

Ключові слова

методика, відповідність, характеристика, двигун, привід, прокатка, момент, потужність, частота, обертання, номінальна, програма, тахограма, режим

Summary

Stech V., Ostapenko A., Minenko N., Klimenko O.

Evaluation procedure of conformance of rolling rated conditions to primary motor of working stands capabilities

It is proposed a procedure of loading calculation based on equivalent and peak power values and engine torque of primary drive motors in function from current value of rolling moment reduced to engine rating. The procedure allows to compare equivalent and nominal loads in any engine speed zones, for example, while performing accelerated rolling.

Keywords

procedure, conformance, characteristic, engine, drive, rolling, moment, power, frequency, rotation, nominal, instruction, tachogram, running regime

Поступила 10.06.11

УДК 519.711.3:517.958:681.3:669.142

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 1

Дана сравнительная характеристика и описаны области применения статистических моделей и моделей математической физики в металлургических процессах. Приведена структура имитационных моделей, применяемых для моделирования сложных технологических процессов, в частности при непрерывной отливке стальных заготовок. Рассмотрены основные этапы построения конечноразностной математической модели, разработанной для расчета теплового состояния непрерывнолитой заготовки. Обсуждены особенности методики расчета температурного поля в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Ключевые слова: математическая модель, непрерывная разливка, имитационная модель, оптимизация, затвердевание заготовки

Настоящая работа является результатом плодотворного сотрудничества ведущего института в области разработок новых технологий и растущей инжиниринговой компании, деятельность которой направлена на реализацию конкретных задач по перевооружению предприятий металлургической отрасли. Основы такого сотрудничества были заложены в ходе дискуссий на заседаниях межведомственного совета по проблемам внепечной

обработки и непрерывной разливки стали. Обсуждаемая тема затрагивает совместные интересы в создании эффективных и малозатратных механизмов оценки, анализа и улучшения технологической ситуации, обнаружении резервов повышения и стабилизации качества технологического продукта, а также разработке эффективного инжиниринга на базе новых технологий и рациональных вариантов модернизации технологических линий, агрегатов и узлов.

Формат публикации подан в виде сообщений, каждое из которых включает пять разделов затронутой темы, а именно:

1. Разработка математических и имитационных моделей.

2. Разработка интерфейса и методик оптимизации параметров технологического оборудования МНЛЗ.

3. Использование детерминированных моделей для оптимизации технологических параметров литья и конструктивных параметров МНЛЗ.

4. Создание интеллектуальных систем контроля, аттестации и прогноза качества на базе статистических моделей.

5. Использование 3D проектирования для оптимизации компоновочных схем новых технологических линий и устанавливаемого оборудования.

Выбор математической модели. Пути решения проблемы улучшения и стабилизации качества технологического продукта в настоящее время весьма многообразны, однако существует и некая общность применяемых методик, заключающаяся в попытках оптимизации параметров технологического процесса. Например, в работе [1] рассмотрены конечноеlementные модели, которые разработаны для моделирования процессов непрерывной разливки и горячей прокатки стали. Двумерная нестационарная конечноеlementная модель непрерывнолитой круглой заготовки разработана в работе [2], где неизвестное тепловое сопротивление между заготовкой и кристаллизатором определяется в результате решения обратной задачи теплопроводности по данным измерений температуры с помощью термопар, установленных в разных точках стенок кристаллизатора МНЛЗ.

В работе [3] представлена полуаналитическая двумерная модель распределения температуры на поверхностях непрерывнолитой заготовки и толщины затвердевающей корочки. Автоматизированная система динамического планирования производства, которая в режиме реального времени контролирует производственные металлургические процессы, описана в работе [4]. Для решения задач управления уровень АСУТП использует математические модели процессов выплавки стали в конвертерах, термические и химические модели обработки стали на У КП, модели дегазации в вакууматорах, модели кристаллизации слитка в процессе разливки.

В отличие от математического термина «оптимизация» в настоящей работе под оптимизацией подразумевается неотъемлемая составляющая управленческой стратегии предприятия, направленная на решение затронутой проблемы в плане получения конкурентоспособного продукта. При этом, одним из эффективных средств оптимизации технологических процессов является использование математических и имитационных моделей.

Широкое распространение в производственной практике улучшения технологической ситуации в настоящее время получила многократно проверенная методика оптимизации технологических процессов,

основанная на статистическом подходе, включающем проведение промышленных экспериментов, их обработку и получение регрессионных зависимостей, использование которых позволяет отследить влияние нестабильности отдельных технологических параметров на выход годного технологического продукта. Оценку взаимосвязей исследуемых параметров осуществляют при этом с помощью корреляционного анализа. Таким образом, устоявшаяся на современном этапе развития технологической методика определения влияния отдельных параметров на ход технологического процесса предусматривает использование математических моделей статистического типа, где основная роль отводится регрессионному и корреляционному анализам, позволяющим в условиях конкретного предприятия оценить и стабилизировать технологическую ситуацию. Вместе с тем следует признать, что полученные в результате такой стабилизации данные носят весьма субъективный характер и формализованы так, что теряют физический смысл, характеризуя конкретную, в известной степени искаженную, ситуацию. Это главная причина невозможности их обобщения в плане создания надежной базы гарантий качества, пригодной для широкого использования в других условиях производства.

В отличие от моделей статистического типа, попутно создаваемых в процессе обработки статистических данных, в основе детерминированных математических моделей лежит замкнутая система фундаментальных уравнений, описывающая поведение моделируемого объекта, результаты решения которой позволяют однозначно прогнозировать ход процесса. Однако ценность полученного таким образом детерминированного результата очень сильно зависит от полноты и корректности выбранной системы уравнений, а также от уровня ее адаптации, в процессе решения которой осуществляется тестирование алгоритмов и тарировка данных. Эта проблема уходит на второй план, если в основе детерминированной математической модели лежат дифференциальные уравнения, составленные для бесконечно малого пространственно-временного элемента, способные достаточно полно и объективно отразить физическую сущность процесса. К таким в первую очередь относится используемое ниже, исторически многократно адаптированное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее процесс переноса тепловой энергии в классической постановке.

Сложность оптимизации современных технологических процессов обусловлена, прежде всего, их многофакторностью. Это особенно проявляется при оценке технологической ситуации в технологиях металлургических переделов, где в одном комплексе синтезированы разные энергетические потоки, характерные для химических, термодинамических, теплотехнических, гидродинамических и других процессов. Разделить влияние каждого из них в совокупности на качество производимого технологического продукта, производительность агрегатов, стойкость технологического оборудования или

удельные материальные и энергетические затраты достаточно сложно, а порой просто невозможно. Существует, по крайней мере, две принципиально отличающиеся методики, перспективность использования которых, как отмечалось выше, совершенно очевидна. Первая характеризуется применением математических моделей статистического типа, наиболее перспективными из которых являются те, в которых для разделения влияния на ход процесса отдельных параметров или их совокупности используется дисперсионный анализ. Вторая, детерминированного типа, предусматривает применение сложных математических моделей или аналитических зависимостей, описывающих тот или иной процесс и дающих априори точный результат. Точность прогноза получаемых результатов с помощью таких моделей, а значит и степень адекватности принимаемого по ним решения весьма зависят от полноты охвата контролируемых параметров в рамках выбранной физической модели процесса и уровня адаптации математической модели к реальным условиям производства. Без тщательного соблюдения этих условий бесспорное преимущество детерминированной модели, заключающееся в оперативном получении легко тестируемого и точного результата моделирования, может превратиться в непреодолимый недостаток. Оценивая преимущества и недостатки двух моделей, приходим к следующему убеждению. В процессе разработки базового инжиниринга для вновь сооружаемых объектов при оптимизации процессов и конструктивных узлов агрегатов следует по возможности использовать модели детерминированного типа, а во время проведения реинжиниринга в условиях действующих предприятий для оценки технологической ситуации и при определении стратегии технического перевооружения предприятия предпочтительнее применять статистические модели.

Модифицированный в авторской постановке вариант детерминированной модели, практически применяемой для оптимизации технологических и конструктивных параметров в процессе непрерывного литья заготовок, рассмотрен ниже. В частности, результаты компьютерного моделирования [5] были использованы при решении задач базового инжиниринга в процессе разработки, а также успешно внедрены и продуктивно использованы при освоении первой отечественной МНЛЗ [6].

Имитационная модель технологического процесса. В отличие от математического, компьютерное моделирование предусматривает использование программного обеспечения, способного, кроме достаточно быстрого расчета определяемых параметров, осуществлять целый комплекс полезных дополнительных функций по архивированию, визуализации и, при необходимости, интерпретации полученных результатов. Наличие интерфейса при этом позволяет имитировать реальный технологический процесс с варьируемыми параметрами и, таким образом, оперативно «прокручивать» варианты реализации технологии, результаты анализа которых позволяют обоснованно скорректировать ход процесса в пользу

стабилизации качества и увеличения выхода годного технологического продукта.

Под имитационной моделью (ИМ) понимают систему или инструмент-имитатор, способный воспроизводить и на достаточном уровне исследовать контролируемый процесс с получением промежуточных и конечных результатов, обеспечивающих на заданном уровне сходимости их повтор в реальных условиях ведения производственного процесса. Сходимость получаемых результатов моделирования зависит от полноты набора средств для аналогичного воспроизведения конфигурации параметров технологии и конструктивных параметров технологического оборудования в комплексе с идентичным набором управленческих функций, обеспечивающих подобие моделируемого и реального процессов. Наиболее простым примером ИМ детерминированного типа может служить вариант в составе самой простой математической модели (функции), со стандартным программным обеспечением, реализуемым в Microsoft Excel и способным прогнозировать результат при моделировании вычислительного процесса по схеме: аргумент-функция-результат. Приведенный пример показывает, что, имея в своем распоряжении математическую модель или, в простейшем случае, функцию, описывающую ход и особенности протекания конкретного процесса, можно исследовать как при этом будет вести себя контролируемый объект путем изменения ее коэффициентов или значений других аргументов, представляющих собой управляемые элементы начальных и граничных условий. В достаточно сложных ситуациях может оказаться, что важным моментом здесь является не только (и не столько) сходимость полученных результатов, а сам факт отслеживания тенденций влияния отдельного параметра на ход процесса в реальном окружении других. Наличие интерфейса в структуре ИМ и практически неограниченных возможностей прокрутки вариантов ведения процесса, при грамотно спланированном эксперименте и использовании современных методик обработки результатов, существенно сужают диапазоны флуктуаций контролируемых технологических параметров вокруг их оптимальных значений, удовлетворяющих лучшему комплексу показателей по ресурсосбережению и качеству получаемого продукта. Таким образом, достигнутые с помощью ИМ результаты позволяют успешно корректировать поведение реального объекта в реальных условиях и оптимизировать технологический процесс на условиях прогнозируемого уровня качества технологического продукта.

Краткое описание структуры ИМ. Современные ИМ, используемые для моделирования сложных технологических процессов, как правило, включают: адаптированные математические модели, которые адекватно описывают исследуемый процесс; программное обеспечение, позволяющее с достаточной степенью точности и быстродействия произвести расчет, протоколирование, архивирование и визуализацию результатов; мощный интерфейс в технологическом формате, ведущий обширный диалог,

достаточный для оптимизации исследуемого процесса.

Под технологическим форматом интерфейса понимается формат, обеспечивающий ведение диалога с технологом, не требующий перерасчета граничных условий для математической модели и наоборот. Значения вводимых и получаемых при этом параметров должны быть представлены в естественном для технолога виде. Например, снимаемый кристаллизатором тепловой поток должен выражаться не через тепловую мощность (Вт), а через расход воды (л/мин или м³/ч) и перепад ее температур на входе и выходе из кристаллизатора (°С). Тепловой поток с поверхности заготовки во вторичной зоне должен выражаться не через коэффициент теплоотдачи, а через значение расхода подаваемого охладителя (л/мин или м³/ч) в комбинации со значением избыточного давления в системе охлаждения (кг/см² или МПа).

Следует отметить, что создание алгоритмов оптимизации возможно не ранее, чем на втором этапе (по результатам системно спланированных модельных исследований на адаптированной ИМ). Разработанные на базе этих результатов компьютерная программа и интерфейс для оптимизации исследуемого процесса позволяют при ничтожных временных и материальных затратах оптимизировать технологические и конструктивные параметры в условиях практически любой технологической линии. Другими словами, предоставляется возможность глобальной оптимизации интегрированных процессов [7]. Поэтому, в приведенном ниже примере конкретной технологии непрерывного литья заготовок (НЛЗ), довольно важной является разработка комплексного программного обеспечения для моделирования, расчета и оптимизации технологии литья, охватывающего всю технологическую линию. На первых этапах процесса непрерывного литья в кристаллизаторе очень важно заложить высокий базовый уровень гарантий качества получаемых заготовок. На последующих участках линии, включая ЗВО, столь же существенной становится проблема стабилизации их качества в условиях активного деформационного (изгиб, разгиб, обжатие) и температурного сопровождения (температурный профиль поверхности) вытягиваемых заготовок.

Разработка имитационной модели на примере процесса НЛЗ. Основными целями создания ИМ являлись:

1) разработка математической модели, методик, алгоритмов и компьютерных программ, обеспечивающих расчет температурного поля и его кинетики в кристаллизующейся заготовке при заданных вариантах конфигурации технологических характеристик литья и известной конструкции МНЛЗ;

2) эффективный контроль и управление процессом в широком диапазоне изменения технологических параметров разлива и конструктивных параметров МНЛЗ;

3) отработка структуры построения системы, режимов вторичного охлаждения и оптимизация температурно-скоростных режимов разлива;

4) создание базы гарантий обеспечения качества получаемых заготовок, сбор и обработка данных о влиянии отдельных технологических параметров и их нестабильности на выход годных заготовок;

5) разработка алгоритмов оптимизации технологических и конструктивных параметров, новых технологий, способов и устройств для непрерывной разлива стали.

Структурно ИМ состоит из двух автономных блоков, обслуживающих кристаллизатор (блок № 1) и ЗВО (блок № 2). В качестве исходных данных для имитации процессов теплообмена и отвердевания в кристаллизаторе основными выбраны следующие: марка разливаемой стали; температура расплава в промежуточном ковше (начальная температура разлива); скорость разлива; форма и размеры отливаемой заготовки; характерные параметры кристаллизатора (конусность и эффективная длина); тип применяемой технологической смазки (масло или ШОС); расход охлаждающей воды на кристаллизатор; температура охлаждающей воды на входе в кристаллизатор; допустимый по условиям водоподготовки перепад температур воды на входе и выходе из кристаллизатора.

Первые три варьируемых параметра размещены в блоке № 1 – «разливка», остальные – в блоке № 2 – «кристаллизатор». В результате моделирования процесса отвердевания в кристаллизаторе получают интегральную оценку режима охлаждения заготовки (в виде значения перепада температур охлаждающей воды на входе и выходе из кристаллизатора), а также отчет о кинетике температурного поля и динамике наращивания толщины твердой корочки у кристаллизующейся заготовки в процессе разлива. Предусмотрено визуальное представление режимов в виде протокола данных расчета и их обработки в виде графиков темпа наращивания твердой фазы и кинетики температуры поверхности. Возможно получение цветной картинке температурного поля любого поперечного сечения кристаллизующейся заготовки. Для уточнения теплового состояния заготовки, в частности тепловой усадки периметра и размеров его сторон, предусматривается также детальное исследование температурного поля в поперечном сечении заготовки с помощью курсора.

Исходными данными для расчета ЗВО служат использованные ранее параметры для расчета кристаллизатора (марка стали, размер заготовки, скорость разлива), а также сохраненные в архиве данные температурного поля кристаллизующейся заготовки в выходном сечении кристаллизатора.

Исходные данные для ЗВО, размещаемые в окне № 3, включают: количество автономных зон принудительного охлаждения; длины автономных зон; расход и давление охладителя в каждой зоне; суммарную длину ЗВО и общий расход подаваемого охладителя; характеристику выбранного режима в виде масштабированной гистограммы.

В результате моделирования процесса охлаждения заготовки в ЗВО получаем: полный отчет о структуре и кинетике температурного поля отливаемой

заготовки в виде протокола на любой момент хода процесса; длину жидкой фазы и температуру поверхности на момент смыкания фронтов кристаллизации; температурный профиль, дающий визуальное представление о темпах охлаждения поверхности и вторичного разогрева на выходе из каждого участка ЗВО; график темпа наращивания твердой фазы вплоть до полного отвердевания.

По желанию пользователя можно получить визуальное представление любого сечения получаемой заготовки вдоль технологической оси в виде цветной картинки изотерм и его подробное исследование с помощью курсора.

Краткое описание математической модели. Основой для создания имитационной модели послужила детерминированная математическая модель, разработанная для расчета теплового состояния непрерывнолитой заготовки, согласно которой разработаны алгоритм и компьютерная программа расчета с управляемыми граничными условиями. Необходимо отметить некоторые особенности построения и функционирования модели, дающие представление об уровне ее корректности.

В процессе расчета теплового состояния непрерывного слитка была задействована широко используемая для этих целей квазистационарная (во времени) или зональная (в пространстве) физическая модель переноса тепла. В этом случае, при неизменной скорости разлива температурное поле для любого зафиксированного вдоль направления вытягивания сечения кристаллизующей заготовки предполагается не зависящим от времени. Такое допущение вполне обосновано тем, что плотности тепловых потоков в осевом направлении почти на два порядка меньше, чем вдоль координат, описывающих температурное поле текущего сечения заготовки (как показывают результаты многочисленных экспериментальных и промышленных исследований). Двумерный процесс теплопроводности в том же сечении кристаллизующей заготовки описывается при этом следующим дифференциальным уравнением:

$$vc_{\text{эф}}(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_{\text{эф}}(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_{\text{эф}}(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right], \quad (1)$$

где x, y, z – координаты контролируемой точки; v – скорость разлива; t – текущая температура слитка в точке с выбранными координатами; $c_{\text{эф}}(t)$ – эффективная теплоемкость с учетом выделения (формально отсутствующей в приведенном уравнении) теплоты фазового перехода в смешанной зоне, с учетом структурного распределения в ней твердой и жидкой фаз, а также температурной зависимости теплоемкости стали в жидком и твердом состояниях; $\rho(t)$ – плотность, учитывающая температурную зависимость плотности стали в жидком и твердом состояниях, а также структурное распределение твердой и жидкой фаз в смешанной зоне; $\lambda_{\text{эф}}(t)$ – эффективная теплопроводность, учитывающая конвективные процессы в жидкой фазе расплава, температурную зависимость теплопроводности стали в жидком и

твердом состояниях, а также температурную зависимость с учетом структурного распределения твердой и жидкой фаз в смешанной зоне.

Из структуры уравнения (1) следует, что данная математическая модель при расчете температурного поля, с целью повышения точности получаемого решения, учитывает зависимость теплофизических коэффициентов от температуры, в том числе и эффективной теплопроводности от координат ($\lambda_{\text{эф}}$ не вынесена за знак оператора дифференцирования). Это существенно усложняет ситуацию и практически означает, что аналитическое решение уравнения (1) невозможно. Наиболее рациональным здесь представляется численное решение [8] с применением сеточной модели, предусматривающей замену операции непрерывного дифференцирования на конечноразностный метод шагового расчета температурного поля. В ходе расчета в пространственном промежутке между сеточными узлами предполагалась линейная зависимость температуры от координат, коэффициенты которой определялись путем прогонки с использованием неявного метода, исключающего накопление систематической ошибки. При этом кинетика процесса теплопереноса (зависимость конфигурации температурного поля от времени) определялась послойно через выбранный временной шаг, который с учетом специфики записи уравнения (1) фактически выражают отношением $\partial z/v$. Для управления теплофизическими коэффициентами в зависимости от температуры и фазового состояния сплошной среды использовался пакет специальных подпрограмм.

Суть методики расчета заключалась в следующем. Исходное распределение температур на n -временном шаге имеет вид

$$t [i, j]^n. \quad (2)$$

Для расчета температур на последующем шаге сеточно-временного пространства используется неявноразностная схема прогонки. С учетом достаточной малости выбранного шага используется линейная зависимость

$$t^{n+1} = a_{n+1}t^n + b_{n+1}, \quad (3)$$

где a и b – прогоночные коэффициенты, расчет которых осуществляют с учетом теплофизических характеристик стали и шага разбиения сеточной области.

Температура на поверхности кристаллизующейся заготовки определяется из граничных условий, задаваемых через тепловой поток. В результате выполнения операции прогонки получают распределение температур: на $(n + 1)$ временном шаге – $t [i, j]^{n+1}$; на $(n + 2)$ временном шаге – $t [i, j]^{n+2}$ и т. д.

Особенности методик расчета температурного поля в кристаллизаторе и ЗВО. Для полноты математической модели в ее состав, кроме уравнения (1), включены также известные уравнения, описывающие граничные и начальные условия. Граничные условия в кристаллизаторе задаются аналитически с помощью многократно адаптированной функции вида [6]

$$q = at^b e^{ct}, \quad (4)$$

где τ – временная координата, a , b , c – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров кристаллизатора (конусность и длина) и технологических параметров разлива (скорость разлива, тип применяемой технологической смазки). Сущность методики расчета состоит в том, что значения варьируемых коэффициентов, отвечающих вариантам эксплуатации и особенностям конструкции кристаллизатора, подставляют в функцию q , а полученный результат используют для дальнейшего расчета.

Граничные условия при расчете температурного поля в ЗВО задают в виде

$$q_n = \alpha (t_n - t_{cp}), \quad (5)$$

где q_n – тепловой поток на поверхности; α – адаптированный коэффициент теплоотдачи; t_n – температура поверхности; t_{cp} – температура охлаждающей среды.

К уравнениям (4), (5) присоединяются также соответствующие начальные условия

$$t(x, y, \tau) = t_0 \text{ при } (\tau = 0) \quad (6)$$

и граничные условия по адиабатным плоскостям ($x = 0$; $y = 0$), где предполагается отсутствие теплообмена ($q = 0$).

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи α в уравнении (5) определяют из зависимости, полученной ранее в результате экспериментальных исследований и неоднократно адаптированной в промышленных условиях [6].

$$\alpha = \alpha(G, P), \quad (7)$$

где G – расход, а P – давление подаваемого охладителя.

За пределами ЗВО граничные условия задают известными уравнениями воздушного (конвективного), контактного и лучистого способов теплообмена, которые замыкают систему уравнений в составе математической модели.

Описанная математическая модель представляет собой основу имитационной модели, являющейся мощным инструментом оптимизации технологических и конструктивных параметров сортовых МНЛЗ.

Выводы

1. Существующие методики оптимизации технологических параметров базируются на математических моделях статистического и детерминированного типов. Преимуществом статистических моделей является высокий уровень адаптации, что является следствием их попутного создания на базе результатов статистической обработки данных, полученных на промышленном предприятии. Однако

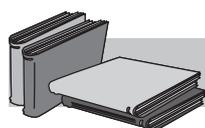
за этим скрываются и недостатки, заключающиеся, во-первых, в формализации данных до уровня потери технологических параметров их физического смысла и, во-вторых, они характеризуют конкретную, в известной степени искаженную на выбранном предприятии, ситуацию. Последнее делает невозможным обобщение полученных результатов для их продуктивной реализации в плане создания надежной базы гарантий качества, пригодной для широкого использования при проектировании новых объектов.

2. Применение детерминированных моделей, в основу которых заложены системы фундаментальных уравнений, описывающих тот или иной физический процесс, приводит к решению, направленному на априори точный результат. Однако, точность прогноза получаемых с помощью таких моделей результатов, а значит и степень адекватности принимаемого по ним решения в значительной степени зависят от полноты охвата контролируемых параметров выбранной физической моделью процесса и уровня адаптации математической модели к реальным условиям производства. Без обязательного соблюдения этих условий их преимущество, заключающееся в оперативном получении легко тестируемого и точного результата, может превратиться в непреодолимый недостаток.

3. При выборе детерминированной математической модели, во избежание больших ошибок, следует отдать предпочтение тем, у которых для описания процесса применяют дифференциальные и интегральные уравнения, полученные в рамках бесконечно малых пространственно-временных промежутков, и поэтому наиболее точно отражающие физическую сущность моделируемого процесса.

4. В процессе разработки базового инжиниринга для вновь сооружаемых объектов при оптимизации процессов и конструктивных узлов агрегатов следует преимущественно использовать модели детерминированного типа, а при проведении реинжиниринга в условиях действующих предприятий для оценки технологической ситуации и определения стратегии технического перевооружения предприятия предпочтительнее применять статистические модели.

5. Основным инструментом оптимизации технологических и конструктивных параметров является имитационная модель, структура которой включает многократно адаптированную математическую модель, программное обеспечение с функциями расчета, архивирования и визуализации, а также мощный технологический интерфейс, способный реализовать конструктивный диалог с пользователем-технологом и по результатам анализа выработать оптимальное решение.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Eduardo N. Dvorkin, Miguel A. Cavaliere, Marcela B. Goldschmit.* Finite element models in the steel industry Part I: Simulation of flat product manufacturing processes // *Computers and Structures.* – 2003. – № 81. – P. 559-573.
2. *Yin Hebi, Yao Man.* Inverse problem-based analysis on non-uniform profiles of thermal resistance between strand and mould for continuous round billets casting // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2007. – № 183. – P. 49-56.
3. *Alizadech M., Jahromi A. A., Abouali O.* A new semi-analytical model for prediction of the strand surface temperature in the continuous casting of steel in the mould region // *ISIJ Int.* – 2008. – V. 48, № 2. – P. 161-169.

4. Мишланов О. В., Мухранов Н. В. Информационные технологии в конвертерном производстве НТМК // Сталь. – 2008. – № 6. – С. 34-36.
5. Белый В. А., Нечитайленко В. В. Компьютерное моделирование процессов непрерывного литья // Сб. тр. научн. техн. конф. «Состояние и основные пути развития непрерывной разливки стали». – Харьков: УкрНИИмет, 2001. – С. 96-107.
6. Пуск в эксплуатацию нового металлургического комплекса / Ю. Н. Белобров, Ю. В. Сусь, В. Н. Тиунов и др. // Металлург. – 2003. – № 1. – С. 46-49.
7. Проблемы управления интегрированными технологическими процессами / В. А. Белый, В. А. Ботштейн, Р. К. Велецкий и др. // Сталь. – 2000. – № 5. – С. 83-88.
8. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1978. – 227 с.

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 1

Дано порівняльну характеристику та описано області застосування статистичних моделей та моделей математичної фізики в металургійних процесах. Наведено структуру імітаційних моделей, яку застосовують для моделювання складних технологічних процесів, зокрема при безперервному відливанні сталевих заготовок. Розглянуто головні етапи побудови скінченнорізницевої математичної моделі, яку розроблено для розрахунку теплового стану безперервнолитої заготовки. Обговорено особливості методики розрахунку температурного поля в кристалізаторі та зоні вторинного охолодження машини безперервного лиття заготовок.

Ключові слова

математична модель, безперервне лиття, імітаційна модель, оптимізація, твердіння заготовки

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 1

Comparative characteristic of statistical and mathematical physics models is presented and their application in metallurgical processes is described. The structure of simulation models used for modeling of complex technological processes, particularly in continuous casting of steel billets is given. The main stages of construction of finite-difference mathematical model for heat estimation of continuously cast billets are considered. The features of methodology for estimation of the temperature field in mould and in secondary cooling zone of billet continuous caster are discussed.

Keywords

mathematical model, continuous casting, simulation model, optimization, billet consolidation

Поступила 25.07.11