



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 слябов 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<br>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<br>вторичного охлаждения МНЛЗ .....  | 127 |
| 2.6.3. Изучение влияния способа моделирования подвода жидкого металла<br>в кристаллизатор на процесс формирования заготовки<br>на технологической линии МНЛЗ ..... | 131 |

### ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-C.....

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Коэффициент эффективной теплоёмкости $c_{эфф}(T)$ .....   | 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<br>линейного расширения для различных групп марок стали .....  | 166 |
| 3.4.2. Методика расчета коэффициента линейной усадки<br>сплавов системы Fe-C .....                                       | 171 |
| 3.5. Пример результатов расчета теплофизических характеристик<br>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<br>«слиток-кристаллизатор» ..... | 188 |
| 4.2. Стационарная модель тепловых процессов в системе<br>«слиток-кристаллизатор» .....               | 190 |
| 4.2.1. Математическое описание тепловых процессов в системе<br>«слиток-кристаллизатор» .....         | 190 |
| 4.2.1.1. Подмодель процессов затвердевания и охлаждения слитка ...                                   | 192 |
| 4.2.1.2. Подмодель тепловых процессов в рабочей<br>стенке кристаллизатора .....                      | 194 |
| 4.2.2. Проверка адекватности и адаптация модели .....  | 197 |
| 4.3. Динамическая модель тепловых процессов в системе<br>«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<br>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<br>каналов охлаждения кристаллизатора .....                        | 217        |
| 4.6. Исследование влияния переходных режимов разливки на тепловые<br>процессы в слитке и стенке кристаллизатора ..... | 241        |
| 4.7. Изучение формирования шлакового гарнисажа в системе «слиток-<br>кристаллизатор» .....                            | 250        |
| 4.7.1. Модель формирования гарнисажа на стенках<br>кристаллизатора МНЛЗ .....   | 251        |
| 4.7.2. Проверка адекватности модели .....   | 265        |
| 4.7.3. Исследование закономерностей формирования шлакового<br>гарнисажа в кристаллизаторе МНЛЗ .....                  | 256        |
| <b>ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЛЯБОВ<br/>НА «ХОЛОДНОМ» СКЛАДЕ .....</b>                                | <b>258</b> |
| 5.1. Исследование параметров теплообмена при охлаждении<br>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<br>на «холодном» складе.....                          | 264        |
| 5.2.1. Общее математическое описание .....  | 264        |
| 5.2.2. Определение параметров распределения температуры в слябе<br>на выходе из МНЛЗ .....                            | 268        |
| 5.2.3. Начальное распределение температуры в штабеле.....   | 271        |
| 5.2.3.1. Начальное распределение температуры<br>по высоте штабеля .....   | 271        |
| 5.2.3.2. Формирование начального распределения<br>температуры в штабеле .....   | 278        |
| 5.2.4. Способ учета взаимного влияния штабелей на тепловые<br>процессы при охлаждении слябов на холодном складе.....  | 280        |
| 5.2.5. Исследование углового коэффициента лучистого<br>теплообмена.....   | 284        |
| 5.2.6. Проверка адекватности модели .....   | 289        |



|   |            |
|---|------------|
| 5.3. Исследование процесса охлаждения штабелей слябов на «холодном» складе методом математического моделирования .....      | 296        |
| <b>ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДКИ ЗАГОТОВКИ НА ЛИНИИ «МНЛЗ – «ХОЛОДНЫЙ» СКЛАД».....</b>                                       |            |
| 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        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>361</b> |
| <b>ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....</b>  | <b>365</b> |
| <b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>   | <b>367</b> |
| Приложение 1 .....  | 397        |
| Приложение 2 .....  | 398        |
| Приложение 3 .....  | 401        |
| Приложение 4 .....  | 402        |
| Приложение 5 .....  | 403        |
| Приложение 6 .....  | 404        |
| Приложение 7 .....  | 405        |