

Ключові слова

водень, метал, фазові перетворення, аномальна спонтанна деформація, квазірідкий стан

Summary

Shapovalov V.

Solid-state casting, or the Story of discovery. Report 2

The short historical information about discovery of so-called anomalous spontaneous deformation phenomena is given. New experimental and theoretical data about the phenomena are presented. The state and perspectives of scientific investigation and commercial application of the phenomena are analyzed.

Keywords

hydrogen, metal, phase transformation, anomalous spontaneous deformation, quasi-liquid state

Поступила 21.06.11

УДК 519.711.3:517.958:681.3:669

В. А. Белый*, **В. Л. Найдек**, **С. Ю. Волков***, **Р. Я. Якобше**, **А. В. Мисочка***, **А. В. Ноговицын**,
А. А. Кучаев, **В. В. Белый***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Компания «Agbor engineering Ltd», Харьков

Роль компьютерного моделирования в оптимизации технологических процессов непрерывной разливки стали.

Сообщение 2**

Рассмотрены этапы разработки блочного интерфейса программы для расчета теплового поля непрерывнолитой заготовки и методика проведения исследований с целью оптимизации режимов и конструктивных параметров технологического оборудования при литье круглых и квадратных заготовок на МНЛЗ. Разработана математическая модель, описывающая процесс затвердевания прямоугольной заготовки с округленными углами. С помощью модели обнаружены особенности динамики изменения температурного поля внутри заготовки.

Ключевые слова: математическая модель, имитационная модель, МНЛЗ, оптимизация параметров, стальная заготовка, температурное поле

В работе [1] дано краткое описание математической модели, разработанной для расчета теплового состояния непрерывнолитой заготовки. В настоящей работе при разработке интерфейса программы исходили из того, что главным является обеспечение полной функциональности программы при максимальном комфорте. Для решения данной задачи необходимо: конкретизировать перечень и диапазоны варьируемых параметров; выбрать соответствующие элементы

управления Windows-интерфейса; заложить подпрограмму проверки корректности введенных данных.

Интерфейс блока № 1 (кристаллизатор)

Сведения о выбранных элементах интерфейса приведены в табл. 1.

В верхней части окна расположены вкладки, позволяющие получить доступ к элементам управления технологическими параметрами разливки и системе охлаждения кристаллизатора. В нижней части окна

** Сообщение 1 опубликовано в журнале «Металл и литье Украины» № 11, 2011 г.

Интерфейсные элементы управления в области кристаллизатора

Технологические параметры	Элементы управления	Диапазоны параметров
Марка стали	комбинированный список	перечень типов стали
Размер слитка	комбинированный список	80-160 мм
Температура расплава в промежуточном ковше	поле редактирования	1500-1570 °С
Скорость разливки	поле редактирования	1,0-8,0 м/мин
Тип кристаллизатора	комбинированный список	линейный или параболический
Тип смазки	комбинированный список	ШОС или масло
Температура охлаждающей воды	поле редактирования	10-50 °С
Перепад воды в кристаллизаторе	поле редактирования	5-30 °С
Команда начала расчета	кнопка	нет
Команда сохранения результатов расчета	кнопка	нет
Команда вызова справочной системы	кнопка	нет
Команда выхода из программы	кнопка	нет

находится статусная строка, отображающая подсказки по ходу процесса, а также текущие значения температуры поверхности заготовки и толщины твердой корочки. Один из ранних вариантов интерфейса программы приведен на рис. 1.

Отчет о результатах моделирования

Результаты моделирования отражены в отчете (протоколе) указанием конкретных значений температур в структуре найденного температурного поля, дающего представление о характере распределения температур в любом сечении заготовки, зафиксированном в кристаллизаторе. В подробном отчете содержатся данные о наращивании и усадке твердой фазы, распределении температуры по объему заготовки вплоть до сечения, находящегося на выходе

из кристаллизатора. Предусмотрена также возможность сохранения пакета файлов с результатами расчета в кристаллизаторе для последующего их использования в расчете температурного поля заготовки зоны вторичного охлаждения (ЗВО).

Из структуры интерфейса (рис. 1) видно, что в рабочей области окна могут быть представлены также графики темпа наращивания твердой фазы и кинетики температуры поверхности вдоль технологической оси МНЛЗ.

Интерфейс блока № 2 (ЗВО)

Интерфейс программы расчета ЗВО разрабатывался с учетом требований, приведенных выше. В табл. 2 приведены интерфейсные элементы управления для моделирования зоны вторичного охлаждения.

В верхней части окна расположены вкладки, позволяющие получить доступ к элементам управления ЗВО. Распределение расходов воды по автономным участкам ЗВО представлено в виде гистограммы, находящейся под полем редактирования номера участка, его длины и расхода подаваемой воды для охлаждения. В нижней части окна находится статусная строка, отображающая подсказки и рекомендации по ходу процесса и текущие значения температуры поверхности заготовки и толщины твердой корочки. Одно из окон интерфейса программы приведено на рис. 2.

Детальная визуализация процесса

По желанию оператора можно подробно рассмотреть и с помощью курсора исследовать температурное поле внутри заготовки. Для вызова сечения с выбранной курсором вдоль технологической

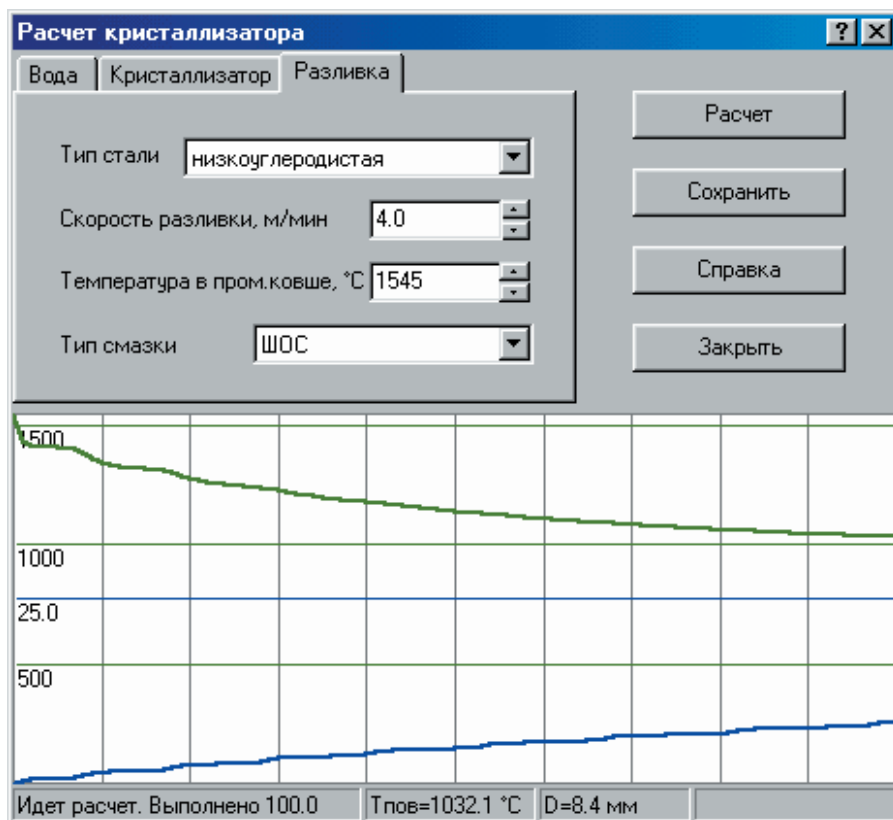


Рис. 1. Интерфейс программы расчета теплового состояния затвердевающей заготовки в кристаллизаторе (окно «разливка» совмещено с окном представления результатов моделирования)

Интерфейсные элементы управления для моделирования ЗВО

Используемые параметры	Элементы управления	Диапазоны параметров
Количество зон, шт	поле редактирования	1-10
Номер автономной зоны	комбинированный список	от 1 до N , где N – количество зон
Длина, мм	поле редактирования	не ограничена
Расход (по выбору), л/мин или м ³ /ч	поле редактирования	не ограничен
Команда загрузки начального температурного поля на выходе из кристаллизатора	кнопка	архив сохраненных режимов
Команда начала расчета	кнопка	нет
Команда загрузки режимов охлаждения в ЗВО	кнопка	архив сохраненных режимов
Команда сохранения режимов охлаждения в ЗВО	кнопка	нет
Команда вызова справочной системы	кнопка	нет
Команда выхода из программы	кнопка	нет

оси координатой необходимо нажать на левую клавишу «мышки» в окне графиков (рис. 1, 2). В результате получаем картинку (рис. 3), на которой показаны два вида температурного поля в сечениях, характерных для кристаллизатора (а) и ЗВО (б). Температурное поле здесь представлено визуально в цветовом разрешении: каждая группа изотерм обозначена определенным цветом. В заголовке окна указана точная координата сечения (расстояние от мениска), а в левом верхнем углу – цветовая гамма соответствующих изотерм. В статусной строке отображаются текущие координаты курсора (H – расстояние от центра сечения по вертикали, W – расстояние по горизонтали), а также высвечивается значение температуры в точке с засвеченными координатами. Это значительно расширяет функциональные возможности программы, так как позволяет оперативно найти температурное поле в сечениях активного взаимодействия заготовки с оборудованием и оптимизировать температурно-деформационные режимы в сечениях изгиба-разгиба или на участках мягкого обжатия заготовки.

Справочная система

Для эффективной работы с программой разработана специальная справочная система. Все элементы программного интерфейса снабжены подсказками (для этого достаточно задержать «мышку» над элементом управления несколько секунд), а кнопки – специальными разделами справки (нажатием клавиши F_1 , когда элемент находится в фокусе ввода). Наличие такой процедуры существенно упрощает применение имитационной модели, особенно на начальной стадии обучения пользователя. Основное окно справки Windows вызывается нажатием кнопки «Справка» (рис. 4). Пользователь, выбрав интересующий его раздел справки, может увидеть его содержание нажатием кнопки «Показать», а также найти интересующую его тему по ключевому слову, выбрав вкладку «Указатель» в главном окне справочной системы. Наличие такой системы существенно облегчает работу пользователя и экономит рабочее время.

Методика оптимизации режимов и конструктивных параметров технологического оборудования

Особенности методики оптимизации режимов и конструктивных параметров технологического оборудования рассмотрим в условиях технологии непрерывного литья заготовок. Известно, что наиболее уязвимым участком этой технологической линии в плане стабилизации качества поверхности получаемых заготовок является ЗВО. Если центром стадии зарождения процесса трещинообразования можно считать кристаллизатор, то его максимальное развитие достигается именно в ЗВО. Чаще всего это обусловлено неадекватностью выбранных режимов охлаждения (количество и протяженность автономных зон, уровень интенсивности и неравномерности охлаждения) и конструктивными недостатками используемых спрейерных устройств (вид и

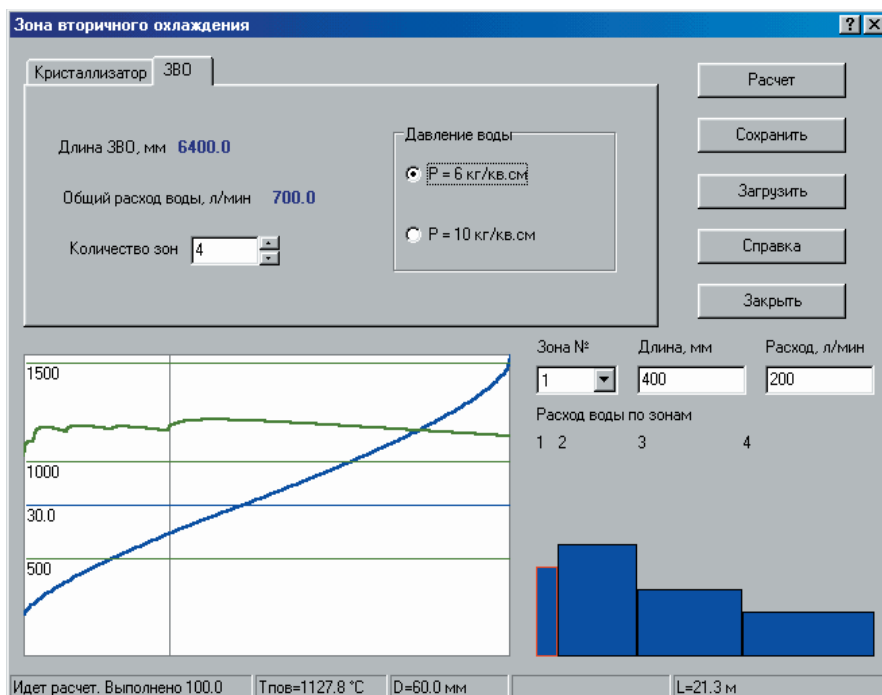
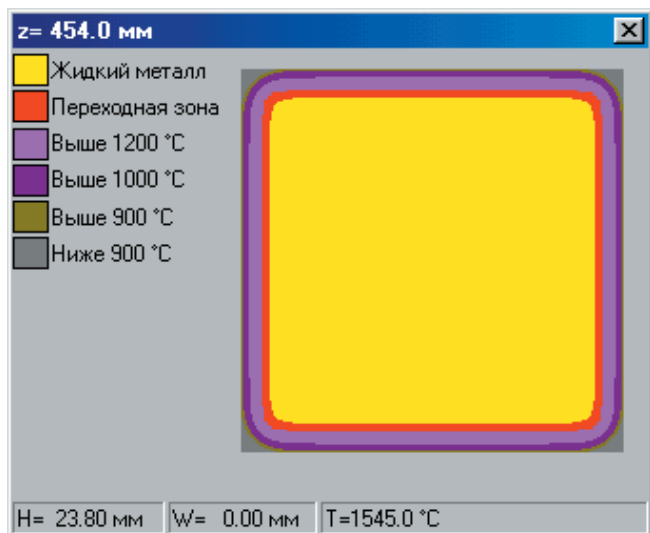
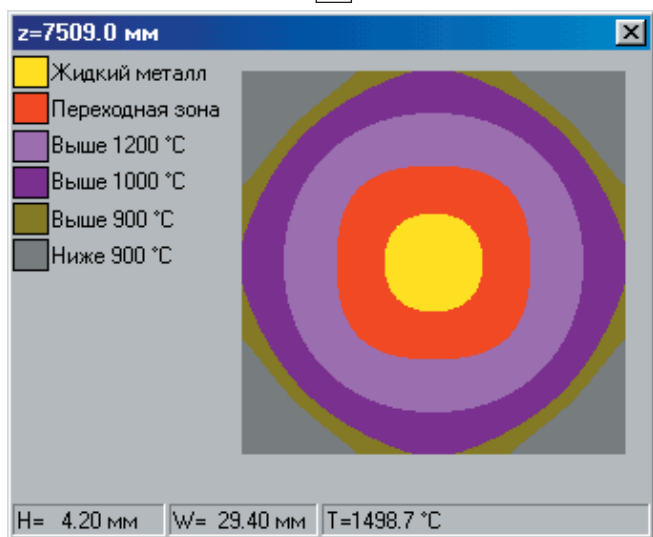


Рис. 2. Один из вариантов интерфейса ИМ для отработки режимов вторичного охлаждения при разливке заготовки квадратного сечения размером 120 мм



а



б

Рис. 3. Температурное поле в сечении заготовки в области кристаллизатора (а) и ЗВО (б)

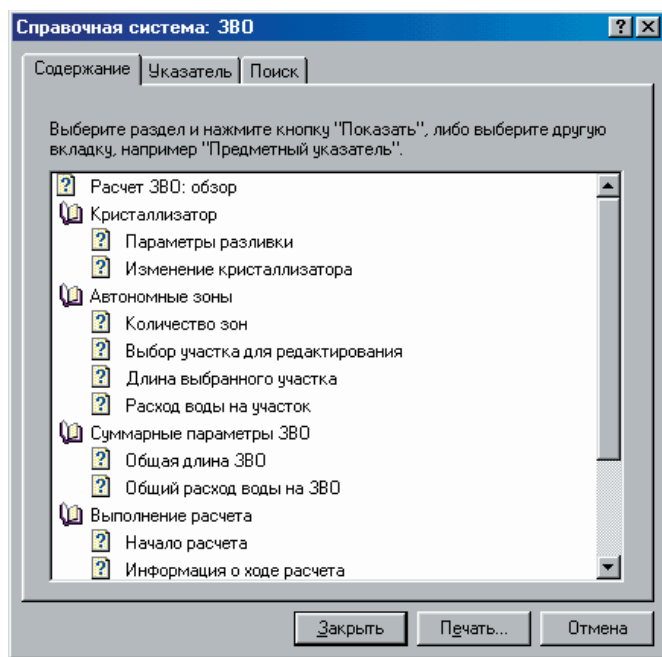


Рис. 4. Основное окно справочной системы

количество установленных коллекторов, типы и шаг установки используемых форсунок). Для отработки режимов вторичного охлаждения необходимо предварительно провести расчет кристаллизатора (или загрузить из архива полученные ранее выходные данные режима). Полученное в результате расчета температурное поле на выходе из кристаллизатора содержит начальные условия для расчета теплового состояния непрерывнолитой заготовки в ЗВО. Исследование теплового состояния заготовки проводят путем варьирования граничных условий. При этом для связи коэффициента теплоотдачи или теплового потока с расходом охладителя используют хорошо адаптированную в промышленных условиях экспериментальную зависимость коэффициента теплоотдачи (или теплового потока) от плотности орошения (удельный расход жидкости) и давления подаваемого охладителя. Последнее позволяет использовать в качестве граничных условий естественный технологический параметр, а именно – расход подаваемой воды на поверхность непрерывнолитой заготовки при заданном давлении. Особенно следует отметить, что, в отличие от математической, в имитационной модели граничные условия в ЗВО задаются в виде расходов воды по зонам, устанавливаемым оператором (рис. 2). В качестве варьируемых параметров представлены: марка разливаемой стали, скорость разливки, размер сечения отливаемой заготовки, расходы, давление воды и длины автономных участков ЗВО, а также варьируемый вид (масштабированная гистограмма) распределения расхода по длине ЗВО. Общая длина ЗВО, также как и общий расход воды, формируются путем автоматического суммирования автономных длин и расходов. Оптимизируемыми параметрами являются температура поверхности и вид температурного профиля $T [z(\tau)]$ с учетом вторичного разогрева вдоль технологической оси (z) МНЛЗ (прямая задача), а также структура полей орошения вместе с особенностями конструктивного выполнения охлаждающих устройств (обратная задача). В плане оптимизации режимных параметров, обеспечивающих базовые гарантии качества по заданным технологом пределам стабилизации температуры поверхности и вторичного разогрева, наибольший интерес представляют:

1. Корректировка диапазона температурно-скоростных режимов разливки в рамках заданной производительности, а также марочного и размерного сортовых разливаемых заготовок.

2. Оптимизация темпа снижения температуры в первой зоне от температуры поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора до достижения заданного технологом значения температуры сопровождения в ЗВО.

3. Общий вид температурного профиля поверхности заготовки, размах которого ограничен снизу и сверху красными линиями, не должен, с одной стороны, достигать уровня температуры порога хладноломкости для данной марки стали, приближение к которому чревато провалами качества заготовок по поверхности и геометрии, и, с другой стороны,

не должен достигать максимального уровня температуры, при котором резко снижаются гарантии устойчивости процесса и качество макроструктуры.

4. Крутизна подъема температурного профиля (вторичный разогрев) поверхности на граничных участках автономных зон.

5. Структура температурного поля в сечениях контакта с поддерживающими роликами и тянущими валками ТПМ, изгиба-разгиба заготовки и на участках установки устройств мягкого обжатия.

Полученные в процессах модельных исследований и отработки режимов охлаждения окончательные результаты позволяют найти оптимальные сочетания технологических и конструктивных параметров, отвечающие условиям практически 100 % адекватности реакции системы охлаждения на изменение температурного профиля (имеется в виду высокая корректность выбора отклика управляющего воздействия, гарантированно обеспечивающего соответствие температуры поверхности ее заданному значению). Выполнение этого условия, как было отмечено выше, гарантирует высокий базовый уровень качества поверхности и геометрии получаемых заготовок.

Из вышеизложенного следует, что представленную ИМ можно с успехом использовать в качестве эффективного инструмента для оптимизации температурно-скоростных режимов разлива и конструктивных узлов теплонагруженного оборудования МНЛЗ, а также для разработки новых способов и устройств непрерывного литья заготовок. С ее помощью были разработаны основы новой технологии непрерывного литья заготовок с округленными ребрами и кристаллизатор для ее реализации.

Расширение возможностей и эффективности использования ИМ

С целью расширения функциональных возможностей ИМ были разработаны математические модели описания процессов непрерывной разлива круглого и прямоугольного с округленными углами сечений, позволившие обнаружить отличительные особенности динамики температурного поля внутри цилиндрической заготовки. При идентичной рассмотренной ранее методике расчета в рамках математической модели для описания процесса отвердевания круглой заготовки использовалось дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в полярных координатах вида

$$\rho_{эф}(t) c_{эф}(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = 1/r \frac{\partial}{\partial r} [r \lambda_{эф}(t) \frac{\partial t}{\partial r}], \quad (1)$$

преобразованное в удобную для численного решения форму. В структуре уравнения (1), описывающего, по существу, перенос энергии, теплота фазового перехода входит в $c_{эф}$. Поэтому, за исключением новой радиальной координаты r , обозначения те же, что и в [1].

В процессе выполнения численных расчетов в рамках сеточной модели принято: λ_i – теплопроводность разливаемой марки стали в окрестности i -ого узла; r_i – радиальная координата i -ого узла; Δr – размер выбранного пространственного шага;

$\Delta \tau$ – временной промежуток, соответствующий температурному переходу i -ого узла из состояния k в состояние $k + 1$; ρ_i , c_i – плотность и теплоемкость в окрестности i -ого узла соответственно; $\rho_{эф}$, $c_{эф}$, $\lambda_{эф}$ – эффективные коэффициенты плотности, теплоемкости и теплопроводности.

При разработке математической модели процесса непрерывного литья заготовок прямоугольного сечения с округленными углами, в целом, применялась методика расчета теплового состояния заготовки, идентичная изложенной в [1]. Отличие методик состоит лишь в новой трактовке граничных условий, а именно: ввиду нелинейности границы поверхности, при каждом определении температур в узлах сетки осуществляется дополнительная проверка координат на предмет нахождения данного узла в пределах исследуемого сечения; на момент присоединения граничных условий на криволинейной поверхности используется векторная составляющая теплового потока или коэффициента теплоотдачи (в зависимости от типа граничных условий).

Естественным условием тестирования такой модели было совпадение результатов расчета при использовании двух моделей в условиях идентичности начальных и граничных условий, а также равенства радиуса округления углов квадратной заготовки радиусу сечения круглой заготовки.

С помощью рассмотренной выше усовершенствованной имитационной модели для моделирования процесса отвердевания непрерывнолитой заготовки с округленными ребрами удалось: оптимизировать [2] форму поперечного сечения получаемой заготовки и геометрию формообразующей полости кристаллизатора [3], температурно-скоростные режимы разлива на условиях контроля положения точки смыкания фронтов жидкой фазы; оптимизировать тепловой профиль поверхности заготовки вдоль оси МНЛЗ с учетом нового формата заготовок, схемы устанавливаемого оборудования и др.

Выводы

1. Основная задача создания интерфейса – обеспечение полной функциональности программы при максимальных удобствах для пользователя с конкретным перечнем и установленными диапазонами варьируемых параметров, а также рациональный выбор соответствующих элементов управления Windows-интерфейса.

2. Предусмотренные в структуре интерфейса Windows-окна позволяют многогранно отразить результаты моделирования в форме протоколов, графиков, динамических картинок структуры найденного температурного поля в цветовом разрешении, дающие полное представление о характере распределения температур в любом сечении заготовки и динамике процесса отвердевания.

3. Детальная визуализация структуры температурного поля в сечениях активного взаимодействия заготовки с технологическим оборудованием позволяет оптимизировать температурно-деформационные режимы в сечениях контакта с поддержива-

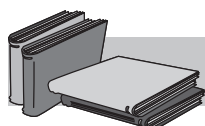
ющими роликами и тянущими валками ТПМ, изгиба-разгиба или на участках мягкого обжатия заготовки.

4. Существенно упрощает задачи оптимизации параметров технологический формат интерфейса, при котором в качестве управляемых граничных условий теплообмена используются величины не в единицах тепловой мощности (Вт), как это принято в математической модели, а их технологические эквиваленты в виде необходимых для их реализации расходов подаваемого охладителя с учетом задействованных в неявном виде его давлений и температур.

5. Разработанная методика отработки температурно-скоростных режимов разлива путем прокрутки вариантов позволяет найти по виду получаемого

температурного профиля поверхности наилучшие сочетания режимов и схем подачи, а также технологических параметров разлива и конструктивных решений ЗВО, конфигурация которых обеспечивает базовые гарантии качества по заданным технологическим пределам стабилизации температуры поверхности и вторичного разогрева.

6. Наиболее эффективное усовершенствование имитационной модели достигается путем расширения возможностей математической модели. Разработка новых математических моделей для описания теплопереноса в кристаллизующихся заготовках круглого и прямоугольного с округленными углами сечений позволила оптимизировать формат получаемых заготовок и конструкцию кристаллизатора для их производства.



ЛИТЕРАТУРА

1. Роль компьютерного моделирования в оптимизации технологических процессов непрерывной разлива стали. Сообщение 1 / В. А. Белый, В. Л. Найдек, С. Ю. Волков и др. // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 11. – С. 32-39.
2. *Белый В. А.* Разработка новой технологии производства непрерывнолитых заготовок с округленными ребрами // Сб. тр. научн. техн. конф. «Состояние и основные пути развития непрерывной разлива стали». – Харьков: УкрНИИмет, 2001. – С. 107-112.
3. Пат. РФ № 2227081, МПК⁷ B22D11/04. Кристаллизатор / В. А. Белый, А. А. Степанов, А. М. Ламухин и др. – Опубл. 20.04.04, Бюл. № 11.

Анотація

Білий В. П., Найдек В. Л., Волков С. Ю., Якобше Р. Я., Мисочка А. В., Ноговіцин О. В., Кучаєв О. А., Білий В. В.

Роль комп'ютерного моделювання в оптимізації технологічних процесів безперервного лиття сталі. Повідомлення 2

Розглянуто етапи розробки блочного інтерфейсу програми для розрахунку теплового поля безперервнолитої заготовки та методика проведення досліджень з метою оптимізації режимів та конструктивних параметрів технологічного обладнання при литті круглих і квадратних заготовок на МБЛЗ. Розроблено математичну модель, яка описує процес тверднення прямокутної заготовки із закругленими кутами. За допомогою моделі виявлено особливості динаміки зміни температурного поля заготовки.

Ключові слова

математична модель, імітаційна модель, МБЛЗ, оптимізація параметрів, сталева заготовка, температурне поле

Summary

Bilyi V. P., Naydek V., Volkov S., Jakobshe R., Misochka A., Nogovitsyn A., Kuchaev A., Bilyi V. V.

The role of computer modelling in optimization of technological processes of steel continuous casting. Report 2

The stages of the development of a program block interface for the computation of the heating field of continuously cast billet and methodology for conducting research with a view to optimization of modes and design parameters of technological equipment for casting of round and square billets on casters are described. A mathematical model describing the solidification process of rectangular billet with rounded corners is developed. With the help of model is revealed features of the dynamics of the temperature field inside of the billet.

Keywords

mathematical model, simulation model, continuous caster, parameters optimization, steel billet, temperature field

Поступила 25.07.11