можно не учитывать перенос тепла в направлении OY (рис.2) поскольку большая часть тепла отводится от широких граней.

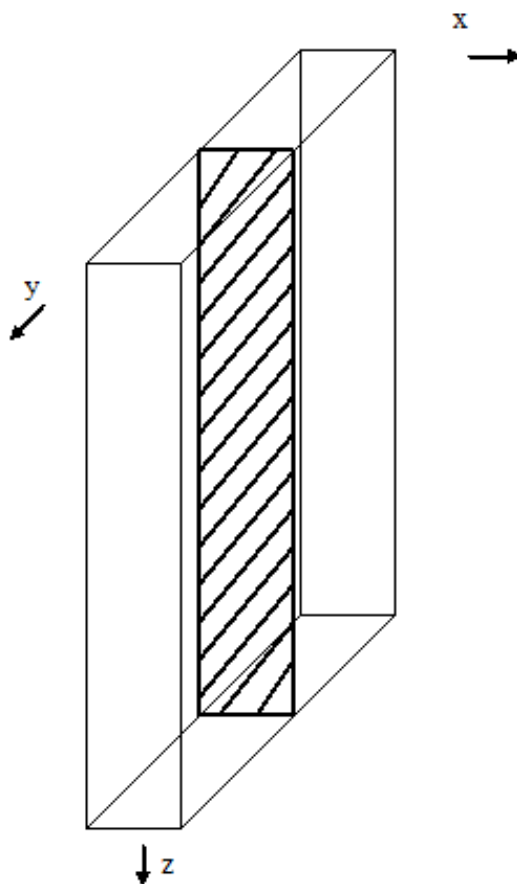


Рис. 2. Расчетная схема заготовки

Тогда уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_c \frac{\partial T}{\partial z} = a_{эфф} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где V_c – скорость вытягивания заготовки, м/с;

$a_{эфф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности (3):

$$a_{эфф} = \frac{\lambda}{\rho \left(C + L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right)}. \quad (3)$$

Уравнение (2) справедливо при допущении, что распространение тепла в направлении аксиальной координаты z происходит главным образом за счет движения заготовки со скоростью V_c .

Что касается гидродинамических процессов в жидкой фазе, приводящих к конвективному теплообмену в жидкой лунке заготовки, они учитываются неявно путем введения соответствующих поправок к коэффициенту теплопроводности λ в этой области. Кроме того, в расчетах учитывается зависимость теплофизических параметров заготовки от температуры. В соответствующих модулях программы они определяются по эмпирическим зависимостям:

$$\rho(x, y, z) = f_1(T), \quad \lambda(x, y, z) = f_2(T), \quad C(x, y, z) = f_3(T). \quad (4)$$

Еще одним преимуществом модели является учет зависимости температур ликвидус и солидус от химического состава используемого сплава.

$$T_L = 1536 - \left(78[C] + 4.9[Mn] + 3.1[Ni] + 34.4[P] + 4.7[Cu] + 7.6[Si] + 2[Mo] + 38[S] + 1.3[Cr] + 18[Ti] + 2[V] + 3.6[Al] \right), \quad (5)$$

где T_L – температура ликвидус.

$$T_S = 1536 - (200[C] + 6[Mn] + 3.9[Ni] + 93[P] + 16[Si] + 1100[S] + 1.7[Cr]), \quad (6)$$

где T_S – температура солидус.

При известном поле температур выполняется расчет доли твердой фазы в каждой точке заготовки по модели квазиравновесной двухфазной зоны:

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{-1/(1-k)}, \quad (7)$$

где k – равновесный коэффициент распределения примеси;

T_0 – температура расплава в сечении мениска;

T_L – температура-ликвидус.

Таким образом, модель теплофизических процессов дает возможность получить информацию о динамике затвердевания заготовки – координаты границ твердой и жидкой фаз в любой момент времени. Эти данные используются для прогнозирования оптимальных режимов обжатия заготовки при изменении ее ширины в процессе затвердевания (рис. 3).

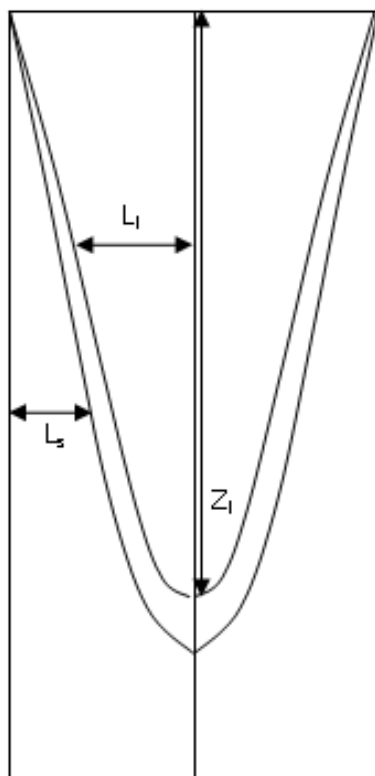


Рис.3. Параметры динамики затвердевания:

L_l – ширина жидкой лунки; L_s – ширина твердой корочки; Z_l – глубина жидкой лунки

При этом полное сокращение толщины заготовки определяется как сумма соответствующих изменений в двух направлениях::

$$B_{cost} = B_s + B_f, \quad (8)$$

где B_s – усадка в направлении роста корки,

B_f – усадка по ширине грани заготовки.

Для расчета значений V_s и V_f используются коэффициент линейного расширения и усадочный коэффициент, которые являются функциями температуры.

Для аппроксимации температурной зависимости коэффициентов область изменения температуры разбивается на пять интервалов, границы которых задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} T_1 &= 1200^\circ\text{C}; \\ T_2 &= \begin{cases} 1405^\circ\text{C}, ce < 0.09; \\ 1425^\circ\text{C}, ce \geq 0.09; \end{cases} \\ T_3 &= \begin{cases} 1440^\circ\text{C}, ce < 0.09; \\ 1475^\circ\text{C}, ce \geq 0.09; \end{cases} \\ T_4 &= \begin{cases} 1460^\circ\text{C}, ce < 0.09; \\ 1480^\circ\text{C}, ce \geq 0.09, \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

где ce – углеродный эквивалент:

$$\begin{aligned} ce &= [C] + 0.02[Mn] + 0.023[Ni] + 0.414[P] + 0.03[Cu] + 0.7[N] - \\ &- 0.037[Si] - 0.0189[Mo] - 0.7[S] - 0.0254[Cr] - 0.0276[Ti], \end{aligned} \quad (10)$$

где символы в квадратных скобках – содержание соответствующих элементов сплава в процентах.

Значения коэффициентов линейного расширения γ , $1/^\circ\text{C}$ рассчитывается отдельно для каждого температурного интервала:

$$T < T_1: \quad \gamma_1 = 2.25E - 5; \quad (11a)$$

$$T_1 \leq T < T_2: \quad \gamma_2 = 2.3E - 5; \quad (11б)$$

$$T_2 \leq T < T_3: \quad \gamma_3 = \begin{cases} 2E - 5, ce < 0.03; \\ 4E - 5, 0.03 \leq ce < 0.09; \\ 7E - 5, 0.09 \leq ce < 0.15; \\ 3E - 5, 0.15 \leq ce < 0.2; \\ 2.3E - 5, ce \geq 0.2; \end{cases} \quad (11в)$$

$$T_3 \leq T < T_4: \quad \gamma_4 = \begin{cases} 2E - 5, ce < 0.03; \\ 6.5E - 5, 0.03 \leq ce < 0.09; \\ 7E - 5, 0.09 \leq ce < 0.15; \\ 5E - 5, 0.15 \leq ce < 0.2; \\ 2.3E - 5, ce \geq 0.2; \end{cases} \quad (11г)$$

$$T > T_4: \quad \gamma_5 = \begin{cases} 2E - 5, ce < 0.03; \\ 2E - 5, 0.03 \leq ce < 0.09; \\ 7E - 5, 0.09 \leq ce < 0.15; \\ 5E - 5, 0.15 \leq ce < 0.2; \\ 2.3E - 5, ce \geq 0.2; \end{cases} \quad (11д)$$

Аналогично, как функция температуры рассчитываются усадочные коэффициенты φ . Затем можно рассчитать значения усадки для корки:

$$B_S = 2(T_S - T_{cp}) \sum_{i=1}^S \gamma_i \varphi_i, \quad (12)$$

и для грани:

$$B_f = \frac{L_x}{L_S} (T_S - T_{cp}) \sum_{i=1}^S \gamma_i \varphi_i. \quad (13)$$

В формулах (12) и (13) используется осредненная температура поверхности:

$$T_{cp} = \frac{T_S + T_f}{2}, \quad (14)$$

где T_S – температура-солидус используемой стали,

T_f – температура поверхности для рассматриваемой координаты.

По описанному алгоритму составляется программа для расчётов на ЭВМ. Приведенный математический метод позволяет отказаться от упрощённой трактовки математической модели процесса затвердевания непрерывного слитка и получить высокую точность решения.

ВЫВОДЫ

Предложенная математическая модель кристаллизации слитка учитывает такие значимые факторы как усадка стали по всей длине слитка, теплоперенос в жидкой и твёрдожидкой фазах и прогнозирование границ области мягкого обжатия. Модель позволяет с высокой точностью определить параметры зоны мягкого обжатия такие как: положение и длина зоны, учитывая химический состав используемого сляба. В результате улучшается качество центральной части сляба.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман М.Я. *Непрерывная разливка металлов* / М. Я. Бровман. – М.: «ЭКОМЕТ», 2007. – 484 с.
2. Самойлович Ю. А. Влияние мягкого обжатия на степень осевой химической неоднородности при производстве непрерывнолитых заготовок / Ю. А. Самойлович, В. К. Тимошпольский // *Литье и металлургия*. – Белорусский национальный технический университет, 2008. – Выпуск 3(47). – С. 99–105.
3. Журавлёв В. А. *Теплофизика формирования непрерывного слитка* / В. А. Журавлёв, Е. М. Китаев. – М.: Металлургия, 1974. – 215 с.
4. Борисов В.Т. *Теория двухфазной зоны металлического слитка* / В. Т. Борисов. – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
5. Малевич Ю. А. *Теплофизические основы затвердевания отливок и слитков* / Ю. А. Малевич, Ю. А. Самойлович. – Минск: Высшая школа, 1989. – 200 с.
6. *Математическая модель и расчет параметров мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок* / Л. В. Буланов, Н. А. Юровский, Т. Г. Химич, М. В. Масаев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 8. – С. 124–130.
7. Юровский Н. А. *Расчетный анализ влияния параметров непрерывной разливки на порообразование слитка* / Н. А. Юровский, Л. В. Буланов // *Сталь*. – 2005. – № 9. – С. 14–16.
8. *Математическое моделирование процесса мягкого обжатия слябов при непрерывной разливке трубной стали* / В. В. Мошкунев, А. М. Столяров, А. С. Казаков, Л. В. Буланов, Ю. А. Юровский, Д. Д. Черемисин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета*. – 2013. – №2. – С. 69–72.