



А. А. Иванова, А. Б. Бирюков

A photograph of an industrial metal casting process. Several bright, glowing streams of molten metal are being poured from large ladles into molds. The scene is dimly lit, with the primary light source being the intense orange and yellow glow of the molten metal. The background shows industrial machinery and structures.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ
МЕТАЛЛОВ**

«Инфра-Инженерия» 

Иванова А. А., Бирюков А. Б.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛОВ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2022

УДК 51-74:621.746
ББК 34.327
И21

Рекомендовано ученым советом ГОУВПО
«Донецкий национальный технический
университет» в качестве научного издания
(протокол № 3 от 23.04.2021 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии стали
и сплавов ДонНТУ *А. А. Троянский*;

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных
технологий ДонНУ *В. К. Толстых*

Иванова, А.А.

И21 Математическое моделирование тепловых процессов непрерывной раз-
ливки металлов : монография / А. А. Иванова, А. Б. Бирюков. – Москва ;
Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0898-1

Представлены методы математического и компьютерного моделирования для изучения тепловых процессов, происходящих в непрерывном слитке во время его движения в области кристаллизатора и в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), а также тепловых процессов в рабочей стенке кристаллизатора. Изложены новые научно обоснованные технические решения по исследованию и совершенствованию организации теплотехнической части процесса разлива металлов в машинах непрерывного литья заготовок и способов повышения качества металлургической продукции.

Для инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных институтов, металлургических и машиностроительных предприятий, а также преподавателей и студентов технических вузов.

УДК 51-74:621.746
ББК 34.327

ISBN 978-5-9729-0898-1

© Иванова А. А., Бирюков А. Б., 2022

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. Обзор методов математического моделирования тепловых процессов в непрерывном слитке и кристаллизаторе	10
1.1. Краткая историческая справка о развитии технологии непрерывной разливки.....	10
1.2. Математическое моделирование поля температур непрерывного слитка и стенок кристаллизатора МНЛЗ	12
1.2.1. Математическая модель тепломассопереноса в непрерывном слитке с классическим условием Стефана	14
1.2.2. Математическая модель квазиравновесной зоны.....	15
1.2.3. Методы учета диффузионных процессов при затвердевании металлов и сплавов.....	18
1.2.4. Моделирование влияния гидродинамических процессов в расплавленной части на поле температур непрерывного слитка.....	19
1.2.5. Модель с определением положения двухфазной зоны методом задания функции состава гетерогенной смеси.....	23
1.2.6. Требования к прогнозным моделям	24
1.3. Анализ методов наблюдения тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ	26
1.3.1. Метод измерения перепада температур.....	27
1.3.2. Метод калориметрирования.....	28
1.3.3. Система «Кристаллизатор»	29
1.3.4. Измерения температуры при помощи волоконных световодов.....	30
1.3.5. Контроль эффективной толщины зазора между поверхностью слитка и стенкой кристаллизатора	32
1.3.6. Методики моделирования температурного поля кристаллизатора	34
1.4. Методики наблюдения глубины и формы жидкой лунки непрерывного слитка.....	36
1.5. Математическое моделирование при проектировании форсуночного охлаждения МНЛЗ	40
1.5.1. Методы идентификации коэффициента теплоотдачи под форсунками	41
1.5.2. Моделирование температурного поля непрерывного слитка для различных параметров форсуночного охлаждения	44
1.5.3. Критерий оптимальности размещения форсунок	45
1.6. Современные подходы к эффективному управлению теплотехническими процессами в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ	49
1.6.1. Определение рациональных теплотехнических параметров работы ЗВО	49
1.6.2. Критерии качества непрерывного слитка.....	53
1.6.3. Управление расходами охлаждающей воды в ЗВО.....	54

1.7. Методы изучения закономерностей образования макроструктуры непрерывного слитка	58
1.8. Постановка задач	62

ГЛАВА 2. Системный анализ математических моделей температурного поля и границы фазового перехода в непрерывном слитке	65
2.1. Формализация моделируемого процесса теплопереноса внутри непрерывного слитка	65
2.2. Уравнения теплопроводности, граничные и начальные условия для поля температур непрерывного слитка	68
2.3. Конечно-разностные аналоги уравнений теплопроводности и граничных условий	71
2.4. Методы задания положения границы фазового перехода в кристаллизующемся непрерывном слитке	73
2.4.1. Задача Стефана	74
2.4.2. Численное решение задачи с условием Стефана	75
2.4.3. Определение положения двухфазной зоны методом задания эффективной теплоемкости	79
2.4.4. Моделирование температурного поля непрерывного слитка с определением положения границы фазового перехода методом задания функции состава гетерогенной смеси	80
2.4.5. Определение положения двухфазной зоны методом задания условий Стефана для границ однофазной и двухфазной областей	87
2.5. Сравнительный анализ методов моделирования положения границы фазового перехода	89
2.6. Выводы	91

ГЛАВА 3. Математическое моделирование и система диагностики теплотехнических параметров кристаллизатора	92
3.1. Характеристика тепловых процессов в кристаллизаторе	92
3.2. Математическая модель температурного поля кристаллизатора	95
3.3. Результаты моделирования температурного поля стенок кристаллизатора и слитка внутри кристаллизатора	99
3.4. Процессы усадки непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе	102
3.4.1. Расчет естественной усадки непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе	102
3.4.2. Определение интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора	107
3.4.3. Выбор оптимальной скорости разливки сортовых заготовок через многоконусные кристаллизаторы	109
3.4.4. Определение оптимального уровня металла в кристаллизаторе	113
3.4.5. Разработка методики для проектирования конусности кристаллизаторов	117

3.5. Неравномерность затвердевания непрерывнолитых заготовок в радиальных кристаллизаторах, вызванная воздействием падающей струи металла.....	120
3.6. Влияние неравномерного охлаждения в кристаллизаторе на температурное поле заготовки.....	132
3.7. Оперативная диагностика теплотехнических процессов в кристаллизаторе.....	138
3.8. Выводы	145

ГЛАВА 4. Изменения формы жидкой лунки при варьировании параметров процесса непрерывной разливки

4.1. Процессы, определяющие положение двухфазной зоны и глубину жидкой лунки в непрерывнолитой заготовке.....	146
4.2. Моделирование температурного поля непрерывнолитого сляба и формы жидкой лунки.....	148
4.3. Исследование функций чувствительности и влияния различных параметров процесса разливки на форму и глубину жидкой лунки слябовой заготовки.....	150
4.3.1. Функции чувствительности.....	150
4.3.2. Реакция формы и глубины жидкой лунки на варьирование скорости вытягивания слитка	150
4.3.3. Реакция формы и глубины жидкой лунки на изменения параметров вторичного охлаждения слитка.....	151
4.3.4. Исследование влияния геометрических и теплофизических параметров на глубину и форму жидкой лунки.....	153
4.4. Исследование реакции формы и глубины жидкой лунки на изменения параметров разливки для сортовой заготовки.....	155
4.5. Экспериментальное подтверждение результатов моделирования для сортовой заготовки.....	158
4.6. Выводы	159

ГЛАВА 5. Методика расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения.....

5.1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи под форсунками.....	161
5.2. Идентификация коэффициента теплоотдачи	170
5.3. Моделирование температурного поля непрерывного слитка для различных параметров форсуночного охлаждения	174
5.4. Расчет оптимальных параметров форсуночного охлаждения одного уровня для непрерывнолитого сляба.....	178
5.5. Неравномерность распределения температуры поверхности по длине заготовки в зоне вторичного охлаждения.....	186
5.6. Рациональное распределение интенсивности охлаждения поверхности круглой непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения	192
5.7. Выводы	200

ГЛАВА 6. Определение рациональных режимов расхода охлаждающей воды в ЗВО	201
6.1. Критерии качества температурного поля непрерывного слитка	201
6.2. Прогнозное управление тепловым состоянием непрерывного слитка.....	213
6.3. Определение рациональных параметров тепловой работы ЗВО слябовых МНЛЗ.....	221
6.4. Выводы	229
ГЛАВА 7. Исследование влияния тепловых процессов на формирование макроструктуры непрерывного слитка	230
7.1. Структурные зоны массивного стального слитка.....	230
7.2. Моделирование поля температур большого стального слитка.....	234
7.3. Прогнозное моделирование структуры для непрерывного слитка.....	236
7.4. Сравнительный анализ особенностей формирования структуры стального и латунного слитков	239
7.5. Математический прогноз формирования структурных зон в массивном латунном слитке	245
7.6. Влияние структурного критерия Пекле на процесс формирования столбчатых кристаллов	248
7.7. Влияние термального критерия Пекле на процесс формирования столбчатых кристаллов в непрерывном латунном слитке	253
7.8. Выводы	257
ЛИТЕРАТУРА	258