

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ



**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА  
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
И МАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ**

*Монография*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.18  
ББК 34.327  
Т33

*А в т о р ы :*

З. К. Кабаков, Ю. А. Самойлович, Д. И. Габеляя,  
А. Г. Подорванов, Э. Р. Шифман, В. М. Брыксин

*Р е ц е н з е н т ы :*

начальник отдела машин непрерывного литья металлов АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»  
канд. техн. наук *Шахов Сергей Иосифович*;  
профессор кафедры теплоэнергетики и экологии  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный институт» профессор,  
д-р техн. наук *Темлянцев Михаил Викторович*;  
профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники  
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», заслуженный работник  
высшей школы РФ, профессор, д-р техн. наук *Шестаков Николай Иванович*

**Т33**      **Теория и практика применения электрических и магнитных воздействий при непрерывной разливке стали : монография / [З. К. Кабаков и др.]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 164 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-0662-8**

Рассмотрены основные способы воздействия на непрерывно отливаемый стальной слиток, применяемые для улучшения качества и расширения сортамента металла: кондукционный способ электромагнитного перемешивания, способ торможения затопленной струи жидкой стали в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок постоянным магнитным полем и способ деформации профиля сечения свободной струи стали, подаваемой в кристаллизатор при литье тонких слябов. Выполнено обобщение результатов исследований, приведены методики и формулы для расчетов.

Для научных и инженерных работников, занимающихся разработкой и освоением электромагнитных устройств с целью повышения качества и расширения сортамента металла при непрерывной разливке. Издание может быть полезно преподавателям, аспирантам и студентам металлургических направлений подготовки.

УДК 669.18  
ББК 34.327

ISBN 978-5-9729-0662-8

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	8
1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ .....	9
1.1. Электромагнитные воздействия на затвердевающий слиток при непрерывной разливке стали .....	9
1.2. Устройства КЭМП, ЭМТ и металлургический эффект их использования .....	16
1.3. Теплофизические процессы в жидком ядре затвердевающего слитка при воздействии постоянного магнитного и электрического полей .....	21
1.3.1. Гидродинамические процессы .....	21
1.3.2. Экспериментальные исследования тепловых процессов при перемешивании и торможении жидкой фазы слитков .....	24
1.3.3. Математическое описание тепловых процессов в затвердевающем слитке при перемешивании жидкого ядра .....	29
1.3.4. Магнитные и электрические поля в слитке при применении устройств воздействия .....	32
1.4. Влияние гидродинамических процессов на показатели качества литого металла .....	33
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ЖИДКУЮ ФАЗУ ЗАТВЕРДЕВАЮЩИХ СЛИТКОВ.....	37
2.1. Теоретические предпосылки к физическому моделированию гидродинамических процессов .....	37
2.2. Моделирование КЭМП с использованием электролита .....	42
2.3. Моделирование КЭМП с использованием жидкого металла – галлия .....	47
2.4. Обобщение и анализ результатов изучения МГД-процессов при КЭМП .....	53
2.5. Влияние магнитного поля на струю жидкого металла.....	56
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ ЯДРЕ СЛИТКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КЭМП, ЭМТ И ДС .....	64
3.1. Адаптация математической модели гидродинамических процессов при КЭМП по результатам физического моделирования .....	64
3.2. Моделирование гидродинамических процессов в жидком ядре слитка при использовании КЭМП .....	67
3.3. Закономерности торможения затопленной струи металла в поперечном магнитном поле .....	72
3.4. Закономерности деформации поперечного сечения открытой электропроводной струи в неоднородном магнитном поле .....	74

4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕМ СЛИТКЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КЭМП .....	78
4.1. Измерение температуры в слитках на МНЛЗ.....	78
4.2. Физическое моделирование теплопереноса при перемешивании жидкого металла.....	84
4.3. Математическое моделирование тепловых процессов при перемешивании жидкой фазы затвердевающих слитков.....	87
5. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ В СЛИТКЕ УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ .....	93
5.1. Определение основных параметров магнитной системы устройств .....	93
5.2. Магнитное поле между роликами .....	98
5.3. Физическое моделирование магнитной системы устройства ЭМТ.....	102
5.4. Распределение магнитной индукции в районе плоских полюсов.....	106
5.5. Распределение индукции в районе плоских шин с током .....	111
5.6. Определение основных параметров электрической системы устройств .....	116
6. РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ .....	122
6.1. Методология обоснования конструктивных и технологических параметров устройств .....	122
6.2. Устройство КЭМП роликового типа.....	125
6.3. Устройство КЭМП с центральной опорой .....	129
6.4. Устройство КЭМП брусьевого типа .....	136
6.5. Устройство КЭМП для кузнечного слитка.....	140
6.6. Устройство для магнитного торможения струи жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ .....	144
ЛИТЕРАТУРА .....	148
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	159