



Д. И. ГАБЕЛАЯ
З. К. КАБАКОВ
Ю. В. ГРИБКОВА

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Д. И. Габелая, З. К. Кабаков, Ю. В. Грибкова

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2019

УДК 669.18

ББК 34.327

Г12

Габелая, Д. И.

Г12 Теплофизические основы технологии непрерывной разливки стали :
монография / Д. И. Габелая, З. К. Кабаков, Ю. В. Грибкова. – Москва ;
Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 400 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0348-1

Приведены результаты исследований теплообменных процессов при затвердевании и охлаждении слабов на технологической линии «МНЛЗ – холодный склад». Предложена усовершенствованная методика математического моделирования теплофизических процессов формирования непрерывнолитой заготовки, улучшены некоторые существующие и разработаны новые модели техпроцессов, разработаны методики расчета показателей и выявлен ряд закономерностей. Даны рекомендации для практического применения результатов исследования.

Для специалистов в области чёрной металлургии, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов металлургических направлений.

УДК 669.18

ББК 34.327

ISBN 978-5-9729-0348-1

© Габелая Д. И., Кабаков З. К., Грибкова Ю. В., 2019

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР 9	
1.1. Характеристика технологии непрерывной разливки стали и выявление путей совершенствования технологического процесса и оборудования на линии «МНЛЗ – «холодный» склад» 9	
1.2. Характеристика факторов, оказывающих влияние на качество продукции при непрерывной разливке стали..... 16	
1.3. Проблемы методологии математического моделирования процессов затвердевания и охлаждения непрерывного слитка..... 25	
1.3.1. Применение системного подхода при моделировании..... 29	
1.3.2. Математическое моделирование затвердевания и охлаждения слитка на технологической линии МНЛЗ..... 33	
1.3.3. Особенности моделирования тепловых и гидродинамических явлений при затвердевании слитка на МНЛЗ 36	
1.3.4. Математическое моделирование тепловых процессов в системе «слиток-кристаллизатор» в стационарных и переходных режимах разливки 48	
1.3.5. Моделирование процесса охлаждения слябов на «холодном» складе..... 56	
1.3.6. Моделирование усадки непрерывнолитых заготовок 61	
1.3.7. Проблема определения теплофизических характеристик сплавов системы Fe-C при математическом описании тепловых процессов .. 73	
1.3.8. Проблемы тестирования численного решения задачи затвердевания и охлаждения заготовки на МНЛЗ..... 76	
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ «МНЛЗ – «ХОЛОДНЫЙ» СКЛАД» 79	
2.1. Общая методология математического моделирования..... 79	
2.2. Математическая модель затвердевания и охлаждения непрерывного слитка 82	
2.2.1. Способ учета перегрева при моделировании затвердевания и охлаждения непрерывного слитка 86	
2.2.2. Способ учета влияния термоконвективного и циркуляционного движения металла на тепловые процессы 92	
2.3. Численная модель затвердевания и охлаждения 95	
2.4. Тестирование модели..... 101	

2.4.1. Тестирование численного решения задачи затвердевания металла..	101
2.4.2. Тестирование системы методом теплового баланса	109
2.5. Проверка адекватности модели объекту.....	113
2.6. Моделирование теплового состояния сляба с корректным учетом тепловых и гидродинамических явлений при разливке на МНЛЗ	123
2.6.1. Выбор исходных данных для моделирования	123
2.6.2. Обобщение данных по коэффициентам теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ	127
2.6.3. Изучение влияния способа моделирования подвода жидкого металла в кристаллизатор на процесс формирования заготовки на технологической линии МНЛЗ.....	131
 ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-C....	
3.1. Коэффициент эффективной теплоёмкости $c_{\text{эфф}}(T)$	146
3.2. Зависимость теплопроводности от температуры $\lambda(T)$	161
3.3. Зависимость плотности от температуры $\rho(T)$	162
3.4. Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры $\alpha_l(T)$	166
3.4.1. Обобщение экспериментальных значений коэффициентов линейного расширения для различных групп марок стали.....	166
3.4.2. Методика расчета коэффициента линейной усадки сплавов системы Fe-C	171
3.5. Пример результатов расчета теплофизических характеристик железоуглеродистых сплавов при $[\%C] = 0,025-0,415$	178
 ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «СЛИТОК-КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ»	
4.1. Формализация физического описания тепловых процессов в системе «слиток-кристаллизатор»	188
4.2. Стационарная модель тепловых процессов в системе «слиток-кристаллизатор»	190
4.2.1. Математическое описание тепловых процессов в системе «слиток-кристаллизатор»	190
4.2.1.1. Подмодель процессов затвердевания и охлаждения слитка ...	192
4.2.1.2. Подмодель тепловых процессов в рабочей стенке кристаллизатора.....	194
4.2.2. Проверка адекватности и адаптация модели	197
4.3. Динамическая модель тепловых процессов в системе «слиток-кристаллизатор»	202

4.3.1. Подмодель тепловых процессов в формирующемся слитке	204
4.3.2. Подмодель процессов в рабочей стенке кристаллизатора.....	207
4.3.3. Определение углового коэффициента излучения с поверхности шлака на медную стенку кристаллизатора.....	208
4.3.4. Проверка адекватности модели	211
4.4. Обобщение данных по величине связи уровня в кристаллизаторе	214
4.5. Определение рациональных параметров геометрии каналов охлаждения кристаллизатора	217
4.6. Исследование влияния переходных режимов разливки на тепловые процессы в слитке и стенке кристаллизатора	241
4.7. Изучение формирования шлакового гарнисажа в системе «слиток- кристаллизатор»	250
4.7.1. Модель формирования гарнисажа на стенках кристаллизатора МНЛЗ	251
4.7.2. Проверка адекватности модели	265
4.7.3. Исследование закономерностей формирования шлакового гарнисажа в кристаллизаторе МНЛЗ	256
 ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЛЯБОВ НА «ХОЛОДНОМ» СКЛАДЕ	258
5.1. Исследование параметров теплообмена при охлаждении слябов на воздухе	258
5.1.1. Методика восстановления параметров теплообмена	258
5.1.2. Результаты восстановления параметров теплообмена.....	261
5.2. Разработка математической модели охлаждения штабеля слябов на «холодном» складе.....	264
5.2.1. Общее математическое описание	264
5.2.2. Определение параметров распределения температуры в слябе на выходе из МНЛЗ	268
5.2.3. Начальное распределение температуры в штабеле	271
5.2.3.1. Начальное распределение температуры по высоте штабеля	271
5.2.3.2. Формирование начального распределения температуры в штабеле	278
5.2.4. Способ учета взаимного влияния штабелей на тепловые процессы при охлаждении слябов на холодном складе.....	280
5.2.5. Исследование углового коэффициента лучистого теплообмена.....	284
5.2.6. Проверка адекватности модели	289

5.3. Исследование процесса охлаждения штабелей слябов на «холодном» складе методом математического моделирования	296	
 ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДКИ ЗАГОТОВКИ НА ЛИНИИ «МНЛЗ – «ХОЛОДНЫЙ» СКЛАД».....		307
6.1. Способ расчета усадки непрерывнолитой заготовки	307	
6.2. Математическая модель формирования зазора между заготовкой и кристаллизатором МНЛЗ	310	
6.3. Исследование усадки заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ.....	321	
6.3.1. Исследование усадки оболочки заготовки в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ.....	322	
6.3.2. Исследование усадки перитектических сталей в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ	327	
6.4. Исследование усадки сляба в зоне вторичного охлаждения	334	
6.4.1. Рекомендации по выбору раствора между роликами МНЛЗ	344	
6.5. Исследование сокращения мерной длины слябов в процессе усадки на технологической линии «МНЛЗ – «холодный» склад»	346	
6.5.1. Экспериментальное изучение усадки мерной длины слябов на «холодном» складе.....	347	
6.5.2. Способ расчета сокращения мерной длины слябов в процессе усадки.....	350	
6.5.3. Исследование сокращения мерной длины слябов методом математического моделирования	351	
6.5.4. Рекомендации по раскрою слябов и экономии металла	359	
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	361	
 ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	365	
 ЛИТЕРАТУРА	367	
 Приложение 1	397	
Приложение 2	398	
Приложение 3	401	
Приложение 4	402	
Приложение 5	403	
Приложение 6	404	
Приложение 7	405	