

ВЫСШЕЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков

# НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА СТАЛЕЙ



[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)



**ЭБС**  
**ЛАНЬ**

К. Н. ВЛОВИН,  
В. В. ТОЧИЛКИН,  
И. М. ЯЧИКОВ

# НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА СТАЛЕЙ

*Монография*

Издание второе, исправленное и переработанное



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА •  
• КРАСНОДАР •  
2022

УДК 669.18  
ББК 34.327я73

**В 25**      **Вдовин К. Н.** Непрерывная разливка сталей : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. — 2-е изд., испр. и перераб. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 732 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Текст : непосредственный.

**ISBN 978-5-8114-4953-8**

В книге рассматривается современное состояние черной металлургии. Для металлургической промышленности появление машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) стало крупнейшим достижением, обеспечивающим необыкновенный прорыв в увеличении производительности труда, а также в экономии произведенного жидкого металла. С появлением МНЛЗ в металлургии началась новая эра производства стали, которая существенным образом изменила всю структуру процесса подготовки стали к разливке и прокатке, она продолжается и сейчас.

Монография предназначена аспирантам направления «Технологии материалов» и будет полезна студентам высших учебных заведений, обучающимся по программам бакалавриата и магистратуры направления «Металлургия».

УДК 669.18  
ББК 34.327я73

**Обложка**  
*П. И. ПОЛЯКОВА*

© Издательство «Лань», 2022  
© Коллектив авторов, 2022  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ.....</b>	<b>5</b>
1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ .....	5
1.2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК .....	7
1.3. РАЗЛИВКА СТАЛИ НА СЛЯБЫ .....	16
1.4. РАЗЛИВКА СТАЛИ НА СОРТОВЫХ МНЗ .....	30
1.5. ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ С РАЗЛИВКОЙ В МНЛЗ .....	43
1.6. НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА ПОЛОС .....	52
1.7. НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА БЛЮМОВ .....	68
1.8. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНЛЗ .....	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 1 .....	106
<b>Глава 2. ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ СМЕСИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ.....</b>	<b>117</b>
2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЯХ.....	117
2.2. ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ СМЕСИ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ .....	118
2.3. ШОС ДЛЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ .....	131
2.4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧИ ШОС В КРИСТАЛЛИЗАТОР.....	139
2.5. ПРИМЕНЕНИЕ ШОС И ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЕ .....	150
2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ШЛАКОВОЙ ПРОСЛОЙКИ .....	154
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К ГЛАВЕ 2 .....	166
<b>Глава 3. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ КОВШИ .....</b>	<b>178</b>
3.1. КОНСТРУКЦИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША.....	180
3.2. ДОЗИРОВАНИЕ СТАЛИ .....	197
3.3. ПОГРУЖНЫЕ СТАКАНЫ .....	209
3.4. РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ.....	221
3.4.1. Источники загрязнения металла включениями .....	221
3.4.2. Механизмы удаления неметаллических включений .....	224
3.5. РАФИНИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ .....	226
3.6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ .....	246
3.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ .....	256
3.7.1. Физические свойства шлака и стали.....	256

3.7.2. Уравнение движения жидкости.....	268
3.7.3. (к-ε)-модель турбулентности .....	270
3.7.4. Модель процесса рафинирования стали.....	272
3.8. СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ СОРТОВОЙ МНЛЗ .....	293
3.8.1. Условия математического моделирования процесса движения потоков стали .....	294
3.8.2. Результаты моделирования.....	299
3.8.3. Разливка стали открытой струёй.....	319
3.8.4. Особенности эксплуатации и использования элементов системы распределения потоков стали .....	323
3.8.5. Удаление неметаллических включений .....	324
3.9. СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ .....	332
3.9.1. Разработка конструкций элементов промежуточного ковша слябовых МНЛЗ .....	334
3.9.2. Разработка конструкций элементов систем распределения потоков стали в разливочной камере.....	339
3.9.3. Разработка элементов систем распределения потоков стали одноручьевых промежуточных ковшей слябовых МНЛЗ.....	340
3.10. ПОДГОТОВКА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ И ПОГРУЖНЫХ СТАКАНОВ К РАЗЛИВКЕ.....	346
3.11. ПОДГОТОВКА МНЛЗ К ПРИЁМУ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА.....	347
Библиографический список к главе 3 .....	349
<b>Глава 4. КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ МНЛЗ.....</b>	<b>365</b>
4.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ .....	365
4.2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ .....	401
4.2.1. Выбор материала рабочих стенок кристаллизатора.....	402
4.2.2. Покрытия стенок кристаллизаторов .....	422
4.2.3. Совершенствование конструкции стенок кристаллизаторов .....	432
4.2.4. Использование кристаллизаторов с охлаждающими каналами различной формы.....	450
4.2.5. Стабилизация уровня металла в кристаллизаторе.....	453
4.3. ТЕПЛОВАЯ РАБОТА КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ .....	453
4.3.1. Математическая модель затвердевания сляба и усадки слитка в кристаллизаторе МНЛЗ.....	458
4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СТЕНКЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ .....	466

4.4.1. Коэффициент теплопередачи в стенке со щелевыми прямоугольными каналами охлаждения .....	468
4.4.2. Коэффициент теплопередачи в стенке со щелевыми прямоугольными каналами охлаждения .....	471
4.4.3. Коэффициент теплопередачи стенки с трапецидальными каналами охлаждения .....	473
4.4.4. Сравнение расчетных коэффициентов теплопередачи для стенок с различными охлаждающими каналами .....	475
4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СТЕНКЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА С ОХЛАЖДАЮЩИМИ КАНАЛАМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ .....	477
4.5.1. Математическая модель температурного поля в стенке кристаллизатора .....	477
4.5.2. Моделирование температурного поля в стенке кристаллизатора с охлаждающими каналами различной формы .....	481
4.6. РАБОТА ГИДРОСИСТЕМЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРА .....	490
4.6.1. Теоретические основы гидравлических расчетов при турбулентном течении жидкости в каналах .....	492
4.6.2. Алгоритм расчета гидравлических характеристик кристаллизатора .....	500
4.7. КОНСТРУКЦИЯ УЗЛА КРИСТАЛЛИЗАТОРА С МЕХАНИЗМОМ КАЧАНИЯ .....	505
4.7.1. Развитие конструкции узла качания .....	507
4.7.2. Основные параметры синусоидального закона качания кристаллизатора .....	512
4.8. ПОДГОТОВКА МНЛЗ К РАЗЛИВКЕ .....	535
4.9. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ МНЛЗ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОРЫВОВ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ .....	540
4.9.1. Механизм возникновения прорыва жидкого металла при зависании корочки слитка в кристаллизаторе .....	546
4.9.2. Математическая модель расчета распределения по периметру кристаллизатора мгновенных значений температур участков медных стенок кристаллизатора .....	555
4.9.3. Методика диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе .....	559
4.9.4. Обобщенная методика диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе МНЛЗ .....	567
Библиографический список к главе 4 .....	570

<b>Глава 5. ЗОНА ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ.....</b>	<b>591</b>
5.1. Ролики МНЛЗ.....	604
5.2. Опыт эксплуатации первых секций МНЛЗ ММК .....	626
5.3. Охлаждение роликов .....	631
5.4. Охлаждение заготовок .....	634
5.5. Исследование гидродинамических характеристик генератора опытной конструкции.....	656
5.6. Исследование свойств водовоздушной смеси .....	672
5.7. Конструкции современных форсунок для охлаждения слябов .....	681
5.8. «Мягкое обжатие» сляба .....	692
5.9. Проверка элементов системы вторичного охлаждения и систем охлаждения оборудования.....	710
5.10. Проверка элементов поддерживающей системы.....	710
Библиографический список к главе 5 .....	711