

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»,
д-р техн. наук, профессор



Евтушенко Е. И.

«25» октября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Ивановой Анны Александровны на тему «Прогнозное моделирование тепловых процессов при непрерывной разливке металлов», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Актуальность для науки и практики

Актуальность темы определяется недостаточной разработкой вопросов теоретического, компьютерного и экспериментального исследования механизмов и закономерностей тепло- и массопереноса в задачах определения тепловых взаимосвязей между металлургическим оборудованием и непрерывным слитком в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО), а также способов оптимизации параметров тепловых технологических процессов кристаллизации непрерывных слитков в МНЛЗ при динамических режимах. Одной из наиболее сложных и важных задач улучшения качества продукции технологического процесса непрерывной разливки является повышение структурной однородности получаемой заготовки. Наиболее эффективным научным инструментом для решения инженерных задач является метод компьютерного моделирования, который основывается на математических методах и позволяет заменить дорогостоящие натурные эксперименты, проводимые при разработке и проектировании новых МНЛЗ, а также во время пуско-наладочных работ. Использование прогнозных моделей позволяет в режиме производственного функционирования МНЛЗ подбирать наиболее рациональные в текущий момент времени управляющие параметры технологического процесса непрерывной разливки.

Основное внимание диссертационной работы уделено исследованию важной проблемы прогнозного моделирования тепловых процессов в непрерывнолитой заготовке, влияющей в итоге на организацию технологического процесса и в итоге на качество производимой металлургической продукции.

Установлено, что практически отсутствуют исследования по системному анализу особенностей моделирования процесса затвердевания металла при помощи различных подходов. В связи с этим при решении конкретной практической задачи возникает проблема выбора структуры модели, в частности, с соблюдением требований к прогнозным моделям. При этом остаётся актуальной задача разработки новых способов моделирования поля температур с наличием фазового перехода, снимающих проблемы ограничения величины расчётного шага по времени.

Для практического использования математических моделей определения температурного поля слитка необходимо решить задачу соответствия задаваемых граничных условий теплообмена реальным условиям протекания процесса. Кроме того, открытой является проблема восстановления граничных условий теплообмена для моделирования теплового состояния заготовки в режиме реального времени. При разработке прогнозной модели нужно определить чувствительность формы жидкой лунки к параметрам математической модели, которые в силу ограниченности информации могут быть заданы неточно.

При решении задачи проектирования форсуночного охлаждения необходимо идентифицировать коэффициент теплоотдачи как параметр граничных условий, зависящий от выбора типа форсунок и способа их размещения в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Для того чтобы по критерию оптимальности распределения температуры поверхности слитка под форсунками в ЗВО решать задачу оптимизации форсуночного охлаждения, необходима прогнозная модель, которая позволит проводить такую оптимизацию не только на этапе конструирования, но и непосредственно во время процесса разлива на МНЛЗ, имеющих регулировку позиционирования форсунок. Для выбора рационального распределения расходов воды в ЗВО в переходных режимах необходима прогнозная математическая модель, включение которой в контур управления позволит соблюдать необходимый температурный режим поверхности слитка.

Повышение качества непрерывнолитой заготовки при определённой кристаллической структуре является одной из наиболее сложных и важных задач. Для выработки соответствующих режимов разлива необходима прогнозная математическая модель, позволяющая определять динамику изотермы ликвидус внутри заготовки, а также вычислять температурные градиенты вблизи границ фазового перехода.

Таким образом, представленные в работе направления развития теории и методов моделирования механизмов и закономерностей процессов теплопереноса для оперативного наблюдения и оценки тепловых процессов кристаллизации слитков являются существенным вкладом в разработку научных и практических основ совершенствования технологии непрерывной разлива.

Основные научные результаты и их значимость для науки и производства.

Основные научные результаты, полученные автором:

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. Предложена методика расчёта положения границы раздела фаз, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи фазового перехода по специальному равномерному шаблону, который позволяет устанавливать для расчёта положения границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур.

3. 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. Проведённый анализ 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.

4. 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.

5. Впервые определены средние температуры поверхности на участках влияния секций ЗВО как числовые характеристики температурного поля, обоснована рациональность их использования с точки зрения чувствительности к изменениям управляющих параметров процесса разлива и на их базе разработана методика оценки температурного состояния слитка, как на этапе проектирования, так и в процессе функционирования системы автоматического управления МНЛЗ.

6. Впервые предложена методика определения оптимального с точки зрения минимизации температурных градиентов размещения форсунок вдоль технологической линии вторичного охлаждения, заключающаяся в нахождении оптимального 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.

7. 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 разлива, а также имитационного моделирования на этапе проектирования конструкции и системы автоматического управления МНЛЗ.

8. Разработана новая методика, основанная на математическом моделировании температурного поля и анализе качественного поведения кривых скорости продвиже-

ния изотермы ликвидус и температурных градиентов на границе фазового перехода, позволяющая определять режимы функционирования МНЛЗ для формирования необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

Значимость для науки результатов исследований заключается в том, что разработаны новые перспективные направления развития теории и методов моделирования механизмов и закономерностей процессов теплопереноса для оперативного наблюдения и оценки теплового состояния кристаллизующихся слитков. Новые разработки позволяют исследовать закономерности формирования непрерывнолитой заготовки как на этапе разработки технологии и проектирования машин непрерывного литья, так и непосредственно во время производственного процесса разлива. Полученные теоретические выводы дают основание для совершенствования методики прогнозирования тепловых процессов с наличием фазовых переходов.

Практическое значение результатов работы определяется тем, что разработка прогнозных моделей делает возможным использование их в системе автоматического управления производственным процессом непрерывной разлива. Системный анализ различных подходов в моделировании позволяет выбирать структуру математической модели, наиболее соответствующую требованиям конкретной практической задачи, в частности быстроедействие для прогнозных моделей, вычисление производных при расчётах скоростей и температурных градиентов или имитационное моделирование, замещающее натурные эксперименты. Прогнозная модель, основанная на данных системы диагностики о текущих значениях плотности теплового потока, 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, позволяет в режиме реального времени определять тепловое состояние слитка в кристаллизаторе и стенок кристаллизатора. Математическая модель положения двухфазной зоны внутри слитка может функционировать параллельно с реальным процессом разлива и позволяет рассчитывать толщину формирующейся оболочки слитка и длину жидкой фазы вдоль технологической оси, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода и на основе этих данных принимать оперативные решения по изменению технологических параметров. На основе предложенной методики расчета оптимальных 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. Разработана методика, позволяющая определять оптимальные режимы расхода воды в ЗВО при переходных процессах в разливе.

Представленные результаты нашли применение в теоретических и экспериментальных исследованиях, которые прошли проверку в промышленно-лабораторных условиях ЗАО «КОРАД» (Москва), лабораторных условиях Института металлургии и материаловедения Польской академии наук, в промышленных условиях концерна производств «Польская медь» и на Енакиевском металлургическом заводе, были внедрены или рекомендованы к внедрению на производстве ЗАО "КОРАД", и в сталелитейном производстве Енакиевского металлургического завода. Результаты диссертационной работы также могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и производством МНЛЗ, автоматизацией и разработкой режимов функционирования МНЛЗ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Считаем целесообразным продолжить работу по совершенствованию предложенных в диссертационной работе методов прогнозного моделирования тепловых процессов при непрерывной разливке металлов.

В частности, разработанные методологии могут использоваться в разработках систем автоматического управления процессом непрерывной разливки, когда измерения температур внутри слитка и в оборудовании машины непрерывного литья крайне затруднены, а зачастую и невозможны, в то время как расчёты по математическим моделям с достаточной точностью заменят данные измерительных приборов. Интересными для промышленного использования являются методы диагностики температурного поля кристаллизатора, прогнозные модели расчёта конфигурации форсуночного охлаждения и модели расчёта глубины жидкой лунки в зависимости от других параметров процесса разливки, а также модели расчёта расходов охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения при переходных режимах разливки. Они позволяют принимать оперативные решения непосредственно в ходе производственного процесса. При разработке конструкции машин непрерывного литья цветных металлов и сплавов выработанными методами полезно будет воспользоваться для организации теплового режима технологического процесса, позволяющего получать заданную макроструктуру слитков.

Общие замечания

1. Как недостаток отмечаем, что в работе не нашло отражение влияние качания кристаллизатора на интенсивность теплообмена между слитком и стенками кристаллизатора, а соответственно и на процесс формирования твёрдой корочки непрерывнолитой заготовки. Такого рода исследование позволило бы более точно установить взаимосвязь всех тепловых процессов, происходящих в кристаллизаторе и дополнительно изучить закономерности формирования макроструктуры поверхностных слоёв слитка.

2. Недостаточно проработан вопрос влияния на теплоотвод опорно-приводных роликов в зоне вторичного охлаждения. В работе представлены результаты расчётов температуры поверхности слитка, в том числе и в местах контакта слитка с опорно-

приводными роликами, однако нет детального представления самого характера контакта между двумя данными поверхностями (например, площади контакта при изменяющихся параметрах температурного поля слитка, проскальзывание роликов и т.п.).

3. Также в диссертации не рассматривается поле температур опорно-приводных роликов, система их внутреннего охлаждения и вопросы их возможной деформации из-за нарушения внешнего охлаждения при вне регламентном прекращении работы форсунок в зоне вторичного охлаждения.

4. Недостаточно подробно освещён процесс настройки коэффициента лучистой теплоотдачи в граничных условиях, сформулированных для поверхности непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

5. В работе не рассматриваются вопросы использования внутреннего тепла непрерывнолитой заготовки для предпрокатной обработки, к которому с целью ресурсосбережения всё чаще прибегают производители металлургической продукции в различных странах. При разработке технологического регламента литейно-прокатных агрегатов необходимо иметь достаточно точную информацию о температурном поле непрерывнолитой заготовки, получаемой на МНЛЗ.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, на актуальную тему прогнозного моделирования тепловых процессов в непрерывнолитой заготовке. Предложенные новые технические решения по исследованию и совершенствованию организации теплотехнической части процесса разливки металлов в машинах непрерывного литья заготовок и способов повышения качества металлургической продукции научно обоснованы. Результаты, полученные диссертантом, представляют значительный интерес для науки и практической разработки новых технологий производства непрерывнолитых заготовок из металлов и сплавов.

Решение проблемы прогнозного моделирования имеет важное значение для повышения качества металлургической продукции, увеличения производительности МНЛЗ различных типов, обеспечения безопасности и стабильности производственного процесса непрерывной разливки, а, следовательно, и для развития экономического потенциала Донбасса как промышленного региона.

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для металлургической отрасли, науки и практического применения при проектировании новых, а также при модернизации и эксплуатации существующих машин непрерывного литья заготовок. Полученные выводы и рекомендации теоретически и практически обоснованы.

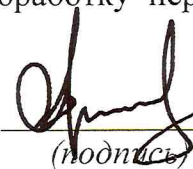
Работа отвечает требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ей учёной степени доктора технических наук по специальности Промышленная теплоэнергетика.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры "Энергетики теплотехнологии" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный техно-логический университет им. В.Г. Шухова» «25» октября 2018 г., протокол № 3 .

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры энергетики теплотехнологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова;
тел.: +7 (4722) 54-20-87; +7 (4722) 55- 71-39 (факс); +7 (4722) 550-486 (кафедра энергетики теплотехнологии) E-mail: rector@intbel.ru, kafedraett@intbel.ru (кафедра энергетики теплотехнологии)

Трубаев Павел Алексеевич

Я, Трубаев Павел Алексеевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, предоставленных в этом документе.

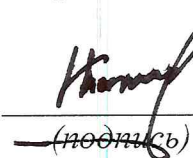


(подпись)

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры энергетики теплотехнологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова);
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова;
тел.: +7 (4722) 54-20-87; +7 (4722) 55- 71-39 (факс); +7 (4722) 550-486 (кафедра энергетики теплотехнологии); E-mail: rector@intbel.ru, kafedraett@intbel.ru (кафедра энергетики теплотехнологии)

Кожевников Владимир Павлович

Я, Кожевников Владимир Павлович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, предоставленных в этом документе.



(подпись)

Подписи Трубаева Павла Алексеевича, Кожевникова Владимира Павловича заверяю

Проректор по научной работе
БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р техн. наук. проф.



Евтушенко Е.И.