

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Ивановой Анны Александровны на тему «Прогнозное моделирование тепловых процессов при непрерывной разливке металлов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация Ивановой А.А. состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых источников и приложений, представлена на 327 страницах и содержит 131 рисунок, 7 таблиц, 348 библиографических источников, и 2 приложения.

Актуальность выбранной темы

Проблема совершенствования технологии непрерывной разливки металлов в условиях достаточно высокой конкуренции как между производителями металлов, так и между производителями машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является весьма актуальной, поскольку металлургический комплекс играет важнейшую роль в экономике.

Важнейшим вопросом при этом является обеспечение высокого качества производимой продукции. На качество непрерывного слитка влияет множество различных факторов. Это и химический состав, и наличие разнообразных включений, и геометрические параметры конструкции, и качество поверхностей металлургического оборудования, и применяемые шлакообразующие смеси и многое другое. Весьма важную роль в формировании кристаллической структуры играют гидродинамические и теплофизические процессы в жидкой фазе и в двухфазной зоне затвердевающего слитка. Для совершенствования технологии непрерывной разливки необходимо изучение всех этих факторов.

Одним из актуальных направлений является изучение процессов тепло- и массопереноса при непрерывной разливке. Математические и основанные на них компьютерные модели тепловых процессов при непрерывной разливке металлов могут использоваться как на этапе разработки конструкции МНЛЗ, так и на этапе выработки наиболее рациональных параметров технологического процесса.

Актуальность исследования проблемы прогнозного моделирования тепловых процессов при непрерывной разливке металлов также связана с тем, что в настоящее время в управление технологическим процессом всё больше включается компьютер, и компьютерный расчёт при этом должен

выполняться так быстро, чтобы оставалось достаточно времени для отработки рассчитанного управляющего воздействия исполнительными механизмами и затем для наблюдения реакции системы. В связи с этим можно утверждать, что диссертация Ивановой Анны Александровны найдет применение в практике конструирования машин непрерывного литья, а также в разработках АСУТП, обеспечивающих высокое качество металлургической продукции.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Теоретические исследования диссертационной работы основаны на методах математической физики, вычислительной математики, математического моделирования, теплофизике затвердевания металлов и сплавов и методах обработки экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе, проводились в лабораторных и промышленных условиях. Изучены темплеты металлов и сплавов, полученные во время реального производственного процесса на различных машинах непрерывного литья. Определение коэффициентов теплоотдачи под форсунками, распыляющими водо-воздушную смесь, проводилось на специально разработанных для этого фирмой КОРАД (г. Москва) установках. Для формализации и моделирования были сделаны адекватные допущения. Экспериментальные данные обработаны в соответствии со стандартными требованиями. Они достаточно хорошо согласуются как с результатами вычислений, представленными в диссертационной работе, так и с данными, представленными в литературных источниках.

Все, выполненное в диссертации, исследования прошли апробацию на научных семинарах и международных научных и практических конференциях. Полученные результаты широко представлены публикациями в научных журналах. 13 статей опубликовано в научных журналах, входящих в международную наукометрическую базу Scopus.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в диссертационной работе Ивановой Анны Александровны, обеспечивается использованием современных общепризнанных научных теорий и моделей затвердевания металлов и сплавов, конвективного и лучистого теплообмена, строгостью применяемого математического

аппарата, корректностью обработки экспериментальных данных с использованием инструментов математической статистики и удовлетворительной корреляцией результатов вычислительных экспериментов с данными, полученными в лабораторных и промышленных условиях.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений, и в качестве наиболее значимых результатов, выдвинутых Ивановой А.А., на мой взгляд, следует считать такие:

1. Разработана математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с определением положения границ двухфазной зоны по условиям Стефана, сформулированным отдельно для ликвидуса и солидуса, которая позволяет рассчитывать геометрию двухфазной области, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода.
2. Выполнено системное сопоставление моделей температурного поля с расчётом границ фазового перехода по условиям Стефана, по квазиравновесной модели, по методу введения функции состава гетерогенной смеси, а также по разработанному новому методу нахождения положения двухфазной зоны внутри непрерывного слитка.
3. Получили развитие методы диагностики теплового состояния кристаллизатора и части слитка, находящейся в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ, основанные на прогнозной модели, включающей решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с условиями Стефана и граничными условиями третьего рода, в которых введена специальная величина коэффициента теплопередачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде, определяемая в режиме реального времени из плотности теплового потока, итогового коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора.
4. Предложена методика определения рационального с точки зрения минимизации температурных градиентов размещения форсунок вдоль технологической линии вторичного охлаждения, заключающаяся в нахождении рационального распределения температуры вдоль поверхности слитка и определении соответствующего распределения коэффициента теплоотдачи по ширине слябовой МНЛЗ путем решения обратной задачи

теплопроводности с учетом фазовых превращений в слитке с помощью разработанной математической модели.

5. Усовершенствована методика определения оптимальных расходов воды в ЗВО путём замены алгоритмов разомкнутого управления и/или регулирования прогнозными расчётами, дающая возможность максимально строгого соблюдения температурного режима непрерывного слитка при управлении вторичным охлаждением в переходных процессах разливки, а также имитационного моделирования на этапе проектирования конструкции и системы автоматического управления МНЛЗ.

Практическая значимость работы состоит в том, что

1. Проведённый системный анализ различных подходов в моделировании позволяет выбрать наиболее подходящий с точки зрения конкретной задачи метод учёта тепловыделения при кристаллизации для определения текущей конфигурации области непрерывного слитка, содержащей одновременно жидкую и твёрдую фазы металла.

2. Разработанный способ вычисления положения неизвестной границы фазового перехода в задаче Стефана, позволяет производить расчёты быстрее, чем в режиме реального времени, что делает возможным использование соответствующей математической модели в системе автоматического управления производственным процессом непрерывной разливки.

3. Исследования поведения формы двухфазной зоны и глубины жидкой лунки в зависимости от динамики процесса разливки позволяют вырабатывать рекомендации по подбору конструктивных и технологических параметров при разработке новых, а также модернизации существующих МНЛЗ, с целью повышения производительности при наиболее строгом соблюдении требований к температурному режиму разливки.

4. Определены пригодные для использования при управлении процессом разливки характеристики температурного поля непрерывного слитка (а именно - средние температуры поверхности на участках влияния секций ЗВО), которые наиболее чувствительны к изменениям управляющих параметров (расходов охлаждающей воды) и соответствующие технологическим требованиям обеспечения качественной продукции.

5. На основе предложенной методики расчета рациональных параметров форсуночного охлаждения могут быть автоматически подобраны такие конструктивные параметры форсуночного охлаждения в ЗВО, которые будут соответствовать наименьшим термическим напряжениям, а, следовательно, обеспечивать наилучшее возможное качество металла, производимого машиной непрерывного литья заготовок.

6. Разработанная методика, основанная на математическом моделировании температурного поля и анализе качественного поведения кривых скорости продвижения изотермы ликвидус и температурных градиентов на границе фазового перехода, позволяет определять режимы функционирования МНЛЗ для формирования необходимой кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки.

Результаты исследований нашли практическое применение, что подтверждается двумя актами об использовании на производстве результатов исследовательских работ: от ЗАО "КОРАД" (Москва), и от Филиала №2 Енакиевского металлургического завода ЗАО «ВТС» (Енакиево).

Замечания

1. В моделях, рассматриваемых в диссертационной работе, не учитываются гидродинамические процессы в жидком металле, обусловленные тепловой, концентрационной, гравитационной конвекциями, а также механическим воздействием заливочной струи, в то время как они оказывают существенное влияние на физико-химическую структуру слитков. К сожалению, в математических моделях не описываются диффузионные процессы, которые определяют ликвационные явления, и в итоге химическую неоднородность металла.

2. Определение доли твердой фазы с помощью равновесного правила рычага (2.28) является весьма приближенным методом. В настоящее время имеются более точные подходы, например уравнение Никитенко Н.И.

3. По-моему следовало бы большее внимание уделить вопросам устойчивости, сходимости и точности применяемых в расчётах разностных схем.

4. По приведённым в диссертационной работе результатам вычислений затруднительно оценить степень адекватности предложенной модели с вычислением границ двухфазной зоны по двум условиям Стефана. Отсутствуют чёткие критерии оценки такой адекватности.

5. В результатах сравнительного анализа моделей ДФЗ приводится только качественная оценка в отношении погрешностей методов, тогда как для принятия решений большой интерес представляет количественная оценка.

6. Излишне подробно изложен материал по современному состоянию проблемы диагностики температурного поля кристаллизатора.

7. В главе 3 на рис. 3.6 и 3.9, изображающих профиль температуры поверхности слитка, отчетливо просматривается наличие нескольких точек перегиба (в районе 0,08 м и 0,25 м), но не приводятся пояснений данному

эффекту, тогда как при использовании коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде, определяемого на базе средних значений коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, появление характерных перегибов температуры поверхности требует объяснения.

8. В главе 4 рассматривается вопрос чувствительности положения жидкой лунки от параметров разлива. В то же время не приводятся наглядных графических зависимостей глубины жидкой лунки в зависимости от расхода воды $f(G)$, или глубины жидкой лунки в зависимости от скорости разлива $f(v)$. Определение чувствительности положения жидкой лунки по представленным графикам распределения толщины корки по длине вытягивания затруднено.

9. В той же главе дана достаточно приближенная оценка погрешности измерения диаметра жидкой лунки, проходящей в порезку при превышениях скорости вытягивания слитка, а в диссертации в списке литературы отсутствуют ссылки на ГОСТы, в соответствии с которыми проводились экспериментальные исследования и обработка результатов этих исследований.

10. В главе 6 не приведены расчёты, подтверждающие непригодность использования величины среднемассовой температуры слитка в качестве критерия качества.

11. В главе 7 приведены уравнения энергетического баланса системы между мгновенным скрытым тепловыделением и теплом, отбираемым через контактный слой, но не указано, как определяется коэффициент теплопроводности контактного слоя.

12. Несмотря на большое количество предложенных автором диссертационного исследования технических решений инновационного уровня, отсутствуют патенты на изобретения и на полезные модели, что могло бы повысить значимость работы.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Ивановой Анны Александровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований и разработок решены важные научные и технические задачи анализа существующих методов моделирования температурного поля непрерывного слитка; разработки новых методов моделирования температурного поля с определением положения в нём двухфазной зоны; разработки прогнозной модели для определения рациональных параметров охлаждения кристаллизатора;

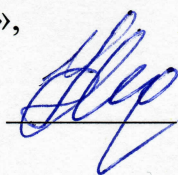
исследования поведения границ фазового перехода в кристаллизующемся металле в зависимости от динамики процесса разливки; разработки методики рационального размещения форсунок в ЗВО; определения числовых характеристик теплового поля, которые могут служить критериями качества непрерывного слитка; определения оптимальных для повышения качества продукции режимов расхода воды в ЗВО при переходных процессах; исследования влияния тепловых режимов на формирующуюся кристаллическую структуру непрерывного слитка.

Эти результаты имеют большое значение для развития новых технологий в непрерывной разливке металлов.

Все сделанные в настоящем отзыве замечания являются рекомендациями для дальнейших исследований и ни в коей мере не снижают ценности диссертационной работы.

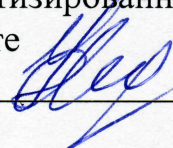
Диссертационная работа Ивановой Анны Александровны соответствует паспорту научной специальности 05.14.04 – “Промышленная теплоэнергетика”, отвечает всем требованиям п. 2.1 “Положения о присуждении учёных степеней”, а также всем требованиям Высшей аттестационной комиссии, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени доктора технических наук. Автор диссертации Иванова Анна Александровна заслуживает присуждения ей учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – “Промышленная теплоэнергетика”.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии»,
ГОУ ВПО «Донецкий
национальный университет»,



Недопекин Федор Викторович

Я, Недопекин Федор Викторович, согласен на автоматизированную
обработку персональных данных, приведенных в этом документе



Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Донецкий национальный университет»,

Адрес: 283001, г. Донецк-01, ул. Университетская, 24

Тел.: +38(062) 302-06-00

Эл. почта: donnu.rektor@mail.ru

Адрес сайта: <http://donnu.ru/>



УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

.Н. МИХАЛЬЧЕНКО