

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

*Монография*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.18  
ББК 34.327  
ТЗЗ

*А в т о р ы :*

*З. К. Кабаков, Ю. А. Самойлович, Д. И. Габеля,  
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 *Темлянцева 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*

**ТЗЗ 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

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из показателей технического уровня развития сталеплавильного производства является доля непрерывно-литого металла в общем производстве стали. В 2004 г. в России отлито 36 млн тонн заготовок на МНЛЗ (60 % от общего производства стали) [1]. В индустриально развитых странах на МНЛЗ разливается практически вся сталь. Такой уровень в немалой степени достигнут за счет применения различного рода электромагнитных воздействий. Воздействия на жидкую фазу затвердевающей заготовки позволяют расширить сортамент и марочник сталей отливаемых заготовок, увеличить производительность МНЛЗ и повысить качество литого металла. Среди многих способов электромагнитного воздействия наиболее известно электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкой фазы затвердевающих заготовок в районе кристаллизатора и в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ с помощью бегущего магнитного поля. Наряду со многими достоинствами устройства ЭМП имеют низкий КПД (0,5–2,0 %). Известен способ подачи металла в электромагнитный кристаллизатор для литья тонких слябов, который заключается в деформации профиля сечения струи (ДС) из круглого в прямоугольный с помощью высокочастотного индуктора переменной конфигурации. Данный способ требует дорогостоящего преобразователя частоты. В настоящее время в нашей стране и за рубежом применяются более простые и экономичные способы воздействия, в частности, кондуктивный способ ЭМП (КЭМП), метод электромагнитного торможения (ЭМТ) струи жидкой стали в кристаллизаторе, деформация профиля сечения открытой струи (ДС) жидкого металла постоянным магнитным полем и другие.

В СССР разработкой и освоением устройства КЭМП роликового типа на промышленной МНЛЗ занимались Пермский научно-исследовательский технологический институт (В.М. Федоров, В.Д. Субоч, Н.И. Тихонов) и ПМЗ (Б.И. Сахнов, В.Е. Гирский, Ф.М. Мурасов). Метод КЭМП опробован на опытной горизонтальной МНЛЗ при литье слитков размерами сечения 150×150 мм ВНИИМЕТМАШ (Ю.М. Рогачиков, В.Б. Ганкин, В.В. Звягин, М.Ф. Панин). Опытное-промышленное опробование устройства ЭМТ на Лиепайском МЗ «Сарканайс металургс» провел Институт физики Латвийской академии наук (Я.Я. Вадаманис, В.А. Голованов, Я.Я. Клявинь). Математическое моделирование тепловых процессов при перемешивании проводилось научными школами ЦНИИЧМ (В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, И.Л. Тяжелникова) и Красноярского университета (В.В. Соболев, П.М. Трофимов). Экспериментально-теоретическим изучением магнитогидродинамических процессов, происходящих в жидкой фазе затвердевающих слитков в условиях КЭМП и ЭМТ, занимались научные школы в ПГУ (А.И. Цаплин, М.Э. Манн) и в Институте физики Латвийской Академии наук (Г.Г. Бранновер, Э.В. Щербинин). Изучение процесса ДС в статическом магнитном поле и разработка устройств в нашей стране не проводились.

Благодаря усилиям указанных лиц и организаций начато освоение отдельных конструкций КЭМП и ЭМТ.

Общие принципы создания устройств КЭМП, ЭМТ и ДС отсутствовали, что явилось одним из препятствий на пути широкого промышленного применения новых технологий.

Решение этой проблемы выполнено в лаборатории нагрева, охлаждения и кристаллизации слитка Всесоюзного НИИ металлургической теплотехники (ВНИИМТ, г. Свердловск) под общим руководством заведующего лабораторией, доктора технических наук, профессора Ю.А. Самойловича. Работа проводилась в 1984–1991 гг. согласно хоздоговорам с научно-исследовательскими институтами, металлургическими заводами и комбинатами; в соответствии с тематическими планами ВНИИМТ и координационными планами головной технологической организации ЦНИИЧМ; в соответствии с программой работ по электромагнитному перемешиванию при непрерывной разливке стали на 1985–1987 гг., утвержденной первым заместителем министра черной металлургии С. В. Колпаковым, и Программой КНП ТП СЭВ (см. п. 4.3.4.4 «Разработка оборудования и технологических режимов электромагнитного перемешивания жидкой фазы непрерывного слитка в процессе затвердевания»).

Теоретические и экспериментальные работы выполнены в вычислительном центре и на опытно-экспериментальном заводе ВНИИМТ. Промышленные исследования проведены на МНЛЗ ПМЗ и НЛМК.

В данной монографии обобщены результаты собственных, отечественных и зарубежных исследований.

Решение указанной проблемы было невозможно без комплексного подхода, при котором рассматриваются все стороны проблемы: магнитно-гидродинамические, тепловые, электротехнические и металлургические.

Решение указанных задач предопределило структуру предлагаемой монографии. В первом разделе рассмотрено состояние проблемы применения электромагнитных воздействий на затвердевающий слиток в процессе непрерывной разливки. Предложена классификация электромагнитных воздействий и устройств КЭМП, рассмотрены указанные стороны проблемы, а также влияние гидродинамических процессов на затвердевание слитка и качество металла.

Второй и третий разделы посвящены физическому и математическому моделированию магнитно-гидродинамических процессов при КЭМП, ЭМТ и ДС. Приведены обобщенные зависимости в критериальной форме, связывающие основные характеристики гидродинамических процессов с параметрами воздействий. В четвертом разделе рассмотрены закономерности влияния перемешивания жидкого ядра на теплофизику затвердевания слитков. Описаны промышленный эксперимент и математическое моделирование тепловых процессов в слитке в условиях перемешивания жидкого ядра. Обсуждаются тепловые эффекты, возникающие при перемешивании жидкого ядра слитка. Приведена количественная зависимость, позволяющая стабилизировать температурный режим охлаждения поверхности слитка при использовании КЭМП.

В пятом разделе описаны методы определения основных параметров магнитной и электрической систем устройств для воздействий. Приведены закономерности распределений магнитного поля и электрического тока в слитке при различных способах их подвода.

Методология разработки устройств и результатов ее использования рассмотрены в шестой главе. Приведены результаты разработки и применения устройств КЭМП и ЭМТ на различных МНЛЗ. Приведены показатели качества металла, отлитого с использованием КЭМП.

Авторы монографии выражают глубокую признательность за помощь, оказанную в процессе проведения исследований, сотрудникам лаборатории И.М. Дистергефту, В.С. Кошману, Л.К. Онищуку, В.Г. Сыролеву, В.А. Рылову, В.В. Косильникову, Е.А. Чесницкой, Э.П. Романцевой, Г.А. Волковой и Т.Б. Лощенко. Авторы благодарят сотрудников НИИтяжмаш ПО «Уралмаш», ЦНИИЧМ, УралНИИЧМ, НИИПТМАШ, ЦЛК НЛМК, ПМЗ, НЛМК, ЧерМК, Институт физики металлов УрОАН РФ за содействие в выполнении работ.

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМП – индуктивное электромагнитное перемешивание  
КЭМП – кондуктивное электромагнитное перемешивание  
ЭМТ – электромагнитное торможение  
ЭДС – электромагнитная деформация струи  
МГД – магнитная гидродинамика  
ПМЗ – Пермский машиностроительный завод  
МЗ – металлургический завод  
НЛМК – Ново-Липецкий металлургический комбинат  
ЧерМК – Череповецкий металлургический комбинат  
ЦЛК – центральная лаборатория комбината  
ККЦ – кислородно-конвертерный цех  
ЭСЦ – электросталеплавильный цех  
МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок  
ЗВО – зона вторичного охлаждения  
МПНЛЗ – машина полунепрерывного литья заготовок  
НПО – научно-производственное объединение  
ВНИИМЕТМАШ – Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургического машиностроения  
ПО «Уралмаш» – Производственное объединение «Уральское машиностроение»  
ПНИТИ – Пермский научно-исследовательский технологический институт  
ЦНИИЧМ – Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии  
ВНИИМТ – Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники  
УралНИИЧМ – Уральский научно-исследовательский институт черных металлов  
УроАН – Уральское отделение Академии наук  
ОЭЗ – опытно-экспериментальный завод  
ПГУ – Пермский государственный университет



# 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

## 1.1. Электромагнитные воздействия на затвердевающий слиток при непрерывной разливке стали

К общим проблемам в области непрерывной разливки стали [1] относятся следующие:

- увеличение сортамента разливаемых заготовок с сечением, близким к готовой продукции;
- увеличение производительности МНЛЗ;
- расширение количества марок разливаемых сталей;
- повышение качества непрерывно-литых заготовок.

Для решения этих проблем применяют различного рода электромагнитные воздействия на затвердевающий слиток [2–11], а именно:

- 1) электрическое поле;
- 2) постоянный электрический ток;
- 3) переменный электрический ток;
- 4) постоянное статическое магнитное поле;
- 5) постоянный ток и статическое поле;
- 6) переменный ток и статическое поле;
- 7) постоянный ток и переменное поле;
- 8) переменный ток и переменное поле;
- 9) постоянное поле и переменное поле;
- 10) бегущее поле, создаваемое индуктором;
- 11) бегущее поле, создаваемое перемещением постоянного магнита.

Наиболее известно в нашей стране и за рубежом бегущее поле, создаваемое индуктором, или так называемое индукционное магнитное перемешивание (ЭМП) [3, 4, 6, 7]. ЭМП осуществляется с помощью индуктора, который генерирует магнитное поле, индуцирующее вихревые токи в жидкой фазе затвердевающего слитка. Взаимодействие этих токов и магнитного поля приводит к появлению электромагнитных сил, вызывающих перемешивание жидкого металла (рис. 1.1). При использовании ЭМП в процессе непрерывной разливки уменьшается осевая химическая и структурная неоднородность, повышается стабильность качества металла при отклонениях от технологического процесса литья.

В зарубежной и отечественной литературе подробно освещены вопросы улучшения качества литого металла в условиях применения ЭМП, размещения устройств на технологической линии МНЛЗ с

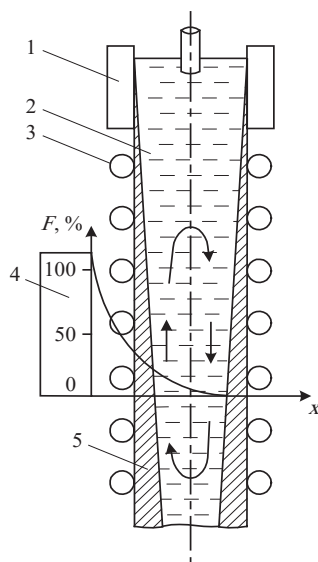


Рис. 1.1. Схема индукционного ЭМП жидкого ядра непрерывного слитка: 1 – кристаллизатор; 2 – жидкое ядро; 3 – ролики МНЛЗ; 4 – индуктор бегущего электромагнитного поля; 5 – корка слитка;  $F$  – плотность электромагнитных сил

целью устранения определенного вида дефектов, а также достоинства и недостатки устройств ЭМП [2–10]. Приведем здесь типичные примеры, характеризующие металлургический эффект от использования перемешивания и полезные при дальнейшем анализе других способов перемешивания.

При применении ЭМП увеличивается зона глобулярной структуры [12, 13]. На рис. 1.2 представлено изменение глобулярной зоны в зависимости от перегрева стали в проковше в условиях применения ЭМП и без ЭМП. Жидкая фаза слитка перемешивалась в ЗВО криволинейной МНЛЗ устройством ЭМП фирмы КОНКАСТ-АСЕА, расположенным за немагнитными поддерживающими слиток роликами. Мощность устройства составляла 400–800 кВт·А. Из рис. 1.2 видно, что даже при значительных перегревах металла зона глобулярных кристаллов составляет более 60 %. Применение ЭМП позволило ослабить требования по температуре металла, подаваемого на разливку.

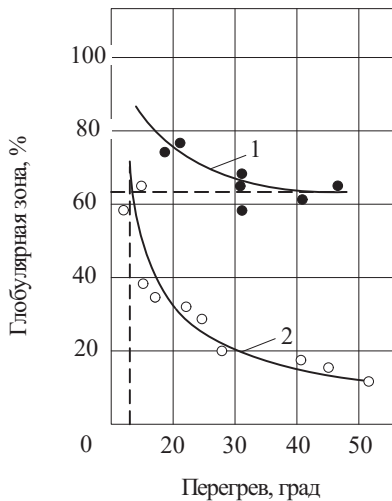


Рис. 1.2. Влияние перегрева жидкой стали на величину зоны глобулярных кристаллов: 1 – с применением ЭМП; 2 – без ЭМП

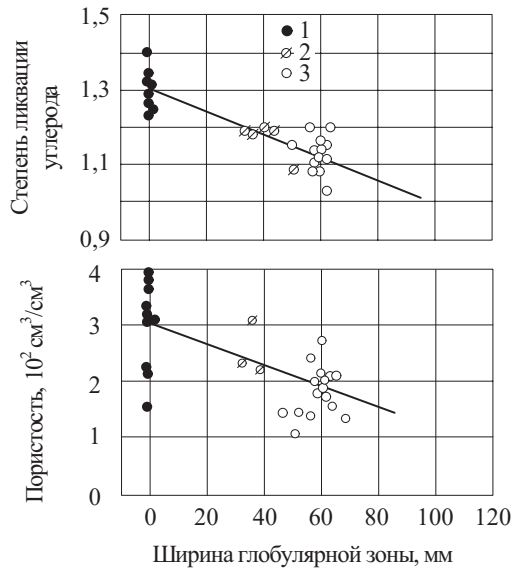


Рис. 1.3. Зависимость осевой ликвации и пористости от ширины глобулярной зоны в непрерывнолитых сортовых заготовках при ротационном ЭМП: 1 – без ЭМП; 2 – ЭМП с одним индуктором; 3 – то же, с несколькими индукторами

От величины зоны равноосных кристаллов зависит степень ликвации и пористость заготовки. Эти зависимости приведены на рис. 1.3 [14]. Из рис. 1.3 видно, что чем больше зона равноосных кристаллов, тем выше качество получаемой заготовки.

При помощи электромагнитного перемешивания в зоне вторичного охлаждения достигнуто улучшение внутренней структуры сортовых заготовок [15], поскольку использовано вращающееся поле. Выбор места для монтажа индукционных катушек вдоль заготовки не ограничивался. Наилучшее перемешива-

ющее действие достигалось в том случае, когда вращающееся поле располагалось ниже кристаллизатора, где толщина оболочки составляла примерно четверть диаметра заготовки. Степень рыхлости центральной зоны, пораженной раковинами и порами, выявляли путем радиоактивного просвечивания и оценивали по шкале (рис. 1.4). Статистический анализ обнаружил явное смещение рыхлости центральной зоны в сторону более высокого качества.

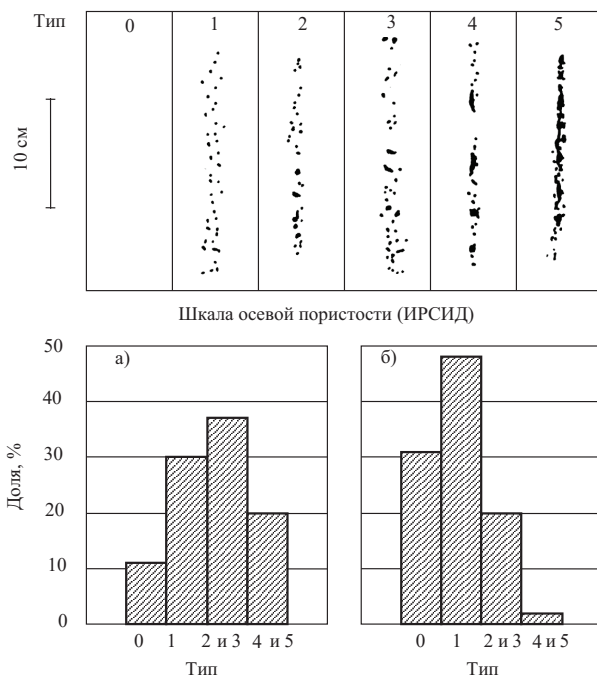


Рис. 1.4. Классификация осевой пористости и гистограмма распределения пористости сортовых заготовок:  
а – обычная технология; б – с ЭМП

При перемешивании в зоне вторичного охлаждения получают снижение осевой сегрегации. В работе [10] сообщается об опыте применения перемешивающего устройства на слябовой МНЛЗ на заводе «Фукуяма» фирмы «Нихон Кокан». Два перемешивающих устройства высокой электрической мощности были установлены с верхней и нижней сторон ручья на расстоянии 2,5 м от зеркала металла в кристаллизаторе. Каждое устройство состояло из двух вертикально перемешивающих индукторов, создающих бегущее поле. Заготовка поддерживалась башмаками из немагнитной стали. Данные на рис. 1.5 свидетельствуют об уменьшении сегрегации серы в центральной зоне.

При расположении устройств ЭМП в ЗВО [1, 9, 10] устраняются «мостики», предотвращается образование трещин, заполненных ликватами, уменьшается колебание степени осевой ликвации по длине слитка (рис. 1.6). В работах [15, 17, 18] указывается на возникновение отрицательной ликвации примесей (в частности, углерода), наблюдаемой на поперечных темплатах в виде белых полос.

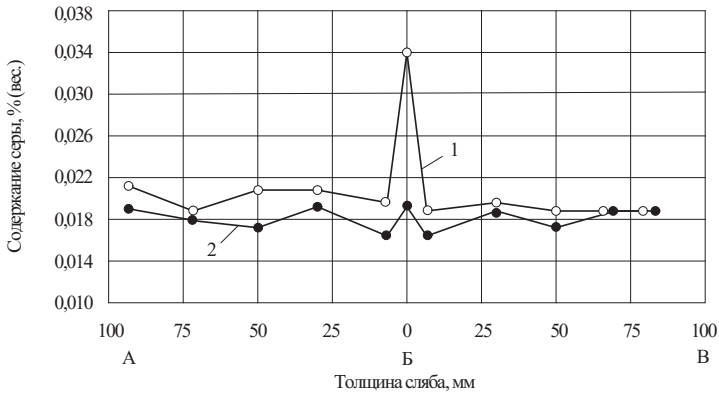


Рис. 1.5. Сегрегация серы в осевой зоне слябов с размерами сечения 250 × 1500 мм: 1 – без ЭМП; 2 – с ЭМП; А – верхняя сторона; Б – осевая зона; В – нижняя сторона

Участки отрицательной сегрегации возникают при внезапных изменениях морфологии фронта и скорости затвердевания из-за повышенной скорости течения на границе раздела твердой и жидкой фаз.

На рис. 1.7 показано изменение содержания углерода, титана и серы около обедненной зоны при максимальной скорости перемешивания [19]. Обоedнение «белой полосы» увеличивается с уменьшением коэффициента распределения растворенного элемента и с увеличением интенсивности перемешивания у фронта затвердевания. В связи с этим для устранения «белой полосы» уменьшают скорость движения металла у фронта кристаллизации за счет применения импульсного [20] и реверсивного [21, 22] режимов перемешивания, а также за счет увеличения зоны перемешивания и снижения скорости движения металла в жидком ядре.

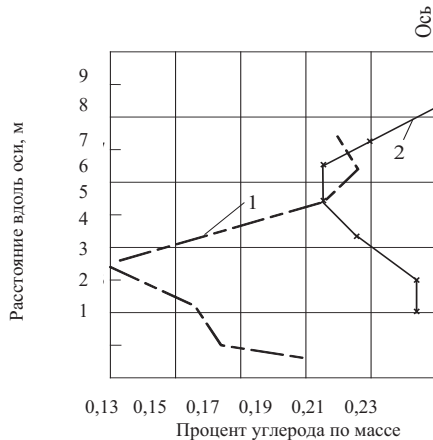


Рис. 1.6. Колебание содержания углерода вдоль оси слитка диаметром 200 мм: 1 – без ЭМП; 2 – с ЭМП; сталь 20МС5; скорость литья – 0,7 м/мин

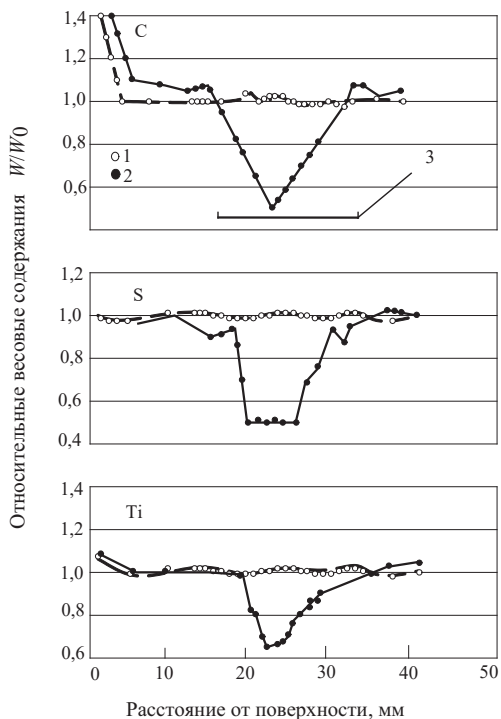


Рис. 1.7. Распределение углерода, серы и титана в «белой полосе» сортовых заготовок: 1 – без ЭМП, 2 – с ЭМП; 3 – участок «белой полосы»

Основным достоинством устройств ЭМП является отсутствие прямого контакта со слитком, или так называемая автономность устройства. К недостаткам следует отнести низкий коэффициент полезного действия (менее 2,0 %), громоздкость устройства и необходимость использования низкой частоты тока при расположении устройства за роликами.

В 1976–1987 гг. начинают применять более экономичные и менее сложные электромагнитные воздействия, основанные на использовании постоянного тока и статического магнитного поля или только статического магнитного поля [4, 6]. К этому классу воздействий относятся кондуктивный способ КЭМП жидкого ядра непрерывно отливаемого слитка, способ ЭМТ струи жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ и способ деформации профиля открытой струи металла (ДС) при подаче струи в кристаллизатор для литья тонких слябов.

Пример устройства КЭМП приведен на рис. 1.8. При КЭМП в части жидкого ядра слитка создают статическое магнитное поле и пропускают постоянный электрический ток во взаимно перпендикулярных направлениях. При таком скрещении электрического и магнитного полей возникает поле электромагнитных сил ( $f = i \cdot B$ ), приводящее жидкий металл в движение. Металлургический эффект при использовании КЭМП [4, 6] в целом аналогичен эффекту, получаемому при ЭМП. Коэффициент полезного действия устройств КЭМП в 5–10 раз выше, чем устройств ЭМП.

В способе ЭМТ на за-топленную струю действу-ют статическим магнитным полем [23, 24]. При движе-нии металла в магнитном поле, в металле индуциру-ются электрические токи  $i$ , при взаимодействии кото-рых с магнитным полем возникает поле электро-магнитных сил, направлен-ных против движения ме-талла и приводящих к раз-рушению струи (рис. 1.9). Замедление скорости дви-жения металла в струе при-водит к уменьшению глу-бины действия струи, рав-номерности и возрастанию толщины корки на выхо-де из кристаллизатора. С уменьшением глубины действия струи облегчают-ся условия всплывания не-металлических включений, что приводит к уменьше-нию количества включений в слитке. Промышленные испытания [25] показали возможность увеличения скорости вытягивания без опасности прорыва металла под кристаллизатором, оборудованном устройством ЭМТ, на 10–30 %.

Способ ДС основан на воздействии статического магнитного поля на от-крытую струю металла, при котором круглый профиль струи деформируется в плоский. Этот способ предложен в работе [26] для решения одной из наиболее сложных задач, возникающих при создании машин непрерывного литья тонких слябов [1], – подачи металла в узкую полость кристаллизатора. Результаты промышленного опробования таких устройств для деформации струи металла неизвестны.

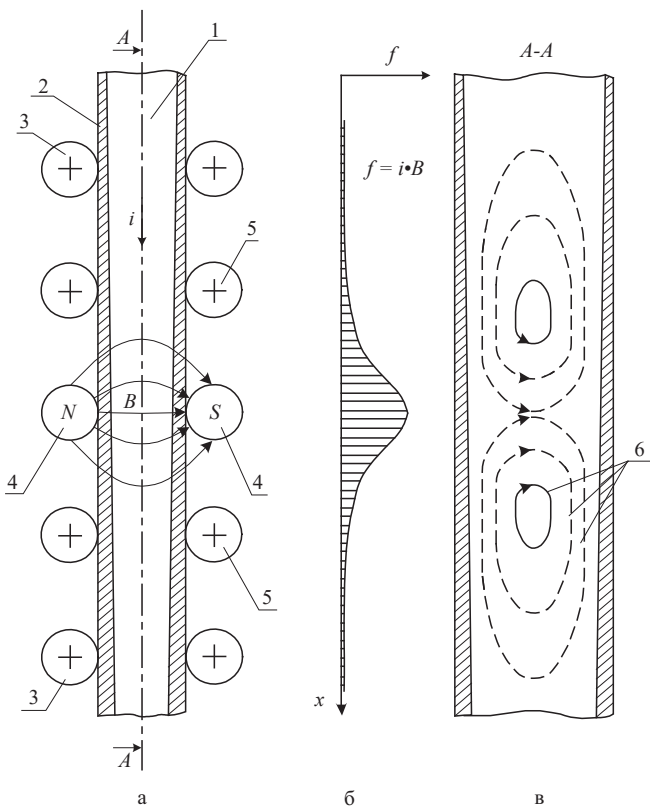


Рис. 1.8. Схема роликового варианта КЭМП (а), распределения электромагнитной силы (б) и циркуляции жидкой фазы (в) в жидком ядре непрерывного слитка: 1 – жидкая фаза; 2 – корка слитка; 3 – токоподводящие ролики; 4 – ролики-полюса электромагнита; 5 – немагнитные ролики; 6 – предполагаемые контуры циркуляции жидкой фазы

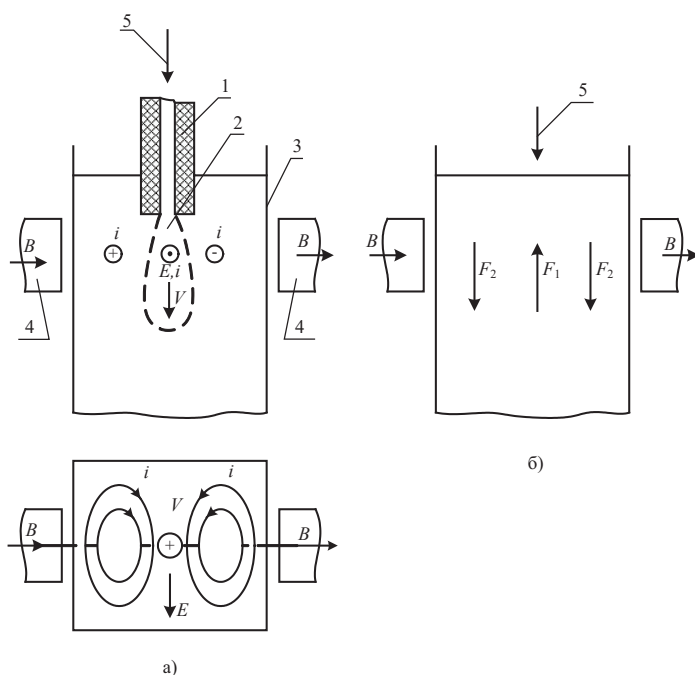


Рис. 1.9. Схема электромагнитного торможения струи жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ: 1 – разливочный стакан; 2 – струя жидкой стали; 3 – кристаллизатор; 4 – полюса электромагнита; 5 – подача металла из промковша; а – индуцирование э.д.с.  $E$  и замыкание токов при движении струи в магнитном поле  $B$ ; б – направление электромагнитных сил  $F$  при взаимодействии токов и магнитного поля  $B$

Таким образом, обзор методов электромагнитных воздействий, опробованных и применяемых при непрерывной разливке стали, показал, что наиболее известным и эффективным методом воздействия является ЭМП. При его использовании возрастает зона равноосных кристаллитов и, как следствие, улучшается структурная и химическая неоднородность литого металла. При применении КЭМП имеет место такой же металлургический эффект. Этот метод отличается от ЭМП простотой конструкции и большей экономичностью. При использовании КЭМП расход электроэнергии в 5–10 раз меньше, чем при использовании ЭМП.

К числу простых и эффективных методов повышения чистоты поверхностного слоя от неметаллических включений и увеличения рабочей скорости литья на 10–30 % относится метод ЭМТ струи жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ. Метод деформирования поперечного сечения свободной струи жидкого металла неоднородным статическим магнитным полем можно использовать для расширения сортамента непрерывно-литых заготовок.

## 1.2. Устройства КЭМП, ЭМТ и металлургический эффект их использования

Известные устройства КЭМП можно классифицировать следующим образом. В объеме жидкого ядра выделим три основных измерения: толщину, ширину и длину. Для создания циркуляции металла в жидком ядре достаточно создать поле электромагнитных сил с направлением вдоль одного из этих трех измерений. В свою очередь поле сил вдоль выбранного измерения можно создать, располагая векторы индукции и тока вдоль оставшихся двух измерений. При этом векторы индукции и тока можно поменять местами. Таким образом, циркуляция металла в жидком ядре слитка, возникающая под действием поля сил, может быть создана шестью вариантами скрещения индукции и электрического тока. В табл. 1.1 приведены известные устройства КЭМП, классифицированные согласно указанным вариантам скрещения векторов индукции и тока. Все устройства содержат магнитную систему и подводы тока к слитку. Для создания магнитного потока в магнитной системе применяют обмотки возбуждения или постоянные магниты. Подвод тока осуществляется с помощью элементов проводки слитка в машине или специальными токопроводами.

При подводе магнитного поля к слитку используют также элементы проводки, специальные полюса либо обходятся без них, как, например, в устройстве 2.1 (см. табл. 1.1). Для питания устройств КЭМП применяют низковольтные источники постоянного тока, состоящие из понижающего трансформатора и выпрямителя.

Как показывает анализ картин гидродинамики, приведенных в табл. 1.1, наибольшее количество заявок и патентов получено на устройствах (вариант скрещения 1), в которых поле электромагнитных сил создает циркуляцию металла в плоскости измерений «длины и ширины» жидкого ядра. При этом магнитное поле направлено через жидкое ядро по кратчайшему пути – толщине слитка. Ток направлен вдоль слитка. В этом случае для подвода тока и поля к слитку естественно использовать элементы проводки слитка, как это сделано в устройстве 1.1 (см. табл. 1.1).

Большие контуры циркуляции имеют место в варианте скрещения 3 при направлении силы вдоль слитка. Здесь получили распространение устройства, в которых для подвода тока и поля также применяются элементы проводки (ролики, брусья и центральная опора роликов). Наиболее трудно создать магнитный поток с большой индукцией вдоль длины и ширины слитка (см. табл. 1.1, варианты скрещения 2, 4–6).

Кроме того, в вариантах 5 и 6 длина поля сил и размер контура циркуляции ограничены толщиной жидкого ядра, поэтому зона обработки металла в жидком ядре очень короткая. В связи с этим, устройств, реализующих варианты 2, 4–6, практически нет.

Ниже изложены результаты испытаний некоторых устройств КЭМП, указанных в табл. 1.1.

В работе [39] приведены результаты опробования устройства КЭМП, схема которого представлена в табл. 1.1 (номер 1.5) [28]. КЭМП осуществляли