УДК 004.9:519.711.3:621.777

О.В. Субботин (канд. техн. наук, доц.), С.П. Сус (канд. техн. наук, доц.)
Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
кафедра автоматизации производственных процессов
E-mail: o.v.subotin@ukr.net, susstepan52@gmail.com

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

Разработана уточненная математическая модель затвердевания слитка, численное решение которой позволяет получить поле температур в поперечном сечении слитка, даёт возможность точнее рассчитать параметры мягкого обжата. Разработана компьютерная программа, с помощью которой рассчитывают технологические параметры мягкого обжата и проводят исследование температурного поля непрерывнолитого слитка по всей его длине. Полученная компьютерная модель для управления процессом мягкого обжата непрерывнолитого слитка позволяет с достаточной точностью получать такие параметры, как положение и длину зоны мягкого обжата, необходимые для определения начала работы секций мягкого обжата. Модель может использоваться для анализа тепловых режимов МНЛЗ при переменной скорости вытягивания слитка, что имеет практическое значение, например, для случаев пуска машины и набора скорости разливки, переходе с плавки на плавку, временного снижения скорости разливки, аварийной остановки.
Ключевые слова: МНЛЗ, тепловой режим, непрерывнолитой слиток, температурное поле, мягкое обжатие, компьютерная модель, программа, параметры

DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-37-49

Общая постановка проблемы. Важным этапом научно-технического прогресса в черной металлургии стало внедрение метода непрерывной разливки стали. Внедрение машин непрерывного литья заготовок дало возможность прежде всего резко уменьшить отходы металла и увеличить выпуск продукции. Преимуществами непрерывной разливки стали по сравнению с разливкой в изложницы являются: снижение удельных энерго- и трудозатрат, улучшение условий труда, значительное уменьшение отходов за счет уменьшения количества обрезки. В последние десятилетия достигнуты высокие показатели в работе слабовых МНЛЗ. К таким показателям относятся производительность МНЛЗ, максимальная толщина и ширина слэба, широкое применение автоматических систем управления и др. [1].

Установлено, что металл непрерывной разливки более однороден по сечению и высоте заготовки, чем слиток, отлитый традиционным способом (в изложницы). Отмечаются повышенные прочностные и пластические свойства, сопротивляемость усталости, увеличенная на 10...18% ударная вязкость. Это обусловлено меньшим поперечным сечением и интенсивным охлаждением заготовки [2].

Однако повышение интенсивности процесса, скорости разливки, увеличение сечения отливаемых заготовок ставит новые задачи, повышаются требования к качеству выпускаемой продукции [3].

Склонность элементов к развитию дендритной неоднородности характеризуется эффективным коэффициентом распределения в жидкой и твердой фазах, а конечная неоднородность определяется полнотой прохождения диффузионных процессов, которая в свою очередь зависит от скорости кристаллизации металла.

Промежуточная фаза между твердым и жидким веществом, называется двухфазной зоной, поскольку в этой зоне вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии. В этой зоне 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. Осевая ликвация может быть уменьшена, если усадка, вызванная изменением плотности твердой и жидкой фаз, будет при затвердевании компенсироваться сжатием непрерывнолитого слитка [2,4].

Суть метода мягкого обжатия состоит в том, что непрерывнолитой слиток в конце затвердевания проходит через зону мягкого обжатия, настроенную на конус. При этом конец жидкой лунки сдавливается и этим компенсируется усадка при затвердевании. Основными положительными эффектами данного метода являются значительное подавление осевой пористости, снижение коэффициента осевой ликвации, уменьшение V - образной ликвации.

Задача реализации метода мягкого обжатия непрерывнолитой заготовки заключается в определении места приложения усилия обжатия, закона приложения обжатия в один или несколько этапов и способа приложения усилия обжатия к поверхности заготовки.

Для определения зоны мягкого обжатия необходимо составить математическую модель затвердевания непрерывнолитого слитка. Метод математического моделирования позволит с достаточной точностью определить температурное поле слитка, глубину жидкой лунки, а также получить необходимые для применения мягкого обжатия положение и характеристики двухфазной зоны.

Математические модели затвердевания слитка, основанные на решении задачи Стефана, делятся на: стефановскую, квазиравновесную и неравновесную.

Модификация и анализ решения задачи Стефана приводятся почти во всех монографиях, посвященных изучению затвердевания слитка, где рассматривается решение уравнения теплопроводности в декартовых, цилиндрических и криволинейных координатах. Она описывает затвердевание полуограниченного массива, предполагая отсутствие двухфазной зоны, гладкий фронт кристаллизации, отсутствие перегрева над температурой кристаллизации и наличие граничных условий теплообмена первого рода [5].

Имеется математическая модель, которая рассматривает кристаллизацию непрерывного слитка как результат одновременного протекания тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. Эта модель представляет большой интерес с точки зрения исследования условий получения бездефектного литого металла, но практическая реализация такой модели является сложной задачей [6].

В рамках теории квазиравновесной двухфазной зоны разработана математическая модель, где в сечении слитка в ходе затвердевания выделяют три зоны: зону полностью затвердевшего сплава, двухфазную зону и зону перегретого жидкого расплава [7].

Исследованы вопросы увеличения скорости разливки и сохранения качества непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевинкой за счет снижения термических напряжений по сечению твердой корочки, что уменьшает вероятность возникновения поверхностных трещин [8].

Существуют компьютерные системы для анализа и визуализации процесса литья, например, PolyCast, LVMFlow, ProCAST, MAGMASoft, FLOW3D, FlowVision и др. Все они являются инструментом для исследования литья в форму и не могут адекватно применяться для моделирования непрерывного литья. Поэтому системы, которые применяются для моделирования процессов непрерывного литья, необходимо адаптировать для конкретного процесса [9].

Постановка задачи исследования. Целью данной работы является разработка усовершенствованной компьютерной модели затвердевания слитка для определения точных параметров мягкого обжатия.

Результаты разработок и исследований. Для описания процесса затвердевания слитка за основу принимается дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности [4,10]. С учётом выделения теплоты кристаллизации с помощью функции источника тепла, а также при условии неподвижной среды и при постоянных физических свойствах для непрерывнолитого слитка получим:

$$\rho \cdot C \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_V, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; C – теплоёмкость металла, Дж/(кг·К); T – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); q_V – плотность внутренних источников тепла; x, y – пространственные координаты, находящиеся в плоскости поперечного сечения слитка; z – пространственная координата, совпадающая с технологической осью МНЛЗ; V – скорость вытягивания слитка, м/с.

В данной модели вводится величина относительного количества твёрдой фазы ψ ; $\psi=0$ для жидкой фазы, $\psi=1$ для полностью затвердевшего слитка, для двухфазной зоны ψ изменяется от нуля до единицы.

$$\psi = \begin{cases} \psi(T) & \text{при } x_H \leq x \leq x_K, \\ 0 & \text{при } x < x_H; \end{cases} \quad (2)$$

где x_H, x_K – координаты начала и конца двухфазной зоны соответственно.

Выразив значения λ_Σ и ρ_Σ с учётом соотношения фаз, можно окончательно записать дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho_\Sigma(T) \cdot C_\Sigma(T) \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_\Sigma(T) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_\Sigma(T) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где $C_\Sigma(T)$ – коэффициент эффективной теплоёмкости сплава, $\lambda_\Sigma(T)$ – коэффициент эффективной теплопроводности, $\rho_\Sigma(T)$ – коэффициент эффективной плотности.

Уравнение (3) справедливо при допущении, что распространение тепла в направлении аксиальной координаты z происходит главным образом за счет движения заготовки со скоростью V . 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: $\rho(x,y,z)=f_1(T)$, $\lambda(x,y,z)=f_2(T)$, $C(x,y,z)=f_3(T)$.

Для получения температурного поля продольного сечения непрерывнолитого слитка удобнее всего задать граничные условия третьего рода, характеризующие процесс теплообмена между поверхностью слитка и кристаллизатором через коэффициент теплопередачи.

Решение данной задачи точными и приближёнными аналитическими методами не представляется возможным ввиду её сложности. Поэтому для определения температурного поля непрерывнолитого слитка необходимо использовать численные методы. Для решения поставленной задачи оптимальным методом является метод конечных разностей (метод сеток). Для решения полученного дифференциального уравнения (3) использована явная разностная схема.

Для моделирования температурного поля продольного сечения формирующегося непрерывного слитка в целях исследования динамики его затвердевания в кристаллизаторе составляется программа в среде C++. Данные, полученные в программе, записываются в файлы типа *txt*. Для визуализации процесса использован программный продукт MatLab.

Полученные распределения температур и доли твердой фазы (ДТФ) двухфазной зоны в продольном сечении непрерывного слитка относительно исходных данных показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 – Распределения температур и доли твердой фазы двухфазной зоны в продольном сечении непрерывного слитка

Для исследования динамики затвердевания широких слабов с соотношением сторон более 4 принято использовать одномерную задачу нестационарной теплопроводности и составлять программу расчета температурного поля лишь для продольного сечения, поскольку большая часть тепла отводится от широких граней. Такое упрощение хоть и ускоряет процесс моделирования, но уменьшает точность вычислений и значительно сокращает область применения программы, так как не учитывает перенос тепла в направлении узких граней.

Для устранения отмеченного недостатка была разработана программа вычисления температурного поля всего слитка, с использованием двумерной задачи нестационарной теплопроводности. Это также дает возможность использовать эту программу для определения температурных полей блюмов.

Разработанная усовершенствованная компьютерная модель для управления процессом мягкого обжатия непрерывнолитого слитка позволяет с достаточной точностью получать параметры зоны мягкого обжатия – положение и длину зоны мягкого обжатия, необходимые для определения начала работы секций мягкого обжатия.

Моделирование процесса кристаллизации производилось с среде программирования Borland Delphi.

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма расчёта температурного поля слитка, в которой реализован алгоритм численного решения уравнения нестационарной теплопроводности.

Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчёта температурного поля слитка

Расчёт температурного поля слитка осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Ввод начальных значений параметров слитка: геометрические параметры слитка; температура перегрева; значения, описывающие химический состав стали; скорость разливки, число разбиений по толщине слитка;

2. Расчёт величин дискретизации по осям x , z и dx , dz соответственно, удовлетворяющих условию Фурье – критерию устойчивости явной схемы расчёта;

3. Расчёт числа разбиений по оси z используя вводимое значение длины сляба и расчётное значение дискретизации dz ;
4. Задание начальных условий – распределение температуры на мениске сляба в кристаллизаторе равной температуре (перегрева) металла поступающего из промковша;
5. Расчёт граничных условий с учётом коэффициента теплоотдачи и положения слитка в соответствующей зоне охлаждения;
6. Расчёт значений температур во всех узлах сетки, нахождение температурного поля слитка по всей длине;
7. Построение графиков по процессу кристаллизации слитка: распределение температур на технологической оси и на поверхности слитка; доли твёрдой фазы; динамики формирования твёрдой корки по длине всего сляба; проницаемости двухфазной зоны;
8. По полученным данным о доли твёрдой фазы определение положения и длины зоны мягкого обжата, соответствующей 30...70% ДТФ (подпрограмма «Мягкое обжатие»).

Для моделирования процесса кристаллизации использовались исходные данные, сведенные в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчётов по модели

Наименование параметра	Обозначение	Величина	Единица измерения
Толщина сляба	L_x	250	мм
Длина сляба	L_z	15440	мм
Число точек по толщине	N	41	шт
Температура перегрева	T_p	1520	°C
Температура ликвидус	T_l	1500	°C
Температура солидус	T_c	1475	°C
Теплопроводность (ж/тв)	λ	150/40	Вт/м·К
Теплоёмкость (ж/тв)	C	700/500	Дж/кг·К
Плотность (ж/тв)	ρ	7000/7800	кг/м ³
Уд. теплота кристаллизации	Q	272000	Дж/кг
Скорость разливки	v	0.01167	м/с
Температура охлаждающей воды	T_v	30	°C
Количество испаряющейся воды	χ	8	%
Количество зон охлаждения	z	6	шт

Помимо исходных данных, приведенных в таблице 1, также задаются коэффициенты теплоотдачи для каждой зоны охлаждения. Для исследования влияния каждого параметра на процесс кристаллизации и параметры зоны мягкого обжата, желательно задавать их вручную и независимо один от другого.

Так как для расчёта температурного поля слитка требуется определение температур ликвидус и солидус, то важным фактором становится учёт химического состава разливаемого металла, который оказывает сильное влияние, воздействуя на кристаллическую структуру разливаемого металла. С учётом этого фактора в программе предусмотрена возможность исследования процесса кристаллизации как основных разливаемых марок стали (Сталь 3, 14ГС, 9ХФ, Трансформаторная сталь), так и сталей с другим химическим составом.

Так как химический состав влияет на температуры ликвидус и солидус, поэтому в программе предусмотрена возможность расчёта значений этих температур в зависимости от содержания в сталях таких примесей как C , Si , Mn , Cr , Ni , Cu , Al , P , S .

Значение температур ликвидус и солидус в программе рассчитывались по следующим эмпирическим зависимостям, которые с достаточной точностью можно использовать для практических целей и для инженерных расчётов:

$$T_{\text{л}} = 1536 - (78 \cdot C + 7,6 \cdot Si + 4,9 \cdot Mn + 1,3 \cdot Cr + 3,1 \cdot Ni + 4,7 \cdot Cu + 3,6 \cdot Al + 34,4 \cdot P + 38 \cdot S); \quad (4)$$

$$T_{\text{с}} = 1536 - (200 \cdot C + 16 \cdot Si + 6 \cdot Mn + 1,7 \cdot Cr + 3,9 \cdot Ni + 93 \cdot P + 1100 \cdot S); \quad (5)$$

где $C, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, Al, P, S$ – процентное соотношение соответствующих элементов в стали.

После расчёта температурного поля слитка выполняется определение параметров необходимых для мягкого обжата. Реализация расчёта данных параметров осуществляется в подпрограмме «Мягкое обжатие», которая входит в основной алгоритм программы. Блок схема алгоритма подпрограммы «Мягкое обжатие» показана на рисунке 3.

Рисунок 3 – Блок схема алгоритма подпрограммы «Мягкое обжатие»

Алгоритм работы подпрограммы «Мягкое обжатие» заключается в следующем:

1. Получение из основной программы необходимых начальных данных: температура ликвидус, температура солидус, распределение температуры по всей расчётной области, количество разбиений по длине и толщине слитка, величину дискретизации по длине слитка;
2. Расчёт по всему сечению слитка доли твёрдой фазы;
3. По рассчитанным значениям ДТФ строится график роста ДТФ по длине слитка;
4. Определение параметров зоны мягкого обжата: положения и длины зоны;
5. Выдача рекомендаций на активацию секции мягкого обжата.

Разработанная программа позволяет выводить всю расчётную область в представлении

либо распределения температур в сечении слитка, либо распределения доли твёрдой фазы в сечении слитка.

Распределение температур показано тремя цветами. Жёлтым цветом показана область слитка, в которой температура больше либо равна температуре ликвидуса, этим цветом показана полностью жидкая фаза. Красным цветом показана область слитка, температура которой соответствует ликвидус/солидус, этим цветом показана твёрдожидкая фаза (двухфазная зона). Оранжевым цветом показана область слитка, температура которой меньше либо равна температуре солидуса, этим цветом показана полностью закристаллизовавшаяся часть слитка.

Распределение доли твёрдой фазы в сечении слитка также показано при помощи трёх цветов. Светло-синий цвет свидетельствует о том, что ДТФ в данной области меньше 30%, данным цветом показана область слитка в котором мягкое обжатие неэффективно. Синий цвет – ДТФ в данной области находится в диапазоне от 30% до 70% включительно, что соответствует рекомендуемым величинам для мягкого обжатия, данным цветом показана собственно сама область мягкого обжатия. Тёмно-синий цвет – ДТФ в данной области больше 70%, данным цветом показана область слитка в котором мягкое обжатие нежелательно, так как его применение может привести к поверхностным дефектам.

Сечения распределения температур и доли твёрдой фазы для произвольных значений исходных данных показаны на рисунке 4.

Рисунок 4 – Сечения распределения температур и доли твёрдой фазы

На рисунке 5 представлены графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжатия от различных температур перегрева (1520°C, 1540°C, 1560°C) для скорости вытягивания слитка 0,7 м/мин и толщины слитка 250 мм.

На рисунке 6 представлены графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжатия от скорости разливки (0,5 м/мин, 0,6 м/мин, 0,7 м/мин) для температуры перегрева 1520°C и толщины слитка 250 мм.

На рисунке 7 представлены графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжатия от толщины слитка (200 мм, 250 мм, 300 мм) для температуры перегрева 1520°C и скорости вытягивания слитка 0,7 м/мин.

На рисунке 8 представлены графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжатия от температуры ликвидус (1510°C, 1520°C, 1530°C) для температуры перегрева 1540°C и скорости вытягивания слитка 0,7 м/мин.

Рисунок 5 – Графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжата от температур перегрева

Рисунок 6 – Графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжата от скорости разливки

Рисунок 7 – Графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжата от толщины слитка

Рисунок 8 – Графики зависимости ДТФ и положения зоны мягкого обжата от температуры ликвидус

Анализ полученных графиков показал, что параметры зоны мягкого обжата во многом зависят от скорости разливки, толщины разливаемого слитка, температуры ликвидус сплава. При этом температура перегрева влияет на параметры зоны мягкого обжата не в большей степени, чем другие параметры.

Влияние остальных факторов (условий охлаждения, марки стали, количества испаряющейся воды) на параметры зоны мягкого обжата можно исследовать, изменяя их значения непосредственно в соответствующих полях программы и сравнивать результаты моделирования.

Результаты моделирования можно проверить путём сравнения данных выдаваемых математической моделью и данных полученных экспериментальным путём при всех одинаковых параметрах непосредственно на исследуемом объекте. Так как возможности получения данных экспериментальным путём нет, то адекватность модели проверялась из физических соображений протекания процесса кристаллизации, путём сравнения данных приведенных в литературных источниках и результатов моделирования.

Основой для любых расчётов и определения дополнительных параметров в математической модели является температурное распределение по толщине и длине слитка, поэтому результаты моделирования сравнивались с данными других исследований [2,4,9]:

1. При всех прочих равных условиях температура на выходе из кристаллизатора должна быть в пределах 1100...1210°C, а при моделировании температура на выходе из кристаллизатора (на расстоянии 0,8 м от мениска) равна 1100°C;
2. Толщина слитка на выходе из кристаллизатора вертикальной МНЛЗ должна быть не менее 20 мм, а в модели – 28 мм;
3. Температура поверхности слитка на выходе из зоны вторичного охлаждения должна быть не ниже 900°C, а в модели – 1000°C.

Результаты сравнения подтвердили адекватность полученной математической модели.

Выводы.

С точки зрения физического смысла протекания процесса кристаллизации, можно сделать вывод, что разработанная компьютерная модель для управления процессом мягкого обжата непрерывнолитого слитка адекватно реагирует на изменение всех параметров, например, границы участка мягкого обжата зависят от химического состава разливаемой стали, скорости литья и температуры перегрева жидкого металла, а длина участка мягкого обжата в большей степени определяется химическим составом и практически не зависит от температуры перегрева жидкого металла.

Разработана компьютерная программа на языке C++ с помощью которой можно рассчитать технологические параметры мягкого обжата и провести исследование температурного поля непрерывнолитого слитка по всей его длине.

Кроме приведенного использования данной математической модели, метод компьютерного моделирования может использоваться для расчётно-теоретического анализа тепловых режимов МНЛЗ при переменной скорости вытягивания слитка, что имеет практическое значение для случаев пуска машины и набора скорости разливки, переходе с плавки на плавку, временного снижения скорости разливки, аварийной остановки и других.

Полученные в результате моделирования данные были положены в основу при разработке практических рекомендаций, а также корректировке режимов работы секции роликов мягкого обжата на вертикально-слябовой МНЛЗ.

Перечень использованной литературы

1. Долматова, О.Л. Анализ возможностей повышения производительности одноручевой слябовой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком металлургия стали / О.Л. Долматова, А.М. Столяров // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова «Теория и технология металлургического производства». – Магнитогорск: МГТУ, 2016. - №2 (19). – С.18-22.
2. «Прокатное производство», 2020. Использование процесса «мягкого» обжата при производстве непрерывнолитых слябов, блюмов и заготовок. [online] metallurgist.pro. Доступно: «<https://metallurgist.pro/ispolzovanie-protssessa-myagkogo-obzhatiya-pri-proizvodstve-nepreryvnolityh-slyabov-blyumov-i-zagotovok/>» [Дата звернення 08.04.2020].
3. Басак, И.О. Влияние режима мягкого обжата на макроструктуру непрерывнолитых слябов разной толщины / И.О. Басак, А.М. Столяров, В.В. Мошкунов, А.С. Казаков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова «Теория и технология металлургического производства». – Магнитогорск: МГТУ, 2015. - №1 (16). – С.44-47.
4. Макшанцев, В.Г. Математическая модель регулирования параметров ручья при формировании непрерывнолитой стальной заготовки на вертикальной МНЛЗ / В.Г. Макшанцев, Е.В. Макшанцев // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2016. - № 2(20Е). – С.4-10.
5. Скляр, В.А. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие / В.А. Скляр. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
6. Мошкунов, В.В. Математическое моделирование процесса мягкого обжата слябов при непрерывной разливке трубной стали / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров, А.С. Казаков и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова «Теория и технология металлургического производства». – Магнитогорск: МГТУ, 2013. - №2. – С.69–72.
7. Буланов, Л.В. Математическая модель и расчет параметров мягкого обжата непрерывнолитых заготовок / Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Т.Г. Химич и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2003. – №8. – С.124–130.
8. Полещук, В.М. Определение термических напряжений в непрерывнолитом слитке с жидкой сердцевинной / В.М. Полещук, В.Л. Бровкин, Т.О. Витер // Науковий журнал «Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні». – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – №1. – С. 67-69.
9. Жиганов, Н.К. Компьютерная система моделирования технологии вертикального непрерывного литья заготовок из цветных металлов / Н.К. Жиганов, Е.Е. Фомина, И.Н. Вольнов // Международный научно-практический журнал «Программные продукты и системы». – Тверь: «Центрпрограммсистем», 2013. – № 4. – С.260-263.
10. Макшанцев, В.Г. Модель автоматизированной системы управления процессом мягкого обжата машины непрерывного литья заготовок // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – №1(43). – С.28 – 32.

References

1. Dolmatova, O.L. and Stolyarov, A.M. (2016), "Analysis of the possibilities of increasing the productivity of a single-strand slab caster of a curvilinear type with a vertical section of steel metallurgy", *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova «Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva»*, vol.2 (19), pp.18-22.
2. Rolling production (2020). "Using the "soft" compression process in the production of continuously cast slabs, blooms and billets", available at: <https://metallurgist.pro/ispolzovanie-protssessa-myagkogo-obzhatiya-pri-proizvodstve-nepreryvnolityh-slyabov-blyumov-i-zagotovok/> ([Accessed 08 April 2020]).
3. Basak, I.O., Stolyarov, A.M., Moshkunov, V.V. and Kazakov, A.S. (2015), "The effect of soft reduction on the macrostructure of continuously cast slabs of different thicknesses", *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova «Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva»*, vol.1 (16), pp.44-47.
4. Makshantsev, V.G. and Makshantsev, E.V. (2016), "A mathematical model for controlling the parameters of a stream during the formation of a continuously cast steel billet on a vertical continuous casting machine", *Nauchnyy vestnik DGMA*, vol.2 (20E), pp.4-10.
5. Sklyar V.A. (2014), *Innovatsionnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii v metallurgii. Uchebnoye posobiye* [Innovative and resource-saving technologies in metallurgy. Tutorial], DonNTU, Donetsk, Ukraine.
6. Moshkunov, V.V., Stolyarov, A.M. and Cossacks, A.S. (2013), "Mathematical modeling of the process of soft reduction of slabs during continuous casting of pipe steel", *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova «Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva»*, vol.2, pp.69-72.
7. Bulanov, L.V., Yurovsky, N.A. and Khimich, T.G. (2003), "The mathematical model and calculation of the parameters of the soft reduction of continuously cast billets", *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, vol.8, pp.124-130.
8. Poleschuk, V.M., Brovkin, V.L. and Viter, T.O. (2017), "Determination of thermal stresses in a continuously cast ingot with a liquid core", *Naukoviy zhurnal «Novi materialy i tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni»*, vol.1, pp.67-69.
9. Zhiganov, N.K., Fomina, E.E. and Volnov, I.N. (2013), "Computer system for modeling technology of continuous vertical casting of non-ferrous metal blanks", *Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal «Programmnyye produkty i sistemy»*, vol.4, pp.260-263.
10. Makshantsev, V.G. (2018), "A model of an automated control system for the soft crimping process of a continuous casting machine", *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi*, vol.1 (43), pp.28-32.

О.В. Суботін, С.П. Сус

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

Розробка вдосконаленої комп'ютерної моделі для управління процесом м'якого обтиснення безперервнолитого злитку.

Розроблено уточнену математичну модель затвердіння злитка, чисельне рішення якої дозволяє отримати поле температур в поперечному перерізі злитка, а отже дає можливість більш точно розрахувати параметри м'якого обтиску. Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої можна розрахувати технологічні параметри м'якого обтиску і провести дослідження температурного поля безперервнолитого злитка по всій його довжині. Отримана вдосконалена комп'ютерна модель для управління процесом м'якого обтиску безперервнолитого злитка дозволяє з достатньою точністю отримувати такі параметри, як положення і довжину зони м'якого обтиску, необхідні для визначення початку роботи секцій м'якого обтиску. Модель може використовуватися для аналізу теплових режимів МБЛЗ при змінній швидкості витягування злитка, що має практичне значення, наприклад, для випадків пуску машини і набору швидкості розливання, перехід з

плавки на плавку, тимчасового зниження швидкості розливання, аварійної зупинки.

Ключові слова: МБЛЗ, тепловий режим, безперервнолитий злиток, температурне поле, м'яке обтиснення, комп'ютерна модель, програма, параметри

O.V. Subotin, S.P. Sus

Donbass State Engineering Academy

Development of an improved computer model for controlling the process of soft compression of a continuously cast ingot.

A refined mathematical model of the solidification of the ingot was developed, the numerical solution of which allows one to obtain the temperature field in the cross section of the ingot, and therefore makes it possible to more accurately calculate the parameters of soft compression. A computer program has been developed with the help of which it is possible to calculate the technological parameters of soft reduction and to study the temperature field of a continuously cast ingot along its entire length. The resulting improved computer model for controlling the process of soft reduction of a continuously cast ingot allows one to obtain with sufficient accuracy parameters such as the position and length of the zone of soft reduction necessary to determine the start of operation of the sections of soft reduction. An analysis of the crystallization process showed that the developed computer model for controlling the process of soft compression of a continuously cast ingot adequately responds to changes in all parameters, for example, the boundaries of the section of soft compression depend on the chemical composition of the cast steel, the casting speed and the temperature of the superheat of the molten metal, and the length of the section of soft compression to a greater extent is determined by the chemical composition and practically does not depend on the superheat temperature of the liquid metal. The model can be used to analyze the thermal conditions of the continuous casting machine at a variable speed of drawing the ingot, which is of practical importance, for example, for cases of starting up the machine and setting the casting speed, switching from smelting to smelting, temporarily reducing the casting speed, and an emergency stop.

Keywords: continuous casting machine, thermal regime, continuously cast ingot, temperature field, soft reduction, computer model, program, parameters

Суботін Олег Володимирович, Україна, закінчив Донбаську державну машинобудівну академію, к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка та дослідження систем автоматизованого керування технологічними процесами в металургії та машинобудуванні, розробка інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів.

Сус Степан Павлович, Україна, закінчив Вінницький політехнічний інститут, к.т.н, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка та дослідження інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів виробничих процесів, дослідження безконтактних методів контролю технологічних параметрів у важкодоступних зонах.