

0-793596

ЯНИШЕВСКАЯ АННА ГЕНРИХОВНА

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЛИТЬЯ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

А.Я. Янишев

Омск – 2009



Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет".

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор
Коростелев Владимир Федорович

доктор технических наук
Луконин Вадим Павлович

доктор технических наук, доцент
Рауба Александр Александрович

Ведущая организация: ФГУП ОмПО "Иртыш", г.Омск

Защита диссертации состоится 14 октября 2009 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.01 при Владимирском государственном университете по адресу: 600000, г.Владимир, ул. Горького, 87, ауд. 211-1

Автореферат размещен на сайте www.vak.ed.gov.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Автореферат разослан 3 сентября 2009 г.



0000802287

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор, д.т.н.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'R.I. Makarov'.

Р.И.Макаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации изложены опубликованные, апробированные и внедренные в практику автоматизации проектирования процессов электрошлакового литья за период 1986-2009 гг. основные научные положения и результаты решения важной для условий современной России научной проблемы создания методов автоматизации проектирования специфического производства. Исследование выполнено в кругу научных идей автора и базируется на трудах по разработке и использованию информационных систем, металлургии, автоматизации проектирования. Этим вопросам уделяли внимание М.В. Бурлаков, А.П.Костров, В.А. Веников, Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко, А.В. Гордеев, П.П. Арсентьев, Л.А. Коледов, Г.Ф. Баландин, В.И. Багтизманский, В.Н. Карножицкий, В.Н. Бороненков, С.М.Шанчуров, С.И. Попель, Ю.П. Никитин, Л.Н. Бармин, Б.Е.Патон, Б.И. Медовар, Ю.В. Орловский, Ю.В. Латаш, В.Л.Артамонов, Ю.А.Шульте, М.П. Собакин, Я.Л. Вербицкий, А.Е. Гончаров, В.А. Ефимов, Г.И. Жмойдин, М.М. Ключев, А.Ф. Каблуковский, С.Е. Волков, Б.И. Кубрак, Б.М. Лепинских, В.И. Махненко, Г.С. Маринский, В.Л. Шевцов, А.К.Цыгуленко, В.С. Моисеев, В.И. Данков, И.И. Багаев, О.Д. Молдавский, И.П. Норенков, А.П. Огурцов, И.А. Миленький, С.Е. Самохвалов, В.А. Олейник, О.А.Есин, А.Л. Тихоновский, В.А.Судник, Б.Я. Советов, С.А. Яковлев, Б.С. Чуркин и др. Вместе с тем, не все теоретические результаты этих работ могут быть непосредственно использованы в практике автоматизации проектирования, что обусловило необходимость дальнейших исследований.

Актуальность проблемы. Интенсивное развитие различных областей новой техники авиационной, ракетно-космической, атомной, поставило перед металлургами задачу получения сталей и сплавов с заданным сочетанием служебных свойств, например, очень высокой прочности при одновременно высоких пластичности и вязкости. Большие возможности в этом отношении открывает использование электрошлаковой технологии. Основные пути повышения качества электрошлакового металла и эффективности электрошлаковой технологии - использование особо чистого исходного металла, максимальная интенсификация процесса электрошлакового рафинирования, всемерное улучшение экономических показателей.

В конце 70 - 80-х годов XX века для оборонной промышленности остро стала проблема о дефиците таких металлов, как W, Mo, Pt, Ni, Ti, Cr, V и их сплавов. Эта проблема оказалась неразрешимой для большой металлургии. Получение таких сталей и сплавов стало возможным благодаря развивающему новому направлению в металлургии, возникшему в это время в ИЭС им. Е.О.Патона - электрошлаковому литью.

В настоящее время все большее распространение получает концепция управления предприятием на основе понятия жизненного цикла изделия, под которым понимают интервал времени от момента осознания потребности в изделии до момента окончания его обслуживания у пользователя.

Развитие промышленного производства характеризуется широким внедрением новейших достижений науки и техники, обеспечивающих повышение технико-экономической эффективности производства для получения конкурентноспособной продукции. Сокращение сроков выполнения заказов на электрошлаковое литье (ЭШЛ) во многом зависит от длительности и трудоемкости стадии проектирования процесса.

Разработка методов прогнозирования химического состава металла отливки дает возможность оптимизации процесса электрошлакового литья еще на стадии проектирования путем подбора таких составов металла и шлака и режимов процесса, которые обеспечивают заданный состав литого металла. Прогнозирование процессов кристаллизации металла и шлака и вероятность возникновения деформаций и напряжений в форме позволяют подбирать конфигурации кристаллизаторов, удовлетворяющих всем технологическим и экономическим требованиям.

Создание подобных методов важно и в теоретическом отношении, поскольку близость расчетных и опытных данных является подтверждением адекватности принятой расчетной схемы физической картине взаимодействия фаз при электрошлаковом литье.

Автоматизация проектирования является весьма сложной проблемой, которая включает в себя достижения в рассматриваемой предметной области, связанные с математическим описанием процессов, математическим моделированием, использованием информационных технологий.

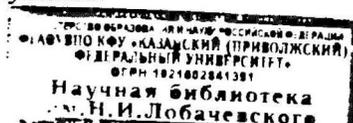
Автоматизация проектирования процесса в данной диссертации рассматривается как интегрирующее звено, связывающее все этапы подготовки и реализации ЭШЛ в единую систему.

Развитие вычислительной техники, ее доступность позволяют в настоящее время решать сложные задачи анализа физико-химических процессов в металлургических системах, в частности, анализа равновесия и кинетики процессов при большом числе одновременно протекающих реакций, оптимизации процесса кристаллизации металла отливки в форме. В диссертации развитие программных средств автоматизации проектирования представлено несколькими направлениями: создание программ для моделирования физико-химических процессов при электрошлаковом литье и прогнозирования химического состава металла отливок; разработка универсальных средств создания чертежных средств, предназначенных для изготовления чертежей; создание программных средств автоматизации расчетных работ; а также создание интегрированных систем автоматизации проектирования.

Данная работа направлена на разработку автоматизации проектирования процесса электрошлакового литья на основе анализа и математического моделирования.

В диссертации исследуются процессы автоматизации проектирования процессов электрошлакового литья.

Таким образом, решая эту проблему можно утверждать, что она в настоящее время является весьма *важной и актуальной*.



Цель работы и предмет исследования. Целью работы является повышение качества отливок, полученных электрошлаковым литьем на основе автоматизации проектирования процессов электрошлакового литья, исследования и математического моделирования расплавления, химических реакций, кристаллизации при электрошлаковом литье легированных сталей и сплавов.

Предметом исследования являются автоматизация проектирования процессов ЭШЛ, системы автоматизированного проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создать концепцию производственных систем нового поколения, охватывающую вопросы автоматизации проектирования, технологии и управления.

2. Разработать метод математического описания кинетики химических процессов при электрошлаковом литье с учётом одновременного протекания произвольного числа реакций и их взаимного влияния. Изучить влияние технологических параметров центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) на массоперенос между металлом и шлаком на различных стадиях процесса ЦЭШЛ методом «холодного» моделирования и в реальном процессе.

3. Разработать алгоритм и программы для автоматизированного проектирования процессов электрошлакового литья.

4. Осуществить проверку адекватности разработанных моделей, а также эффективность алгоритмов и программ при производстве ЭШЛ.

Методы исследований. В работе использованы методы математического моделирования, конечных элементов, теории массового обслуживания и экспертных оценок, дифференциальные системы уравнений, понятия математической логики, современные компьютерные технологии и объектно-ориентированное программирование.

Научная новизна, выносимые на защиту, их новизна:

1. Концепция производственных систем нового поколения для электрошлакового литья в отличие от аналогов, охватывающая вопросы автоматизации проектирования, технологии и управления;

2. Математический метод кинетики химических процессов при ЭШЛ, позволяющий прогнозировать химический состав металла и шлака и учитывающий одновременное протекание произвольного числа реакций и их взаимное влияние, изменение масс реагирующих элементов во времени и зависимость их от технологических параметров;

3. Разработаны для электрошлакового литья новые математические и информационные модели управления:

- математическая модель химических процессов при ЭШЛ, позволяющая прогнозировать химический состав металла изделия;

- модель лимитирующих этапов химических реакций при электрошлаковом литье, влияния технологических параметров процесса на химический состав изделия;

- модель теплофизических процессов при электрошлаковом литье в плавильной емкости и кристаллизаторе.

4. На основании результатов диссертации внедрено несколько информационных программ и учебных комплексов, на них получено 8 свидетельств о государственной регистрации программ.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях, корректным использованием математического моделирования, достаточным объемом экспериментальных исследований, полученных применением современных приборов и оборудования, обеспечивающих требуемую точность и надежность результатов, соответствием результатов расчетов и экспериментальных данных, положительным опытом внедрения на ряде промышленных предприятий.

Практическая значимость результатов работы состоит в совершенствовании автоматизации проектирования за счет внедрения системного анализа решению ряда проблем концептуального проектирования интегрированных производственных систем, который может быть использован при создании автоматизации проектирования автоматизированного производства электрошлакового литья – от общей концепции производственной системы до разработки программно-аппаратного обеспечения, а также системы моделирования технологии электрошлакового литья с использованием программы расчета химического состава отливок, а также использованием предложенной технологии в производстве в НПФ «ЭШЛ», институте физико-технических проблем экологии, "Специальные технологии", "Фланцевый завод", "Ресурсо-сберегающие технологии", ПКФ "МираМет" г. Омска. Диссертационная работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» (проект № 2.1.1/2763).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях и семинарах (1986-2009 гг.) различных уровней. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на: международной научно-технической и практической конференции «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления, "Автоматизация-97"» (Ташкент, 1997); XV международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 1999); международной конференции «Информационные технологии в инновационных проектах» (Ижевск, 1999); IV Минском международном форуме «ТЕПЛОМАССОБМЕН "ММФ-2000"» (Минск, 2000); международной конференции «Fundamental and applied technological problems of machine bilding – Technology-2000» (Орел, 2000); международной научно-технической конференции «Современные материалы и технологии - 2002» (Пенза, 2002); международной научно-технической конференции «Современные проблемы металлургического производства» (Волгоград, 2002); IX международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Донецк, 2002); II Международном технологическом конгрессе «Развитие оборонно-

промышленного комплекса на современном этапе» (Омск, 2003); III Международном технологическом конгрессе «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения» (Омск, 2005); на заседаниях кафедры «Системы автоматизированного проектирования машин и технологических процессов» Омского государственного технического университета и др.

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в 133 научных работах, среди которых в том числе: без соавторов 22 работы, в изданиях из перечня ВАК 13 статей, одна монография, два авторских свидетельства, восемь свидетельств об отраслевой регистрации разработок, одно свидетельство IV международной выставки военной техники, технологий и вооружения сухопутных войск.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на **341** страницах, и включает в себя **36** таблицу, **78** рисунков. Библиографический список содержит 266 наименований. Приложение представлено на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, сформулирована цель исследований, научная новизна, основные защищаемые положения, практическая значимость работы.

В первой главе «Анализ автоматизированных систем проектирования и процессов электрошлаковых технологий» на основании научных источников дается анализ автоматизированных систем проектирования и процессов электрошлаковых технологий.

Отмечено, что развитие новой техники в современных условиях замедляется не столько отсутствием научных достижений и инженерных идей, сколько сроками и не всегда удовлетворительным качеством их реализации при конструкторско-технологической разработке. Одним из направлений решения этой проблемы является создание и развитие *автоматизации проектирования*.

Концептуальное проектирование, конструирование, инженерный анализ и технологическая подготовка производства неразрывно связаны, поэтому их процессы иногда выполняют параллельно.

Представлен, разработанный автором, подход к созданию системы автоматизированного проектирования процессов электрошлакового литья, отражающий идею структурно-функциональной декомпозиции – основного метода анализа сложных организационно-технических систем. В его основе лежит понятие открытой системы.

Создание компьютеризированного интегрированного производства является важнейшей задачей во всех отраслях промышленности. Одним из основных результатов исследований в этом направлении явилась разработка модели расширенной производственной системы (рис. 1).

В реальных условиях схема удовлетворения потребностей сложнее и может включать в себя жизненный цикл изделия CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support – поддержка Жизненного Цикла Изделия), кроме про-

изводственного цикла, циклы распределения, потребления и утилизации изделий. Совокупность всех этих производств и образует расширенную производственную сеть для удовлетворения рассматриваемой потребности рынка.



Рис. 1. Модель расширенной производственной системы

Понятия изделия и его жизненного цикла являются центральными в рассматриваемой концепции производственной системы, они лежат в основе анализа ее организационной структуры. Более того, рассматривая само сложное изделие, как систему, можно в рамках общего подхода рассматривать задачу построения методологии проектирования, внедрения и сопровождения производственных процессов.

Жизненный цикл изделия имеет определенную структуру. Для каждого вида изделий могут существовать свои варианты структуры жизненного цикла.

Детальная разработка открытой производственной системы для электрошлакового литья, является задачей исследований. Здесь рассмотрим один из таких вариантов. Жизненный цикл разбивается на ряд фаз. В каждой фазе решаются свои специфические задачи в общем процессе создания изделий. Фазы могут частично перекрываться, что позволяет сократить сроки создания изделия и приводит к следующей декомпозиции процесса жизненного цикла:

1. Анализ и предпроектное исследование потребности в изделии.
2. Проектирование процесса.
3. Автоматизация проектирования.
4. Техническая подготовка производства изделия.
5. Производство изделия.
6. Продвижение изделия к потребителю.
7. Использование и утилизация изделия.

Однако этого недостаточно для определения функциональной структуры предприятия, постоянно создающего новые изделия. Необходима дополнительная декомпозиция по функциям управления жизненным циклом (рис. 2).

В число этих функций входят элементы, представленные на рисунке 2. Каждая функция имеет свою интерпретацию для каждой фазы. Так, например, функция изготовления в фазе технической подготовки может включать в себя изготовление опытного образца, а в фазе производства - выпуск деталей, сборочных единиц и серийных машин. Соответственно, в этих двух фазах существенно различаются требования к уровню автоматизации, методы планирования и др. В результате получается матрица задач «функция-фаза», которая фактически определяет матричную структуру предприятия.

На втором уровне декомпозиции можно рассматривать разбиение фаз на более мелкие этапы и/или уточнить список функций. В результате получается новый набор матриц. Подобная процедура декомпозиции, следующая методологии структурного анализа, носит регулярный характер, что позволяет упорядочить процесс построения организационной структуры предприятия и структурировать сам процесс управления жизненным циклом.

Автоматизированное проектирование технологических процессов литья, особенно деталей сложной конструкции и ответственного назначения, способствует сокращению сроков и снижению материальных и трудовых затрат как при технологической подготовке производства, так и в основном произ-

водстве. Высокий уровень и комплексность автоматизации проектирования обеспечивается применением рациональных расчетных методов и процедур. В свою очередь это необходимо для создания автоматизации проектирования технологических процессов.

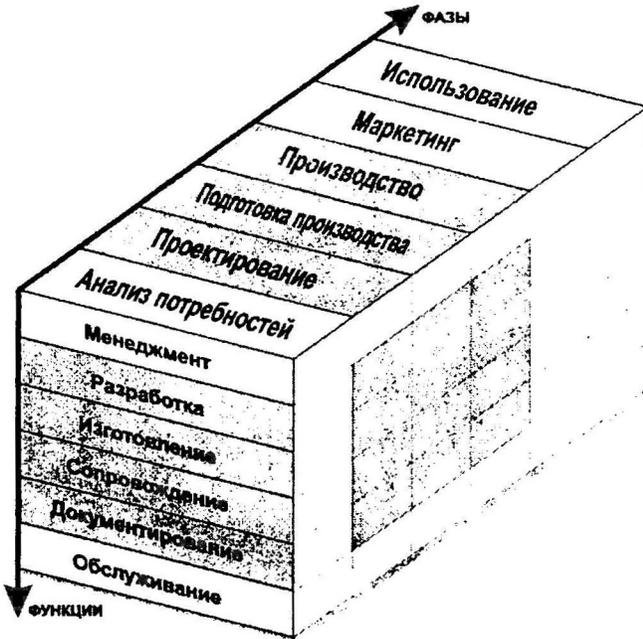


Рис. 2. Модель «функция-фаза»

В рамках предлагаемого подхода интегрированная производственная система выступает как теоретическая модель компьютеризированного интегрированного производства.

$$\forall a \exists u \{ [A(a_1, a_2, \dots, a_n) \rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_m)] \vee$$

$$\vee [A(a_1, a_2, \dots, a_n) \vee P(u_1, u_2, \dots, u_m)] \}, \quad (1)$$

где a – предметная постоянная, отражающая состав технологического оборудования и оснастки; u – предметная постоянная, отражающая технологический элемент производственного процесса; $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ – предикат состава технологического оборудования и оснастки; $P(u_1, u_2, \dots, u_m)$ – предикат производственного процесса изготовления изделия.

На промышленном предприятии, выпускающем сложные изделия, производство, как правило, функционирует по технологическому принципу.

Производство с учетом конструкторского состава изделия может быть представлено:

$$\forall a_1, \forall a_2, \dots, \forall a_1, \forall a_2, \dots, \exists \{ [A(a_1, a_2, \dots, a_n)] \vee \forall \dot{A}(\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_k)] \rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_\mu) \}. \quad (2)$$

Состав производства с учетом конструкторского состава изделия в диссертации рассматривается через призму элементарных предикатов:

$$A(a_1, a_2, \dots, a_k) \Leftrightarrow [G(g_1, g_2, \dots, g_\alpha) \& B(h_1, h_2, \dots, h_\beta) \& C(i_1, i_2, \dots, i_\nu) \& D(m_1, m_2, \dots, m_\sigma) \& E(n_1, n_2, \dots, n_\xi) \& F(s_1, s_2, \dots, s_\zeta)]. \quad (3)$$

где $G(g_1, g_2, \dots, g_\alpha)$ – предикат состава технологического оборудования и оснастки, для которых требуется введение признака “уровень готовности”; $B(h_1, h_2, \dots, h_\beta)$ – предикат нового технологического оборудования и оснастки, образованных по технологической необходимости; $C(i_1, i_2, \dots, i_\nu)$ – предикат “мнимых сборок”, которые исключаются из состава технологического оборудования и оснастки, как самостоятельные единицы; $D(m_1, m_2, \dots, m_\sigma)$ – предикат, учитывающий замену материала для изделия по экономико-производственной необходимости; $E(n_1, n_2, \dots, n_\xi)$ – предикат вариантов исполнения технологического оборудования и оснастки, необходимость которых вызвана требованиями заказчика; $F(s_1, s_2, \dots, s_\zeta)$ – предикат состава технологического оборудования и оснастки, учитывающий только номенклатуру нормализованных и стандартизованных деталей и узлов.

Конечно, в производстве другого предприятия могут появляться предикаты, отличные от рассмотренных (3).

Учитывая то, что объем информации, содержащий сведения о составе сложного технологического оборудования и оснастки является одним из наиболее крупных и постоянно используемых в решении задач автоматизации проектирования, проблема минимизации его становится весьма актуальной.

Множество, представляющее собой область рабочего поля магнитного носителя, на котором записан объединенный массив состава технологического оборудования и оснастки и технологического маршрута изготовления изделия, можно выразить следующим неравенством:

$$M_{\sigma\mu} \Leftrightarrow M_\sigma \& M_\mu, \quad (4)$$

где M_σ – подмножество элементов поля состава технологического оборудования и оснастки; M_μ – подмножество элементов поля технологического маршрута изготовления изделия в производстве.

Подмножество M_{σ} (4) выражается функциональной зависимостью

$$M_{\sigma} = Cf(A_i, A_{\xi}, W_{\xi}), \quad (5)$$

где A_j - шифр технологического оборудования и оснастки; A_{ξ} - шифр i -ой оснастки, входящей в i -е технологическое оборудование; W_{ξ} - входимость j -й оснастки в i -е технологическое оборудование, шт.; C - постоянная величина, зависящая от принадлежности j -й оснастки или технологического оборудования к соответствующему ряду (оригинальных, нормализованных, стандартизованных и т.д.); учитывает усредненную величину шифра соответствующего вида технологического оборудования и оснастки и зависит от шифра цеха.

$$C = f(P_v, Z_v), \quad (6)$$

где P_v - величина, объединяющая важность и значимость шифра технологического оборудования и оснастки, принадлежащей к соответствующему виду; Z_v - величина шифра цеха.

Подмножество поля M_{μ} можно записать как

$$M_{\mu} = f(A_{\xi}, Z_v, j, Z_{0j}) \text{ при } j \in (1, k), \quad (7)$$

где k - количество этапов ($Z_v \rightarrow Z_0$) маршрута движения i -ого изделия; Z_v, Z_0 - величина шифра цеха соответственно.

Построение объема информации, записанной на магнитном носителе через максимально допустимые области, зарезервированные под эти цели упрощает построение модели. Однако это приводит к появлению пустых фрагментов на магнитном носителе, темп роста которых отражен зависимостью:

$$T_{\xi}(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta x}, \quad (8)$$

где Δm - приращение фрагментов пустого поля на магнитном носителе области множества $M_{\sigma\mu}$; Δx - пустые символы в шифре изделия, а густое поле магнитного носителя области множества $M_{\sigma\mu}$ от файла состава технологического оборудования и оснастки описывается выражением

$$M_{\rho\sigma}^n = \int_{\xi=0}^n T_{\xi}(x) dx \text{ при } \xi \in \{0, n\}. \quad (9)$$

Предлагаемая модель производственной системы, опираясь на созданную ранее, учитывает декомпозицию конструкции изделия, которая используется для автоматизации проектирования изделий и может быть использована также для описания и формализации специфики технологии изготовления этих изделий, что необходимо для автоматизации проектирования процессов изготовления деталей, включая и автоматизацию проектирования процесса производства электрошлаковой продукции.

Во второй главе «Разработка математической модели химических процессов при ЭШЛ» описан процесс центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ). В целях реализации предложенной в 1-ой главе модели при автоматизации проектирования целесообразно процесс получения заготовок методом ЭШЛ представить из следующих основных стадий: расплавления и накопления металла электрошлаковым способом в плавильной емкости; заливки металла и шлака в кристаллизатор; формообразование и последующей кристаллизации металла заготовки. На рис.3 приведены четыре стадии процесса: 1- стадия электрода, 2 – стадия ванны, 3 - стадия струи, 4 – стадия кристаллизации. Схематически показано прохождение элемента $[Э]_0$ от торца электрода до твердого металла в кристаллизаторе $[Э]_4$, откуда видно, что состав металла изменяется по ходу процесса, и, что наиболее важные изменения происходят при взаимодействии расплавленного металла со шлаковой ванной.

Отличительными особенностями процесса являются – температура жидкой металлической ванны, превышающей на 200-300 градусов температуру плавления самого тугоплавкого компонента, высокая реакционная способность компонентов, входящих в состав сплавов при указанных температурах, наличие шлаковой ванны, вступающей во взаимодействие с компонентами расплава и футеровкой.

В известных изданиях описаны случаи распределения одного элемента по высоте слитка в предположении одностадийности процесса, математические модели массопередачи для описания кинетики раскисления, в частности, марганца, и взаимодействия металла со шлаком в условиях электрошлакового переплава. Так, некоторые авторы представили модель для описания состава слитка ЭШП, в которой рассмотрено одновременное окисление шлаком двух и более элементов, растворенных в металле. Учитывалось также последовательное протекание реакций на стадиях электрода и ванны, образование гарнисажа и возможность электролиза. В работах других ученых предложена более полная математическая модель процессов взаимодействия многокомпонентных металла и шлака при ЭШП, достаточно полно учитывающая большинство факторов, влияющих на химический состав металла.

На этом основании в диссертации методом для описания кинетики совместных реакций в системе металл-шлак-газ, используется метод, в котором взаимодействие всех элементов металла со шлаком описывается реакциями с одним компонентом, например, с FeO. Поэтому он был использован при разработке математической модели электрошлакового литья, в частности и для ЦЭШЛ.

Представлена математическая модель химических процессов при ЭШЛ, учитывающая изменение химического состава металла слитка, в том числе в его поперечном сечении. Модель представляет систему уравнений для расчета скоростей химических реакций на каждой стадии ЭШЛ, состав и массу шлаковой ванны, изменение массы металлической и шлаковой ванны при заливке.

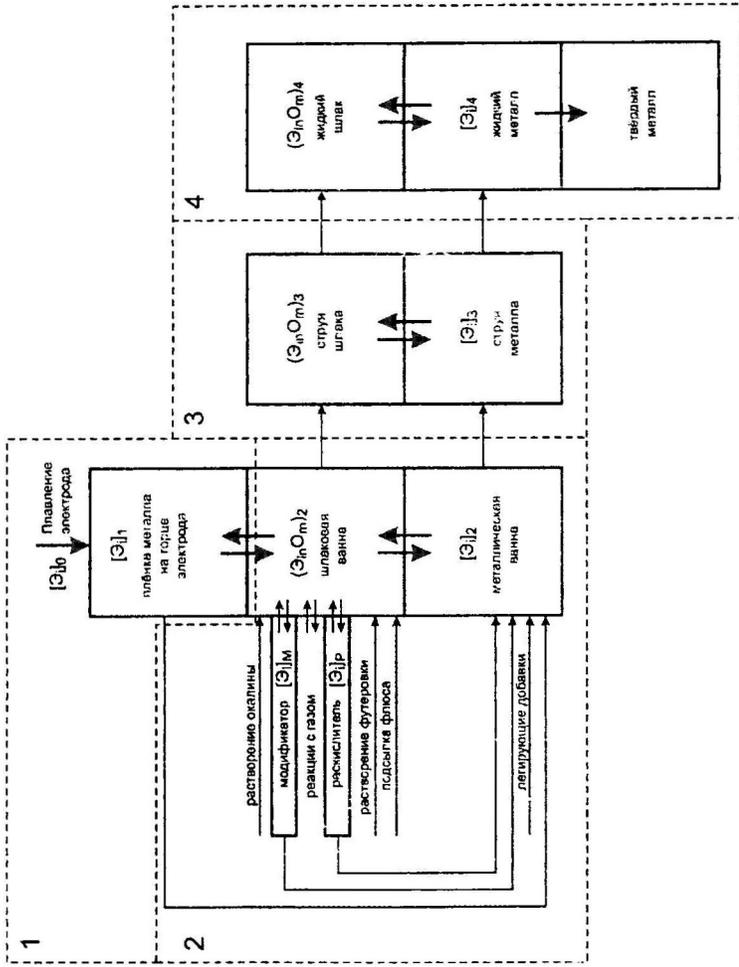
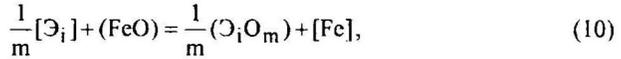


Рис. 3. Схема направления переноса элемента Z , и изменение состава фаз при ЦЭШЛ: 1 – стадия электрода, 2 – стадия: ванны, 3 – стадия струи, 4 – стадия кристаллизации

Взаимодействие металла со шлаком описано комплексом одновременного протекающих и взаимозависимых реакций окисления примесей железа шлаком



где $[\text{Э}_i]$ - Mn, Si, Al, V, Ti и т.д.

Материальный баланс $[\text{Э}_i]$ (кг/с) для рассматриваемого элемента в металле представлен следующими уравнениями:

на стадии, где основным является процесс плавления электрода (назовем стадией электрода) ($j=1$)

$$\frac{G_{\text{Me1}}}{100} \cdot \frac{d[\text{Э}_i]_1}{dt} = \vartheta_{\text{Me1}} \frac{[\text{Э}_i]_0}{100} - J_1 \cdot S_1 \cdot M_{\text{Э}_i} - \vartheta_{\text{Me1}} \frac{[\text{Э}_i]_1}{100}, \quad (11)$$

на стадии ванны ($j=2$)

$$\begin{aligned} \frac{[\text{Э}_i]_2}{100} \cdot \frac{dG_{\text{Me2}}}{dt} + \frac{G_{\text{Me2}}}{100} \cdot \frac{d[\text{Э}_i]_2}{dt} = \vartheta_{\text{Me2}} \frac{[\text{Э}_i]_1}{100} + \vartheta_p \frac{[\text{Э}_i]_p}{100} + \\ + \vartheta_m \frac{[\text{Э}_i]_m}{100} - J_2 \cdot S_2 \cdot M_{\text{Э}_i}. \end{aligned} \quad (12)$$

Стадию ванны разделяем на два периода: первый - накопление металла при плавлении электрода и второй - заливка металла из плавильной емкости. В первый период в уравнении (12) $\vartheta_{\text{Me2}} = \vartheta_{\text{Me1}}$, во второй $\vartheta_{\text{Me2}} = -\vartheta_{\text{заль}}$, а $\vartheta_p = 0$, $\vartheta_m = 0$. Кроме того, во втором периоде G_{Me2} и S_2 зависят от t .

На стадии струи ($j=3$)

$$\frac{G_{\text{Me3}}}{100} \cdot \frac{d[\text{Э}_i]_3}{dt} = -J_3 \cdot S_3 \cdot M_{\text{Э}_i}, \quad (13)$$

на стадии кристаллизации ($j=4$)

$$\frac{[\text{Э}_i]_4}{100} \cdot \frac{dG_{\text{Me4}}}{dt} + \frac{G_{\text{Me4}}}{100} \cdot \frac{d[\text{Э}_i]_4}{dt} = -J_4 \cdot S_4 \cdot M_{\text{Э}_i} - \vartheta_{\text{Me4p}} \frac{[\text{Э}_i]_4}{100 \cdot \chi} + \vartheta_{\text{Me4}} \frac{[\text{Э}_i]_3}{100}, \quad (14)$$

где $[\text{Э}_i]_0$, $[\text{Э}_i]_j$, $[\text{Э}_i]_m$, $[\text{Э}_i]_p$ - массовое содержание i -го элемента в электроде, на стадии j , в модификаторе и раскислителе, мас. %; J_j - скорость перехода элемента в шлак на стадии j , т.е. скорость химической реакции, моль $\text{Э}_i/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; S_j - площадь реакционной поверхности на стадии j , м^2 ; $M_{\text{Э}_i}$ - атомная масса i -го элемента, кг/моль, ϑ_{Me1} , ϑ_{Me2} , ϑ_m , ϑ_p , ϑ_{Me4} , ϑ_{Me4p} - скорости: плавления электрода и накопления металла в плавильной емкости,

подсыпки модификатора и раскислителя, заливки и кристаллизации металла, кг/с, τ - время процесса, с, G_{Me_2} , G_{Me_4} - массы металла в плавильной емкости и литейной форме, кг, χ - коэффициент ликвации.

Стадия кристаллизации также разделена на два периода: в первом происходит накопление металла за счет заливки из плавильной емкости, во втором - кристаллизация металла. В первом периоде в уравнении (14) G_{Me_4} и S_4 зависят от τ , во втором - $S_4 = \text{const}$, $V_{Me_4} = 0$.

Материальный баланс для рассматриваемого элемента в шлаке представлен следующими выражениями:

на стадии ванны ($j=2$)

$$\frac{(\text{Э}_{in}O_m)_2}{100} \cdot \frac{dG_{шл2}}{d\tau} + \frac{G_{шл2}}{100} \cdot \frac{d(\text{Э}_{in}O_m)_2}{d\tau} = g_{\phi} \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_0}{100} + J_1 S_1 \frac{M_{ок}}{n} + J_2 S_2 \frac{M_{ок}}{n} + g_{рф} \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_{\phi}}{100} + g_{эл}^{ок} \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_{ок}}{100}, \quad (15)$$

на стадии струи ($j=3$)

$$\frac{G_{шл3}}{100} \cdot \frac{d(\text{Э}_{in}O_m)_3}{d\tau} = J_3 S_3 \frac{M_{ок}}{n}, \quad (16)$$

на стадии кристаллизации ($j=4$)

$$\frac{(\text{Э}_{in}O_m)_4}{100} \cdot \frac{dG_{шл4}}{d\tau} + \frac{G_{шл4}}{100} \cdot \frac{d(\text{Э}_{in}O_m)_4}{d\tau} = g_{шл4} \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_3}{100} + J_4 S_4 \frac{M_{ок}}{n} - g_{шл.кр4} \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_4}{100 \cdot \chi}, \quad (17)$$

где $(\text{Э}_{in}O_m)_0$, $(\text{Э}_{in}O_m)_2$, $(\text{Э}_{in}O_m)_3$, $(\text{Э}_{in}O_m)_4$, $(\text{Э}_{in}O_m)_{\phi}$, - концентрация оксида i -го элемента в исходном флюсе, в шлаковой ванне, в струе, в литейной форме и в футеровке, %; g_{ϕ} , $g_{рф}$, $g_{эл}^{ок}$, $g_{шл.кр4}$, $g_{шл4}$ - скорости подсыпки флюса, растворения футеровки и оксидных пленок с электрода, кристаллизации и заливки шлака, кг/с; $M_{ок}$ - молекулярная масса оксида $\text{Э}_{in}O_m$, кг/моль; $G_{шл2}$, $G_{шл4}$ - массы шлака в тигле и в форме, кг; $(\text{Э}_{in}O_m)_{ок}$ - концентрация $\text{Э}_{in}O_m$ в оксидной пленке на электроде, %.

Стадия кристаллизации аналогично делится на два периода. В первом в уравнении (17) $G_{шл4}$ и S_4 зависят от τ , во втором - $G_{шл4} = \text{const}$, $S_4 = \text{const}$, $g_{шл4} = 0$, $\frac{dG_{шл4}}{d\tau} = 0$.

Зависимости G_{Me_2} , G_{Me_4} , $G_{шл2}$, $G_{шл4}$, S_2 , S_4 от времени определены автором экспериментально.

При введении модификатора и раскислителя происходит их расплавление при прохождении через шлаковую ванну с образованием металлических капель, химически взаимодействующих со шлаком. Содержание элемента Э_i

в каплях $[\text{Э}_i]_k$ массой G_k при прохождении шлаковой ванны к моменту попадания в металлическую ванну определяется из уравнения

$$G_k \frac{d[\text{Э}_i]_k}{dt} = -J_{\text{Э}_i}^k \cdot S_k \cdot 100, \quad (18)$$

где S_k - поверхность капли, м^2 .

Для определения концентрации $[\text{Э}_i]$ любого элемента в металлической и оксида ($\text{Э}_i\text{O}_m$) в шлаковой ваннах время процесса τ разбиваем на достаточно малые отрезки времени Δt , в течение которых скорости химических реакций можно считать постоянными.

Расчет состава металла и шлака производился последовательно для каждой из стадий.

Скорость каждой реакции при совместном их протекании описывается уравнением:

$$J_j = (k_j x_j)^m [\text{Э}_i]_{j-1} - (\text{Э}_i\text{O}_m) \left/ \left(\frac{(k_j x_j)^{m \alpha_j}}{k_j^{\alpha_j}} + \frac{(k_j x_j)^m \cdot M_{\text{Э}_i} \cdot 100}{\beta_j \cdot \rho_{\text{Me}} \cdot \sqrt{D_j}} + \frac{M_{\text{ок}} \cdot 100}{\beta_j \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot \sqrt{D_{\text{ок}}}} + \frac{(k_j x_j)^m \cdot M_{\text{Э}_i} \cdot 100 \cdot S_i}{g_{\text{ш}}} \right) \right., \quad (19)$$

где x_j - концентрация оксида железа у поверхности раздела металл - шлак на стадии j , $K_j = (\text{Э}_i\text{O}_m)^{1/m} / \{(\text{FeO})[\text{Э}_i]^{1/m}\}$ - равновесное соотношение концентраций элементов и оксидов для реакции j , β_j - константа конвекции, $\text{с}^{-0,5}$; D_j и $D_{\text{ок}}$ - коэффициенты диффузии реагентов в металле и шлаке, $\text{м}^2/\text{с}$; K_j и α_j - опытные константы, описывающие разряд иона $\text{Э}_i(2m/n)^+$.

x_j находится из уравнения

$$\sum_{i=1}^j m \cdot J_j = J_{\text{FeO}}^j \pm \frac{i_j}{2F}, \quad (20)$$

где i_j - плотность тока на соответствующей стадии, $\text{А}/\text{м}^2$; F - число Фарадея.

На основе разработанной математической модели составлены алгоритм и программа расчета для персональных компьютеров, описывающая поведение 15 элементов, химически активных при ЭШЛ сталей: Fe, C, Si, Mn, Ti, Cr, V, W, B, Al, P, S, O, Ca, Zr. Блок-схема программы представлена на рис. 4. Расчет изменения химического состава металла и шлака происходит последовательно, постадийно.

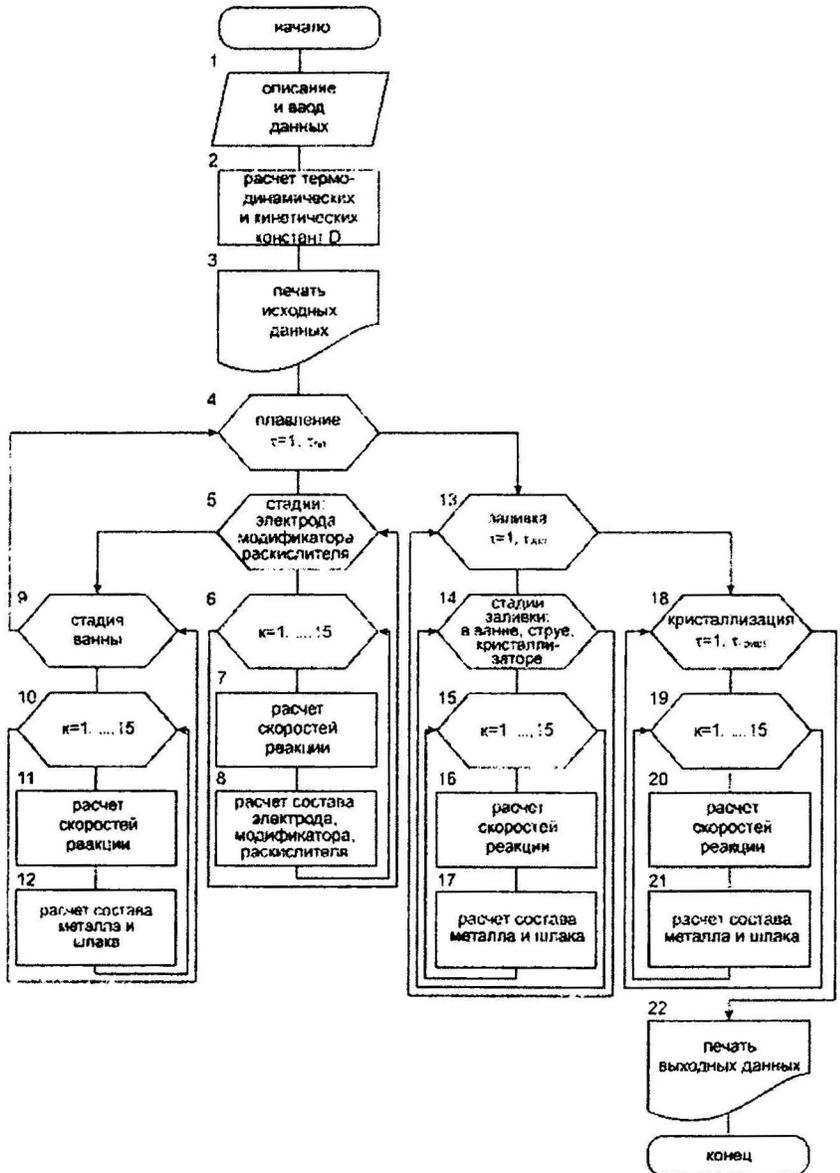


Рис. 4. Блок-схема расчетов алгоритма проектирования процессов

Найдены математические зависимости изменения площади реакционной поверхности в плавильной емкости, масс жидких металла и шлака от времени заливки.

Для автоматизации проектирования процесса необходимо на основании исследований в математических моделях (10)-(17) определить неизвестные коэффициенты.

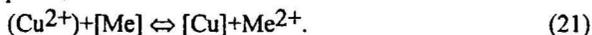
Третья глава «Исследование массообмена между металлом и шлаком при ЭШЛ и физическое моделирование» посвящена нахождению коэффициентов в математической модели и констант массопереноса (k^{∂}) реагентов в металле и шлаке к границе металл-шлак.

В данной главе методом "холодного" моделирования (где в качестве металлов используются сплавы с низкой температурой плавления) и для реального процесса определены величины k^{∂} и β для ванны в период заливки, на стадиях струи и кристаллизации и исследовано влияние скорости заливки, времени заливки и кристаллизации на массообмен между металлом и шлаком при электрошлаковом литье.

Впервые получены значения констант массоотдачи (k^{∂}) и конвекции (β) методом "холодного" моделирования процесса для ряда стадий ЦЭШЛ.

Для изучения массообмена при ЦЭШЛ на "холодной" модели в качестве металла использовали легкоплавкий сплав Вуда; в качестве аналога шлака – глицерин.

В "шлак" вводили CuSO_4 до 0,05 мас.% и фиксировали изменение концентрации Cu^{2+} во времени, предварительно подтвердив опытным путем диффузионный режим реакции



Это позволило принять, что

$$\frac{d(G_{\text{шл}} \cdot C_{\text{Cu}})}{dt} = k^{\partial} \cdot C_{\text{Cu}}. \quad (22)$$

Зависимости k^{∂} приведены к виду, который можно представить следующими аналитическими зависимостями. Интегрирование уравнений выполнено с помощью известных методов и приведено к виду алгебраических уравнений для выполнения последующих расчетов для ЭВМ.

Используя соотношение

$$k^{\partial} = \beta D_i^{1/2}, \quad (23)$$

и экспериментальные данные о D_i , нашли β .

В реальном процессе ЦЭШЛ поток массы в шлаке характеризовали скоростью химической реакции взаимодействия ионов никеля (Ni^{2+}) с металлом



Поток в металле характеризовали скоростью окисления титана

$$\text{Ti} + 2\text{FeO} = 2\text{Fe} + \text{TiO}_2 \quad (26)$$

При сравнении значений k^0 и β для "холодной" модели и реального процесса было видно, что они практически совпадают. В дальнейших расчетах использовались значения β , найденные методом "холодного" моделирования, так как необходимые для расчета β значения D , более точно определены при низких температурах.

По результатам исследований для использования в расчетах рекомендуемую следующие значения констант конвекции: на стадии плавильной емкости - $1,5 \text{ с}^{1/2}$, на стадии струи - $12 \text{ с}^{1/2}$ и на стадии кристаллизации - $1,4 \text{ с}^{1/2}$.

В четвертой главе «Проектирование процесса» рассмотрены меры по анализу технологических процессов ЭШЛ, а именно: проведен анализ и разработана модель лимитирующих этапов химических реакций при предельных концентрациях компонентов исследуемых сталей и сплавов и влияние электролиза на поведение химических элементов при электрошлаковом литье; разработана модель влияния технологических параметров заливки металла и шлака на химический состав отливки; выявлено влияние количества модификатора и раскислителя на химический состав отливки.

С помощью разработанной математической модели химических процессов при ЦЭШЛ установлены количественные зависимости содержания элементов в металле от различных факторов. Установлено, что на всех стадиях процесса ЦЭШЛ стали Р6М5 при восстановлении оксида кальция основным тормозящим фактором является диффузия его содержания в металле. На стадии электрода и ванны в период накопления металла происходит значительное - на 45 отн. % и 70 отн. % соответственно десульфурация металла. Реакции здесь тормозятся диффузией серы в металле - на стадии электрода и диффузией серы в шлаке - на стадии ванны.

Исследование влияния полярности постоянного тока показало, что наибольшее содержание алюминия в отливке из стали Р6М5 достигается на прямой полярности - до 1,0 мас. %. Окисление алюминия на электроде протекает в предельном диффузионном режиме по алюминию в металле. При использовании постоянного тока обратной полярности значения концентрации алюминия в металле отливки близки к содержанию его, если бы процесс проходил на переменном токе. Наибольшая степень десульфурации металла наблюдается при использовании постоянного тока прямой полярности и переменного тока. Наименьшее содержание кальция в отливке дает использование постоянного тока обратной полярности.

Установлено, что при увеличении толщины оксидной пленки на электроде из стали Р6М5 более $0,5 \cdot 10^{-3}$ м уменьшается содержание алюминия в металле на 20 отн. %, кальция - на 19,5 отн. % и ухудшается десульфурация металла на 60 отн. %.

На основе предложенной модели влияния технологических параметров на состав металла было рассмотрено влияние скорости плавления электрода

и времени заливки металла на содержание циркония, алюминия, кальция и серы в стали Р6М5. Расчеты показали, что с увеличением времени плавления с 1000 с до 1500 с содержание серы в металле снижается на 61,1 отн. %. При времени плавления $\tau_{пл} \geq 1200$ с концентрации циркония, алюминия и кальция в металле не изменяются. Время заливки металла не влияет на концентрацию циркония в отливке. При времени, в течение которого происходит заливка жидкого металла $\tau_{зал} \geq 90$ с концентрация алюминия возрастает на 4 отн. %, а при $\tau_{зал} \geq 60$ с содержание серы и кальция уменьшается на 10,2 и 20,7 отн. %.

Выявлено, что при изменении диаметра струи жидкого металла (то есть скорости заливки) от 10^{-2} до 10^{-1} м концентрация алюминия увеличивается на 2,5 отн. %, содержание серы и кальция уменьшается на 8,4 отн. % и 7,4 отн. % соответственно.

Проведенные исследования, показали, что увеличение количества модификатора от 0,001 кг до 0,1 кг и раскислителя от 0,001 кг до $6 \cdot 10^{-2}$ кг при ЦЭШЛ стали Р6М5, в состав которых входит кремний, увеличивает его содержание в слитке с 0,37 мас. % до 0,78 мас. %. Количество циркония в металле зависит от количества модификатора, но не превышает 0,004 мас. % в отливке. Алюминий поступает в металл в результате химических реакций между металлом и шлаком, а также за счет введения раскислителя в metallическую ванну. Его содержание изменяется от 0,069 мас. % до 0,158 мас. % в зависимости от скорости введения раскислителя. С ростом массы вводимого раскислителя увеличивается содержание кальция в металле, но его концентрация не превышает 0,03 мас. %.

Пятая глава «Автоматизация проектирования процесса ЭШЛ» посвящена вопросам совершенствования проектирования процессов при электрошлаковом литье. Описана модель автоматизации проектирования ЭШЛ, структурная схема которой представлена на рис.5. Она включает в себя автоматизацию расчетов химического состава металла и шлака, технологических параметров процесса, проектирование технологического оборудования, в частности, плавильной емкости и кристаллизатора с использованием рассмотренных ранее в главах 2 и 4 моделей и известных систем автоматизированного проектирования.

Входными параметрами для программы являются: составы электродного металла, флюса, футеровки, раскислителя и модификатора; скорости их плавления или подачи; площади поверхностей взаимодействия; толщина и состав оксидной пленки на поверхности электрода; коэффициенты ликвации; время процесса и каждой стадии; массы металла и шлака в тигле и в кристаллизаторе; диаметры струй жидких металла и шлака; плотности жидких металла и шлака; радиус капли жидкого металла, а также константы равновесия, коэффициенты диффузии и константы конвекции (рис.3).

Расчет изменения химического состава металла и шлака происходит последовательно, постадийно.

Для каждой стадии составлен цикл расчетов (рис.4).

Стадии электрода, добавки модификатора и раскислителя, накопления жидких металла и шлака объединены в один цикл по времени плавления электрода. Этот цикл подразделяется на несколько циклов: расчет стадии электрода и стадии ванны. На стадии электрода, подсыпки модификатора и раскислителя рассчитывается изменение химического состава для всех 15 элементов через небольшой промежуток времени Δt . Также для каждого интервала времени рассчитывается скорость химической реакции I_j для каждого элемента. Значения химического состава электрода, модификатора и раскислителя рассчитанные для последнего небольшого интервала времени на стадии электрода являются исходными при расчете на стадии ванны.

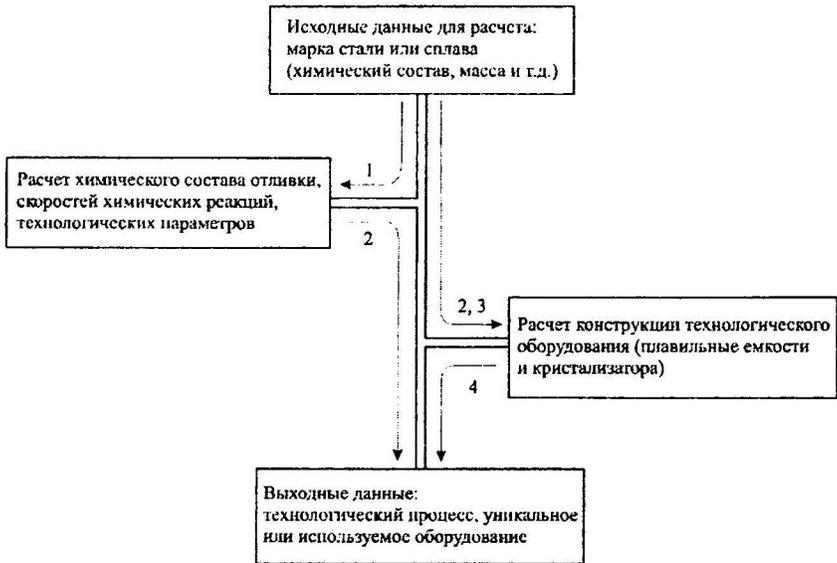


Рис.5. Схема автоматизации проектирования процессов ЭШЛ: 1- входные данные для программы расчета химического состава отливки, 2 – выходные данные: химический состав и массы металла и шлака, время процесса; 3 – входные данные для расчета технологического оборудования: плавильной емкости и кристаллизатора; 4 – выходные данные: типоразмер плавильной емкости и кристаллизатора

В цикле для стадии ванны просчитываются значения химического состава металла и шлака для 15 элементов в интервале времени плавления $t_{пл}$ и скорости химических реакций через каждые $\Delta t_{пл}$.

Выходные значения состава металла и шлака на стадии ванны являются исходными для стадии заливки. Стадия заливки выделена в отдельный цикл по времени тзал. В этом цикле проводим расчет состава металла и шлака последовательно в плавильной емкости, струе и кристаллизаторе по 15 элементам и для этих значений рассчитываются свои скорости реакций. Выходные значения состава металла и шлака служат исходными для заключительной стадии кристаллизации, выделенной также в отдельный цикл. Расчеты проводим аналогично предыдущей стадии. Выходными параметрами являются составы металла и шлака для данного процесса, скорости химических реакций.

Выходными параметрами программы являются составы металла и шлака на всех стадиях, скорости химических реакций.

Эти расчетные данные являются исходными для проектирования уникального оборудования – плавильной емкости и кристаллизатора.

На основе предложенной модели теплофизических процессов при электрошлаковом литье проводился их анализ для технологий ЭШЛ, используемых на ряде промышленных предприятий. На основе метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS исследовались процессы теплообмена в плавильной емкости и литейной форме.

В расчетах используются, полученные ранее расчетные данные времени процесса, сила тока, массы металлической и шлаковой ванн, химические составы исследуемых сталей, и шлаков. Из соответствующей базы данных выбираются необходимые теплофизические константы. На рис. 6 указана схема плавильной емкости, принятая для расчетов, на рисунке 9 – схема кристаллизатора.

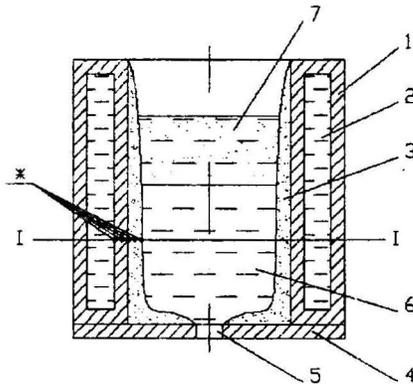


Рис. 6. Схема плавильной емкости, принятая для расчетов:

1 – медный корпус плавильной емкости; 2 – охлаждающая жидкость (вода); 3 – магнетитовая футеровка; 4 – поддон; 5 – токоподводящая затравка; 6 – жидкий металл; 7 – жидкий шлак; I – I – поперечное сечение емкости для расчета температур; * - места, для которых рассчитывали температуру

Получены зависимости изменения температуры в плавильной емкости при плавлении электрода и накоплении необходимого количества жидких металла и шлака от времени процесса плавления (рис. 7 и 8), и в кристаллизаторе при заливке металла со шлаком, охлаждении и кристаллизации металла.

На рис. 7 показано изменение температуры по времени на внутренней стенке плавильной емкости. Кривая 1' показывает изменение температуры в зоне контакта плавильной емкости охлаждающая жидкость (вода); кривая 2' – в медном плавильном корпусе; кривая 3' – в зоне контакта гарнисаж-медный корпус плавильной емкости. Из этих графиков видно, что происходит резкое увеличение температуры контактирующих поверхностей в течение примерно 20 секунд, затем происходит более плавный нагрев исследуемых областей примерно до 35 секунды от начала процесса плавления электрода. Дальнейший нагрев исследуемых областей от 35 с. процесса плавления до окончания расплавления электрода (накопления необходимого количества жидкого металла и шлака) 90 с. процесса плавления уже подчиняется линейному закону: происходит плавное увеличение температуры в зоне контакта плавильной емкости охлаждающая жидкость (вода) до температуры примерно 1000 °С; в медном плавильном корпусе – 750 – 800 °С и в зоне контакта гарнисаж-медный корпус плавильной емкости – до температуры не более 200 °С.

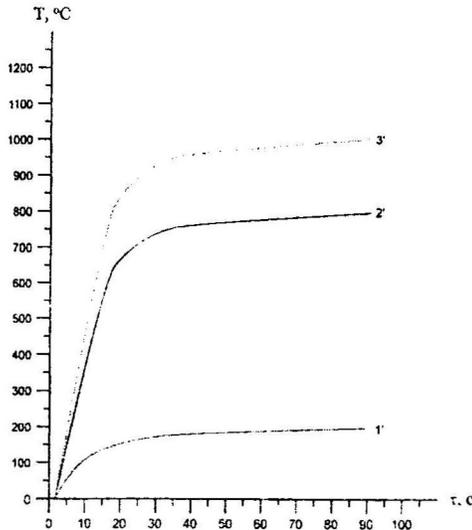


Рис. 7. Изменение температуры по времени на внутренней стенке плавильной емкости: 1' – в зоне контакта плавильной емкости охлаждающая жидкость (вода); 2' – в медном плавильном корпусе; 3' – в зоне контакта гарнисаж-медный корпус плавильной емкости

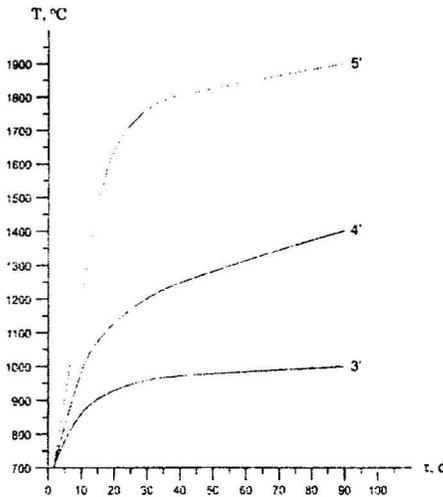


Рис. 8. Изменение температуры по времени по толщине футеровки на внутренней поверхности плавильной емкости: 3' – в зоне контакта гарнисаж-медный корпус плавильной емкости; 4' – внутри гарнисажа; 5' – в зоне контакта жидкий металл-гарнисаж

На рис. 8 показано изменение температуры по времени по толщине футеровки на внутренней поверхности плавильной емкости. Кривая 3' показывает изменение температуры в зоне контакта гарнисаж-медный корпус плавильной емкости; кривая 4' – внутри гарнисажа; кривая 5' – в зоне контакта жидкий металл-гарнисаж.

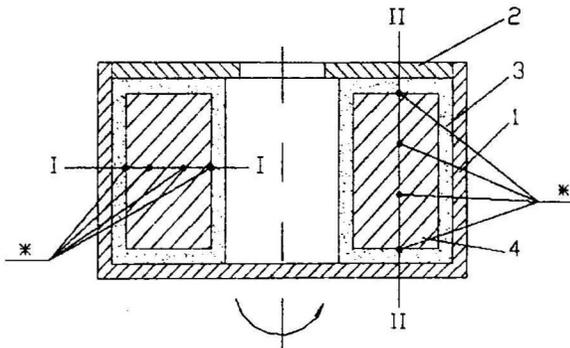


Рис. 9. Схема кристаллизации металла и шлака в кристаллизаторе: 1 – кристаллизатор; 2 – крышка; 3 – закристаллизовавшийся шлак; 4 – металл; * – места, в которых рассчитывали распределение температуры; I – I, II – II – поперечное и продольное сечения кристаллизатора, принятые в расчетах

Полученные расчетные данные позволяют сделать следующее заключение: к моменту времени, когда жидкий металл находится в заданном месте плавильной емкости, гарнисаж, а вместе с ним и внутренняя стенка плавильной емкости начинают интенсивно нагреваться до температуры 1050 °С - 1200 °С, а затем происходит плавное увеличение температуры до 1900 °С, в течение примерно 80 - 100 с. от начала соприкосновения с жидким шлаком или металлом. За счет внутреннего охлаждения водой перегрев плавильной емкости, а, следовательно, и ее деформация не наблюдаются. Было установлено, что перепад температур в системе жидкий металл-гарнисаж незначительно зависит от толщины стенки плавильной емкости или толщины гарнисажа. Но из-за налипания после каждой плавки определенного количества шлака на гарнисаж его толщина увеличивается, вследствие чего изменяется теплообмен в системе плавильная емкость-гарнисаж-жидкий металл. Производственные испытания показали, что для данного типоразмера плавильной емкости возможно проведение не менее 50 плавов с заданными технологическими параметрами процесса, так как это существенно не повлияет на теплообмен в самой плавильной емкости и на сам процесс накопления необходимого количества жидкого металла.

В процессе заливки металла и шлака в кристаллизатор начинает нагреваться до температуры примерно 1100 -1200 °С примерно до 55 – 70 с. после полной заливки металла и шлака, а затем она начинает охлаждаться вместе с металлом и шлаком. Быстрее всего остывает внутренний слой шлака, а также верхний и нижний периферийные части кристаллизатора. По краям кристаллизатора из-за резкого перепада температур в процессе остывания могут возникнуть тепловые деформации, которые приводят к изменению геометрических размеров формы и, как следствие, к браку отливок. Охлаждение отливки при расчетных исходных данных происходит в течение не более 1,5 – 4 мин, что соответствует реальным технологическим данным. Использование такой формы в технологическом процессе рекомендуется в течение не более 100 - 150 раз. После этого происходит заметная деформация кристаллизатора.

При проектировании уникального технологического оборудования и оснастки используются также, разработанные ранее, и используемые при проектировании на промышленных предприятиях системы автоматизированного проектирования, такие как, Solid Works, КОМПАС, T-FLEX, ProEngineer. В, частности, компьютерная модель кристаллизатора данного типоразмера была выполнена в Solid Works, и, с помощью программного комплекса ANSYS проводились исследования по охлаждению и кристаллизации заготовок из сталей 20, 09Г2С, 12Х18Н10Т, 20Х13, 08Х13, 14Х17Н2, а также деформации кристаллизатора.

На рис. 10 показана схема поперечного сечения отливки, принятая в расчетах при кристаллизации металла и шлака в кристаллизаторе.

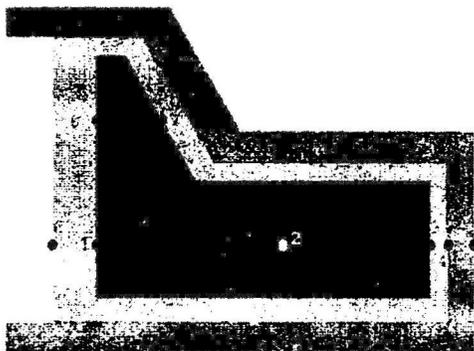


Рис. 10. Схема поперечного сечения отливки, принятая в расчетах при кристаллизации металла и шлака в кристаллизаторе: 1, 2, 3, 7, 8 – точки соответствуют распределению температуре в отливке; 4, 6 – в шлаке; 5 – в кристаллизаторе

На рис. 11 и 12 приведены данные по распределению температуры при кристаллизации металла и шлака в форме в точках, указанных на рис. 10, характеризующих некоторые основные участки, позволившие прогнозировать изменение температуры в металле, шлаке и кристаллизаторе при остывании отливок сложной формы. Точки 1, 2, 3, 8, 9 соответствуют распределению температуры в отливке; точки 4 и 13 – в шлаке; точка 5 – в кристаллизаторе.

Из рис. 11 следует, что к 150 – 200 с. от начала заливки металла и шлака в кристаллизатор металл и шлак плавно остывают до температуры 1150 - 1050 °С, а кристаллизатор нагревается до температуры 900 °С. Затем эти температуры выдерживаются в этих интервалах примерно 200 с., а затем уже происходит постепенное охлаждение до температуры окружающей среды 20 °С до 1100 с. от начала заливки.

Из рис. 12 видно, что изменение температуры по времени в кристаллизаторе в указанных точках 7 и 8 (см рис. 10) происходит по следующему закону: вначале происходит остывание до температуры 1180 - 1100 °С, в течении 200 с., затем эти температуры сохраняются примерно 100 с. А потом происходит постепенное остывание до температуры окружающей среды.

Видно, что интенсивное охлаждение металла и шлака происходит в интервале до 200 с. от начала заливки до температуры 1150 - 1050 °С, а затем уже происходит постепенное охлаждение до температуры окружающей среды 20 °С до 1100 с. от начала заливки. Время начала и конца кристаллизации металла находится в интервале 200 – 300 с. Тепловые деформации возникают в металле для данного типоразмера отливки в период, когда начинается рост кристаллов примерно в интервале 200 - 300 с. после начала процесса охлаждения.

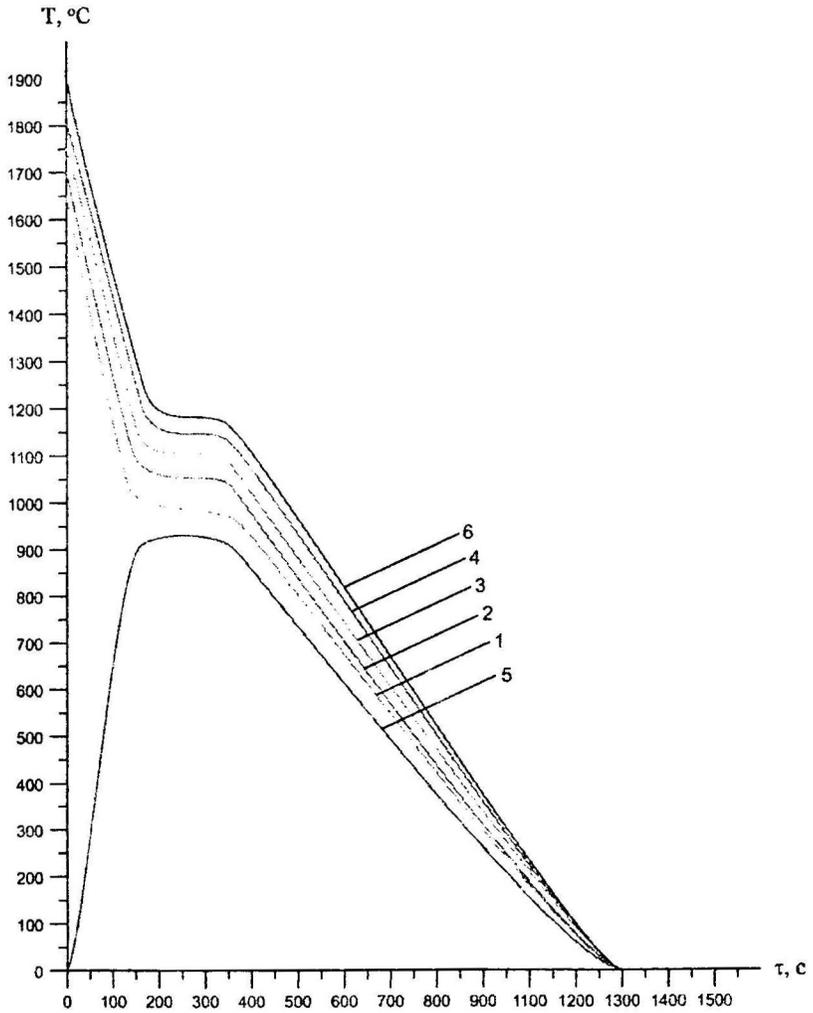


Рис. 11. Изменение температуры по времени в кристаллизаторе в точках 1 – 6, указанных на рисунке 7: 1, 3 – в зоне контакта металл-шлак; 2 – металл; 4 – в зоне контакта шлак-литейная форма; 5 – литейная форма; 6 – шлак

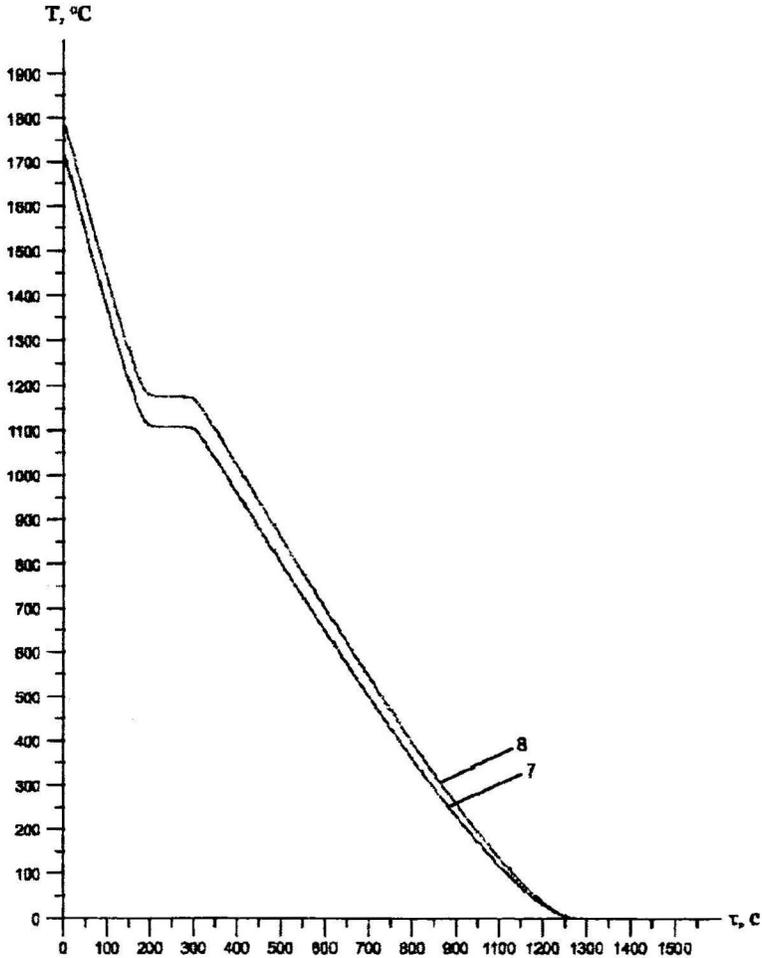


Рис. 12. Изменение температуры по времени в кристаллизаторе в точках 7, 8, указанных на рисунке 6.3, в зоне контакта металл-шлак

Расчеты напряжённо-деформированного состояния отливки в кристаллизаторе позволяют определить величину деформаций при остывании и кристаллизации металла в кристаллизаторах различных типоразмеров, что позволяет выбрать удовлетворяющий всем условиям, для данного процесса ЭШЛ.

Также приведены учебно-методические комплексы, созданные для специалистов промышленных предприятий, помогающие инженерным работникам самостоятельно использовать некоторые системы САПР на своих рабочих местах. В состав предложенной автоматизации проектирования процессов электрошлакового литья входят обучающие материалы по некоторым системам автоматизированного проектирования. Большое развитие и внедрение в процесс обучения за рубежом и у нас в стране получили электронные учебники, позволяющие самостоятельно изучить определенную тему или научиться работе в том или ином программном продукте или системе. Каждый раздел в учебнике начинается с меню, которое позволяет быстро найти нужную информацию. Были созданы электронные учебники по таким программным продуктам как: ANSYS, Solid Edge, Solid Works, DelCam's Power Solution, MathCAD, T-FLEX и другие.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований и математического моделирования расплавления, химических реакций, кристаллизации при электрошлаковом литье легированных сталей и сплавов осуществлена автоматизация проектирования процессов электрошлакового литья, позволившая оптимизировать затраты, повысить качество продукции.

В диссертационной работе приведены следующие выводы:

1. Предложена концепция производственных систем нового поколения, охватывающая вопросы автоматизации проектирования процесса ЭШЛ с учетом конструкторского состава изделий, химических реакций, особенностей технологического оборудования и др.
2. Разработан метод математического описания кинетики химических процессов при ЭШЛ с учетом одновременного протекания произвольного числа реакций и их взаимного влияния, а также учитывающие изменение массы реагирующих элементов во времени и зависимость их от технологических параметров. Разработаны алгоритм и программы расчетов, обеспечивающих получение литых заготовок требуемого химического состава.
3. В результате анализа широкого спектра технологических параметров процесса осуществлен подбор параметров математической модели и выявлены те из них, которые необходимо определить экспериментально. Экспериментально установлены значения коэффициентов в математической модели, а также зависимости площади реакционной поверхности в плавильной емкости от времени заливки.
4. Разработана модель влияния концентрации химических элементов в металле и шлаке на скорость протекания химических реакций при ЭШЛ, учитывающая влияние технологических параметров, таких как, время процесса, род и сила тока, на химический состав изделия. Это позволило ускорить процесс проектирования технологического процесса за счет исключе-

ния экспериментального подбора этих параметров и сократить затраты на проведение технологических исследований.

5. Осуществлена экспериментальная проверка адекватности разработанной модели, а также эффективность внедрения алгоритмов и программ на ряде промышленных предприятий. В частности, проведены расчеты химического состава отливок из сплавов ВНЛ, ВНЛ-6, ЭП-202, стали 12Х18Н10Т и ст. 20 и 09Г2С. Программы расчета переданы в НПФ «ЭШЛ», институт физико-технических проблем экологии, "Специальные технологии", "Фланцевый завод", "Ресурсосберегающие технологии" г. Омск и др.

6. Разработана модель теплофизических процессов при электрошлаковом литье в плавильной емкости и кристаллизаторе, позволяющая решать вопросы усовершенствования их конструкции и сокращения затрат на проведение технологических исследований.

7. Разработан алгоритм проектирования процесса ЭШЛ, в основу которого положено последовательное выполнение расчетов технологических параметров процесса и технологического оборудования.

8. Разработана программа (супервизор), включающая вышеупомянутые частные программы и алгоритмы. На основе этой программы осуществлена автоматизация проектирования процесса ЭШЛ.

9. Разработанные программные продукты и средства переданы в распоряжение промышленных предприятий: НПФ «ЭШЛ», институт физико-технических проблем экологии, "Специальные технологии", "Фланцевый завод", "Ресурсосберегающие технологии", "Метизный завод", ПКФ "Мира-Мет" г. Омск и др. Экономический эффект подтвержден соответствующими актами.

10. Разработаны электронные обучающие комплексы для студентов и аспирантов ВУЗов, а также специалистов промышленных предприятий по ANSYS, Solid Edge, Solid Works, DelCam's Power Solution, MathCAD, T-FLEX и другие.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ:

В изданиях из перечня ВАК

1. Жеребцов, С.Н. Применение электрошлаковой сварки при производстве толстолистовых конструкций / С.Н. Жеребцов, А.Г. Янишевская // Сварочное производство. – 2005. - №10. – С. 32-35. (50 % соискателя)

2. Математическая модель химических процессов при центробежном электрошлаковом литье (ЦЭШЛ) / В.Н. Бороненков [и др.] // Металлы. – 1993. - №5. – С. 35-42. (38 % соискателя)

3. Пергун, И.Н. О некоторых программных продуктах фирм DELCAM и INTERGRAPH / И.Н. Пергун, С.П. Шамец, А.Г. Янишевская // Омский научный вестник. – 1997. – Вып.1 – С. 74-75. (50 % соискателя)

4. Программа многоцелевого анализа – ANSYS / С.И. Верхман [и др.] Омский научный вестник. – 1998. – Вып.5 – С. 105 - 107. (17 % соискателя)

5. Фомин, А.А. Особенности внедрения программного продукта AutoCAD в единое информационное пространство промышленного предприятия / А.А. Фомин, А.Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – 2009. - №3. – С.37 - 39. (50 % соискателя)

6. Шамец, С.П. Прогнозирование процессов затвердевания фланцев из легированных сталей с использованием программы ANSYS / С.П. Шамец, А.Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – 2002. - №6. – С. 27 - 29. (50 % соискателя)

7. Янишевская, А.Г. Использование программного комплекса ANSYS при модернизации процесса кристаллизации отливок / А.Г. Янишевская // Технология машиностроения. – 2001. - №4. – С. 9 - 11. (100 % соискателя)

8. Янишевская, А.Г. Математическая модель химических процессов при электрошлаковом литье / А.Г. Янишевская // Технология машиностроения. – 2005. - №1. – С. 62 - 67. (100 % соискателя)

9. Янишевская, А.Г. Моделирование тепловых процессов в плавильной емкости при электрошлаковом литье с помощью программы ANSYS / А.Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – 2005. - №6. – С. 16-19. (100 % соискателя)

10. Янишевская, А.Г. Оптимизация технологии электрошлакового литья / А.Г. Янишевская // Технология машиностроения. – 2002. - №2. – С. 8 - 14. (100 % соискателя)

11. Янишевская, А.Г. Применение многокомпонентных систем флюсов для наплавки изношенных поверхностей корпусов автосцепных устройств вагонов / А.Г. Янишевская, С.Н. Жеребцов // Сварочное производство. – 2005. - №7. – С. 33 - 36. (50 % соискателя)

12. Янишевская, А.Г. Создание системы автоматизированного проектирования процесса электрошлакового литья / А.Г. Янишевская // Научный вестник НГТУ. – 2006. – Вып. №4(25) – С.199 - 207. (100 % соискателя)

13. Янишевская, А.Г. Электрошлаковый переплав хладостойких сталей 09Г2С и 10Г2 / А.Г. Янишевская, С.Н. Жеребцов // Технология машиностроения. – 2005. - №5. – С. 7-11. (60 % соискателя)

В прочих изданиях

14. Анализ технологического процесса центробежного электрошлакового литья с использованием пакета прикладных программ COSMOS/M / А.Г. Янишевская [и др.] // Анализ и синтез механических систем: сб. науч. тр. – Омск, 1998. – С.37-40. - ISBN 5-8149-0098-9 (33 % соискателя)

15. Анализ технологического процесса электрошлакового литья с использованием программного комплекса ANSYS / А.Г. Янишевская [и др.] // Фундаментальные проблемы металлургии: сб. докл. – Екатеринбург, 2000. – С. 85 – 91. - ISBN 5-321-00044-1 (71 % соискателя)

16. Использование программного комплекса ANSYS при проектировании и изготовлении деталей методом электрошлакового литья / Г.Н. Бояркин [и др.] // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2001. - Т.1. – С. 60 – 64. (60 % соискателя)

17.Использование программы ANSYS для моделирования тепловых полей в процессе кристаллизации отливки при электрошлаковом литье / Г.Н. Бояркин [и др.] // сб. тр. I-й конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH - Москва, 2002. – С. 420 – 422. (67 % соискателя)

18.Моделирование процессов кристаллизации отливки при центробежном электрошлаковом литье с помощью программы ANSYS / А.Г. Янишевская [и др.] // Информатика – машиностроение. – 2001. – №1. – С.19 - 21. (67 % соискателя)

19.Создание и использование электронных учебно-методических материалов при подготовке студентов по специальности САПР / Г.Н. Бояркин [и др.] // Вестник УГТУ-УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – 2005. – №11. - С. 130 – 136. - ISBN 5-321-00625-3 (57 % соискателя)

20.Тепловые процессы при электрошлаковом литье легированных сталей / А.Г. Янишевская [и др.] // ТЕПЛОМАСООБМЕН “ММФ-2000”: IV Минский международный форум. – Минск, 2000. – Т. 5 – С. 439 – 442. (50 % соискателя)

21.Фомин, А.А. Особенности внедрения программного продукта AutoCAD в единое информационное пространство промышленного предприятия / А.А. Фомин, А.Г.Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – 2009. - №3. – С.37 - 39. (50 % соискателя)

22.Шамец, С.П. Современные САПР – новые технологии в промышленности / С.П. Шамец, А.Г. Янишевская // Стратегические направления регионального развития Российской Федерации: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Омск, 1999. – С. 219 - 220. ISBN 5-8453-0005-3 (50 % соискателя)

23.Шанчуров, С.М. Математическая модель химических процессов при центробежном электрошлаковом литье / С.М. Шанчуров, А.Г. Янишевская, В.Н. Бороненков // Омск: ОмПИ, 1992. – 16 с. – Деп. в Черметинформации 30.03.92, №5860-чм 92. (50 % соискателя)

24.Янишевская, А.Г. Анализ теплофизических процессов при электрошлаковом литье / А.Г. Янишевская, Е.Н. Пергун // Вестник УГТУ-УПИ. Компьютерный инженерный анализ. - 2005. – №11. - С. 72 – 79. - ISBN 5-321-00525-3 (50 % соискателя)

25.Янишевская, А.Г. Использование программы ANSYS для моделирования процессов расплавления и кристаллизации металла и шлака при электрошлаковом литье / А.Г. Янишевская, Е.Н. Пергун // сб. тр. VI-й конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH - Москва, 2006. – С. 258 – 267. (60 % соискателя)

26.Янишевская, А.Г. Оптимизация технологии электрошлакового литья / А.Г. Янишевская // Омск, 2001. – 76 с. - ISBN 5-8149-0112-8 (100 % соискателя)

27.Янишевская, А.Г. Прогнозирование химического состава отливок из легированных сталей / А.Г. Янишевская // Военная техника, вооружение и технологии двойного применения: материалы III Междун. технологического

конгресса – Омск, 2005. - Ч.1. – С. 197 – 199. - ISBN 5-7779-0596-X (100 % соискателя)

28. Янишевская, А.Г. Разработка технологии электрошлакового литья / А.Г. Янишевская // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. IX Международ. науч.-техн. конф.– Донецк, 2002. - Т.3. – С. 139 – 144. - ISBN 966-7907-08-2 (100 % соискателя)

29. Янишевская, А.Г. Разработка технологии ЦЭШЛ / А.Г. Янишевская // Литье и металлургия. – 2002. - №3. – С. 35-38. (100 % соискателя)

30. Янишевская, А.Г. Центробежное электрошлаковое литье плоских фланцев / А.Г. Янишевская, С.Н. Жеребцов // Литейное производство. – 2004. - №11. – С. 27-29. (67 % соискателя)

31. Янишевская, А.Г. Программа расчетов химического состава металла и шлака при электрошлаковом литье / А.Г. Янишевская, И.С. Быстрова: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ - М.: ГКЦИТ ОФАП, 2006. - №2006611655. (50 % соискателя)

32. Янишевская, А.Г. Программа расчетов химических процессов при электрошлаковом литье / А.Г. Янишевская, И.С. Быстрова: свидетельство №2005611229 от 25.05.2005. (50 % соискателя)

10 ~