

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РАБОТЫ ЗОН ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ

О.С. Логунова

SOFTWARE FOR INTERACTIVE DESIGN AND WORK EVALUATION OF SECONDARY COOLING ZONES OF CONTINUOUS CASTING MACHINES

O.S. Logunova

В работе рассматривается постановка и решение задачи по разработке программного продукта, предназначенного для проведения научно-исследовательских работ в области металлургии черных металлов. В отличие от существующих работ в данной области автором предлагается комплексный подход, объединяющий в себе проектно-конструкторскую деятельность и математическое моделирование технологических процессов на основе компьютерных технологий. Итогом работы является программный продукт «Injector Cooling» для проведения анализа работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с произвольной конструкцией зон вторичного охлаждения (ЗВО).

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, МНЛЗ, проектирование, зоны вторичного охлаждения.

The paper considers the problem and solution of software developing for scientific researches in the domain of ferrous materials metallurgy. Unlike the existing works on this subject the author offers a complex method that combines project designing and mathematical process simulations on the base of computer technologies. The result is the software product «Injector Cooling» for operational analysis of continuous casting machines with arbitrary construction of the secondary cooling zones.

Keywords: continuous costing machine, design, secondary cooling zone.

Одним из основных факторов повышения эффективности производства непрерывного литья заготовок является обеспечение работоспособности и оптимальных технологических режимов оборудования с использованием автоматизированных систем, оснащенных современными технологическим, математическим и программным обеспечением.

Эффективность использования этого обеспечения в условиях сложных технологических процессов определяется качеством выпускаемой продукции и производительностью металлургических агрегатов, которые диагностируются и корректируются в реальном времени на основе объективно принятых решений.

Особую актуальность на современном этапе приобретает проблема разработки методологии для комплексного изучения многофакторной среды, в которой функционируют реальные металлургические агрегаты.

Одним из средств решения указанных проблем является разработка программных продуктов, которые могут быть использованы при проектировании новых агрегатов и оценки их работоспособности. В настоящее время разработано большое количество программных продуктов для САПР. Программные продукты указанного класса являются дорогостоящими и их цена для одного рабочего места в среднем превышает 100 тыс. руб. при условии тиражирования.

1. Постановка задачи разработки программного продукта «Injector Cooling»

При исследовании процессов, протекающих при высоких температурах и при больших объемах производства, зачастую невозможно выполнить их экспериментальную оценку и проследить их протекание при изменении ряда параметров. Примером такого технологического процесса является разли-

Логунова Оксана Сергеевна - к.т.н., доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова; logunova66@mail.ru.

Logunova Oxana Sergeevna - PhD, associate professor of computer science and applied mathematics department of G.I. Nosov Magnitogorsk Technical University; logunova66@mail.ru.

ка стали на машинах непрерывного литья заготовок, которые применяются на всех современных металлургических предприятиях в России и за ее пределами. Во многих работах [1-4] при математическом моделировании теплового состояния непрерывнолитой заготовки выполняется ссылка на учет конструктивных особенностей таких агрегатов. При этом условия заготовки определяются только изменением значения коэффициента теплоотдачи с поверхности, независимо от структуры построения зон вторичного охлаждения. В отличие от указанного подхода автором работы была поставлена цель разработки программного продукта «Injector Cooling», с помощью которого возможно выполнить:

- интерактивное изменение схемы расстановки форсунок по длине и ширине машины непрерывного литья заготовок;
- назначение технологических параметров работы каждой форсунки в отдельности: пространственные координаты установки форсунки над заготовкой и под ней, угол раскрытия, режим работы, расход охладителя;
- моделирование теплового состояния непрерывнолитой заготовки при построенной схеме зон вторичного охлаждения с учетом химического состава разливаемой стали;
- графическое отображение результатов конструирования зон вторичного охлаждения МНЛЗ и моделирования тепловых полей заготовки;
- организацию рабочего места инженера лаборатории контроля за прогнозированием поведения процесса непрерывной разливки стали.

2. Математическая модель описания теплового состояния заготовки при ее нахождении на технологической линии МНЛЗ

Математическая модель для описания теплового состояния заготовки включает:

- уравнение теплопроводности для двух пространственных и одной временной переменных в декартовой системе координат с учетом образования двухфазной зоны по квазиравновесной модели [1-3,5];
- начальные условия, задающие распределение температуры по сечению заготовки в момент ее перехода из кристаллизатора в зоны вторичного охлаждения;
- граничные условия третьего рода, учитывающие конвективный теплообмен поверхности заготовки с окружающей средой и использующие запись коэффициента теплоотдачи в виде временного ряда для переключающей функции:

$$\alpha' (x, \tau) = \alpha_1 (x) z_1 (\tau \leq \tau_1) + \sum_{i=2}^n \alpha'_i (x) z_i (\tau_{i-1} \leq \tau \leq \tau_i) + \alpha'_{n+1} (x) z_{n+1} \left(\tau > \sum_{i=1}^n \tau_i \right),$$

где $\alpha'_i (x)$ - распределение коэффициента теплоотдачи в i -й зоне водовоздушного охлаждения МНЛЗ

по ширине (высоте, для $j = 3$) заготовки, причем количество зон определяется конструкцией МНЛЗ: согласно технологической инструкции машины для отливки заготовок прямоугольного сечения, действующей в условиях ОАО «ММК», предусмотрено восемь зон, для сортовой машины только четыре; y - индекс, определяющий номер поверхности заготовки, с которой рассматривается теплоотвод, $j=1$ - соответствует поверхности со стороны большого радиуса МНЛЗ, $j = 2$ - соответствует поверхности со стороны малого радиуса МНЛЗ, $j = 3$ - соответствует поверхности узкой грани заготовки; z_i - фиктивная переменная, определяющая наличие и подключение зоны водовоздушного охлаждения в выбранном режиме: $z_1 = 1$ - при наличии зоны и $z_i = 0$ - при ее отсутствии; τ - текущее время рассмотрения; τ_i - время прохождения i -й зоны вторичного охлаждения; α_0 - коэффициент теплоотдачи с поверхности

заготовки в зоне воздушного охлаждения; $\sum_{i=1}^n \tau_i$ - время нахождения заготовки в зоне водовоздушного охлаждения; и - количество зон вторичного охлаждения [4];

- форма области, охватываемая факелом форсунки считается эллипсообразной с размером малого радиуса, ограниченной зоной орошения между роликами проводки, и большого радиуса, определяемого высотой установки форсунки и углом ее раскрытия.

3. Функциональная схема и алгоритмы программного продукта «Injector Cooling»

В программном продукте «Injector Cooling» можно выделить три основных части:

- модуль подготовки исходных данных;
- модуль реализации математической модели теплового состояния заготовки;
- модуль графической визуализации данных.

Функциональная схема взаимодействия модулей приведена на рис. 1. Согласно схеме, приведенной на рис. 1, «Модуль ввода данных» получает в качестве исходных данных:

- сведения марочника сталей, соответствующих сортаменту цеха: ГОСТы, марки сталей, границы содержания процентного содержания примесей в стали;
- сведения, характеризующие зоны вторичного охлаждения и скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора;
- сведения о принципах построения зон вторичного охлаждения - разбиение на слои внутри зоны для одного коллектора;
- режим работы форсунок в каждой зоне: статус включено/выключено, расход охладителя на зону/форсунку, высота установки, угол раскрытия факела форсунки и координаты установки по ширине.

Работа с модулем производится в интерактивном режиме. Наибольшую сложность в реализации

этого модуля вызвал алгоритм размещения форсунок на шаблоне зон вторичного охлаждения, позволяющий организовать добавление форсунок, удаление форсунок, корректировку места расположения в шаблоне.

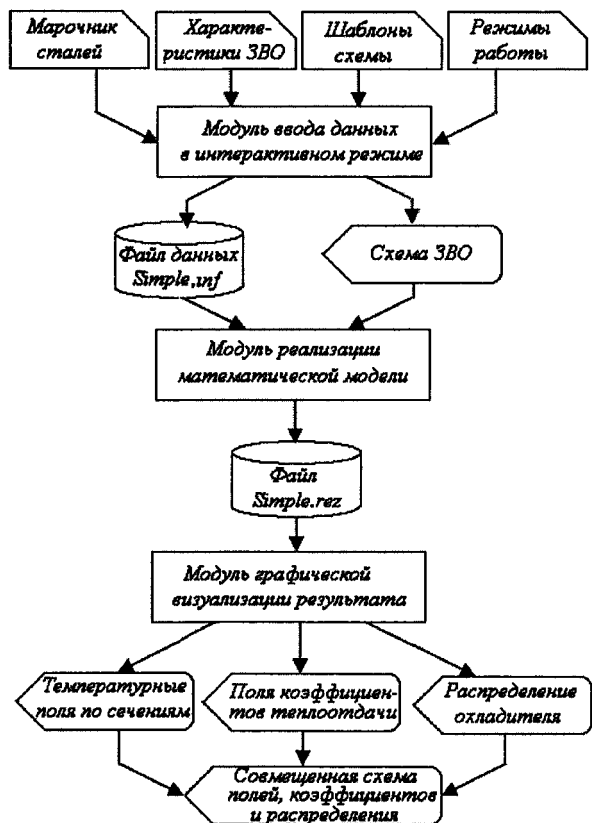


Рис. 1. Функциональная схема взаимодействия основных модулей программного продукта «Injector Cooling»

Результатами работы модуля являются: файл инициализации данных Simple.inf для модуля реализации математической модели в автоматическом режиме и новая схема расположения форсунок по длине и ширине МНЛЗ в формате JPG.

В модуле реализации математической модели теплового состояния заготовки был использован алгоритм решения уравнения теплопроводности на основе явной конечно-разностной схемы при выполнении условия сходимости решения. Время работы модуля составляет 30-60 мин в зависимости от количества разбиений по осям пространственных координат. В результате работы модуля формируется файл текстового формата, содержащий значения температур по поперечному сечению заготовки. Размер выходного файла составляет до 80 МБ. Работа модуля производится в пакетном режиме.

Модуль графической визуализации данных предназначен для отображения результатов реализации математической модели и позволяет выполнить совмещение всех используемых элементов в единое целое для принятия решения о возможности и рациональности использования новой схемы

расстановки форсунок. Наибольшую сложность в реализации данного модуля составил алгоритм сопоставления числовых дискретных значений температур по сечению заготовки, полученных с заданным шагом по введенной сетке, с непрерывной цветовой шкалой температур калия стали. Указанная задача решалась сглаживаем температурных полей между двумя точками по осям сечения, что приводит к «растяжению» файла с температурными полями до 200 МБ.

Программный продукт реализован в среде Delphi 7.0 и работает как независимое приложение.

4. Пример эксплуатации программного продукта «Injector Cooling»

Наиболее интересным с точки зрения реализации являются моменты интерактивного размещения форсунок на шаблоне зон вторичного охлаждения (рис. 2) и отображения результатов моделирования в графическом режиме (рис. 3).

Построение новой схемы ЗВО является наиболее трудоемким процессом в эксплуатации программного продукта «Injector Cooling». Проектировщик обязан определить тип используемых форсунок или создать новый, и разместить на шаблоне схемы. Контролируется положение форсунок в поле сканирования и настраивается режим работы каждого вертикального ряда форсунок. Так же контролируется покрытие факелом форсунки поверхности заготовки. Этот контроль обуславливается дополнительное определение коэффициента теплоотдачи при перекрытии факелов форсунок или не полном покрытии поверхности заготовки.

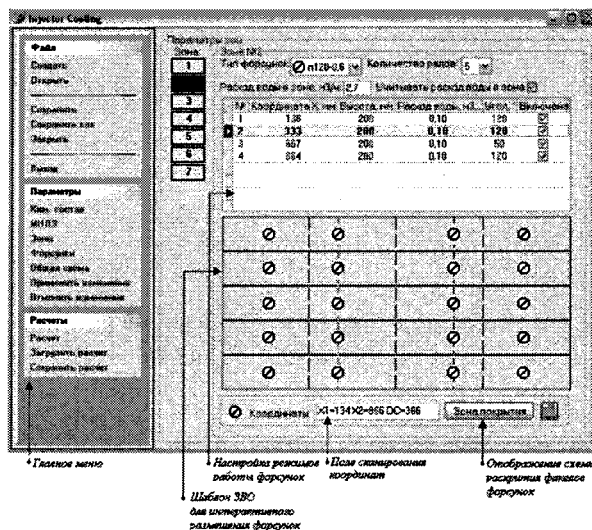


Рис. 2. Вид рабочего окна для интерактивного формирования схемы форсунок

В автоматизированном режиме проводится отображение результатов моделирования тепловых полей заготовки по трем плоскостям (см. рис.3).

На основе графического отображения могут быть определены:

- области разогрева или переохлаждения поверхности заготовки, которые оказывают влияние на формирование неравномерных температурных полей во внутренних слоях и способствуют формированию как внутренних так и поверхностных дефектов [5-7];
- границы фаз во внутренней полости заготовки: затвердевшей, жидкой и двухфазной по положению линий ликвидус-солидус;
- выполнить сопоставление температурных полей заготовки в любом сечении с параметрами теплообмена и конструкцией ЗВО.

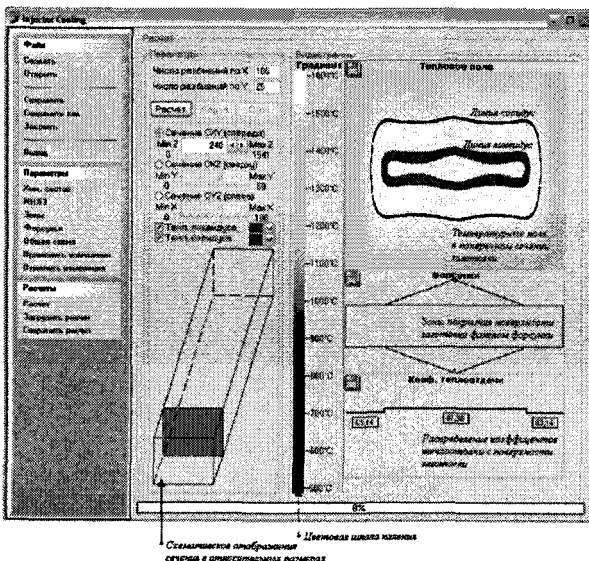


Рис. 3. Пример графического отображения результатов моделирования теплового состояния заготовки для перпендикулярного сечения по новой схеме ЗВО

Закключение

Таким образом, в представляемой работе выполнены:

- постановка задачи на разработку программного продукта, способного объединить в себе возможности проектно-конструкторской деятельности и математическое моделирование процесса непрерывной разливки стали;
- разработка математической модели для описания теплового состояния заготовки и ее реализация в алгоритмическом и программном виде;
- разработка программного продукта «Injector Cooling», использование которого в научно-исследовательской работе позволяет анализировать и диагностировать работу действующих и проектирующихся машин непрерывного литья заготовок.

Результаты, полученные в ходе эксплуатации программного продукта, были использованы при решении задачи многокритериальной оптимизации [8-10] для выбора оптимальных режимов втори-

ного охлаждения и оптимальной конструкции машины непрерывного литья заготовок, способствующих повышению производительности агрегата без снижения качества готовой продукции.

Литература

1. Борисов, В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка / В. Т. Борисов. - М.: Металлургия, 1987. - 406 с.
2. Флеминге, М Процессы затвердевания / М. Флеминге. - М.: Мир, 1977. - 424 с.
3. Журавлев, В. А. К теории формирования непрерывного слитка / В. А. Журавлев // В сб. Непрерывная разливка стали. - М.: Металлургия, 1974. - №2. - С. 29-35.
4. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л. В. Буланов, Е. П. Корзунин, Е. П. Парфенов и др. - Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы - «Марат», 2004. - 320 с.
5. Математическое моделирование макроскопических параметров затвердевания непрерывных слитков / О. С. Логунова, Д. Х. Девятое, И. М. Ячиков, А. А. Кирпичев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. - 1997. - №2. - С. 49-52.
6. Определение областей непрерывнолитой заготовки с наибольшей вероятностью нарушения сплошности металла / О. С. Логунова и др. // Вестник УГТУ - УПИ. На передовых рубежах науки и инженерного творчества: труды III Международного научно-практического конференции региональной УрО Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2004. - № 15(45), 4.1. - С. 95-98.
7. Логунова, О. С. Стохастическая модель качества непрерывнолитой заготовки / О. С. Логунова // Сталь. - 2005. - №12. - С. 21-23.
8. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 4202. Блочный алгоритм неградиентного метода случайного поиска с операторами адаптации для оптимизации вторичного охлаждения непрерывнолитой заготовки / О. С. Логунова. - М.: ВНИИЦ, 2005. - № 50200500020.
9. Логунова, О. С. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации теплового состояния непрерывной заготовки / О. С. Логунова // Математические методы в технике и технологиях: труды XX Международной научной конференции «ММТТ-20». - Ярославль: Изд-во Ярославского ГТУ, 2007. - Т. 2. - С. 19-23.
10. Пат. 2229956 Рос. Федерация : МПКВ22 D 11/124 Способ непрерывного литья заготовок на машинах криволинейного типа / А. А. Морозов, Р. С. Тахаудтинов, А. Ф. Сарычев, А. В. Фурманов, Е. В. Кебенко, О. А. Николаев, С. В. Горосткин, В. В. Павлов, О. С. Логунова.

Поступила в редакцию 21 октября 2007 г.