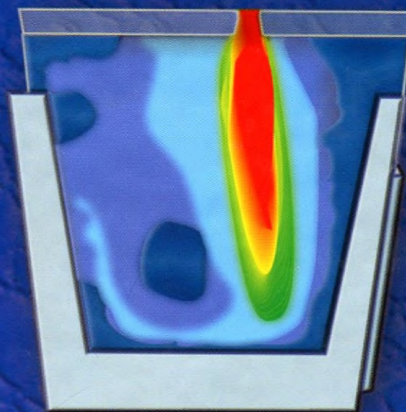


621.74  
Г46



В.И. ДУБОДЕЛОВ, А.Н. СМИРНОВ,  
В.Г. ЕФИМОВА, А.В. КРАВЧЕНКО,  
А.П. ВЕРЗИЛОВ

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ  
ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО  
ЛИТЬЯ СТАЛИ**



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В. И. ДУБОДЕЛОВ, А. Н. СМИРНОВ,  
В. Г. ЕФИМОВА, А. В. КРАВЧЕНКО, А. П. ВЕРЗИЛОВ

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ  
КОВШАХ  
ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО  
ЛИТЬЯ СТАЛИ**

---

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

---

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 2018

УДК 621.746.047: 669.054.2

В монографии рассмотрена современная концепция повышения эффективности работы машин для непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и улучшения качества металлопродукции при оптимизации функциональных и технологических параметров эксплуатации промежуточного ковша. Изложены особенности работы промежуточных ковшей современных МНЛЗ, их классификация, а также показаны их функциональные возможности по повышению качества заготовки и увеличению серийности разлива. Предложены новые подходы к оптимизации физико-химических условий рафинирования стали и удаления неметаллических включений непосредственно в промежуточном ковше. Приведены оригинальные решения по продувке стали в промежуточном ковше инертным газом и выполнены оценки эффективности продувки в промышленных условиях.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических и машиностроительных предприятий, а также для преподавателей, аспирантов и студентов металлургических факультетов вузов.

У монографії розглянуто сучасну концепцію підвищення ефективності роботи машин для неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) і поліпшення якості металлопродукції при оптимізації функціональних і технологічних параметрів експлуатації проміжного ковша. Викладено особливості роботи проміжних ковшів сучасних МНЛЗ, їх класифікацію, а також показано їхні функціональні можливості з підвищення якості заготовки та збільшення серійності розливу. Запропоновано нові підходи до оптимізації фізико-хімічних умов рафінування сталі та вилучення неметалевих вкраплень безпосередньо в проміжному ковші. Наведено оригінальні рішення щодо продувки сталі в проміжному ковші инертним газом та виконано оцінки ефективності продувки за промислових умов.

Для наукових та інженерно-технічних працівників металургійних і машинобудівних підприємств, а також для викладачів, аспірантів і студентів металургійних факультетів вишів.

**Рецензенты:**

член-корреспондент НАН Украины *К. А. Гогаев*,  
доктор технических наук, профессор *В. А. Шаповалов*

*Утверждено к печати ученым советом  
Физико-технологического института металлов и сплавов  
НАН Украины (протокол № 5 от 19.05.2016 г.)*

***Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми  
«Створення та розвиток науково-видавничого комплексу НАН України»***

Научно-издательский отдел физико-математической  
и технической литературы  
Редактор *В. В. Вероцька*

© В. И. Дубоделов, А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов, 2018  
© НПП «Видавництво “Наукова думка” НАН України», дизайн, 2018

ISBN 978-966-00-1605-7

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |            |
|---|------------|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3          |
| <b>Г Л А В А 1. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ КАК<br/>ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ<br/>ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ РАЗЛИВКИ И КАЧЕСТВА<br/>НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО МЕТАЛЛА.....</b> | <b>7</b>   |
| 1.1. Общие сведения о процессах непрерывной разливки на<br>современных МНЛЗ .....   | 7          |
| 1.2. Конструкция, футеровка и основные технологические параметры<br>промежуточного ковша .....  | 12         |
| 1.3. Классификация промежуточных ковшей, применяемых на МНЛЗ .....  | 20         |
| 1.4. Процессы наполнения промежуточного ковша и падения уровня<br>металла в нем при замене сталеразливочного ковша.....   | 26         |
| 1.5. Процессы истечения металла из промежуточного ковша в<br>кристаллизатор и огнеупоры для дозирования .....   | 31         |
| 1.6. Зарастание погружных стаканов .....  | 38         |
| 1.7. Теплоизолирующие смеси и их роль в процессе разливки.....  | 50         |
| <b>Г Л А В А 2. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ<br/>ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ .....</b>   | <b>58</b>  |
| 2.1. Физические модели для исследования процессов перемешивания<br>металла в промежуточном ковше.....   | 58         |
| 2.2. Моделирование процессов перемешивания металла в<br>промежуточных ковшах многоручьевых сортовых МНЛЗ .....  | 65         |
| 2.3. Моделирование процессов перемешивания и перемещения<br>неметаллических включений в промежуточном ковше слябовой<br>МНЛЗ .....                                      | 77         |
| 2.4. Моделирование процессов размывания металлоприемников при<br>разливке сверхдлинными сериями.....  | 86         |
| 2.5. Моделирование процессов продувки металла в промежуточном<br>ковше аргоном.....   | 95         |
| <b>Г Л А В А 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ<br/>ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ .....</b>  | <b>102</b> |
| 3.1. Основные аспекты математического моделирования мультифазных<br>систем в промежуточных ковшах МНЛЗ .....  | 103        |
| 3.2. Общие принципы математического моделирования<br>гидродинамических процессов в промежуточном ковше .....  | 110        |

## Оглавление

|  |            |
|--|------------|
| 3.3. Основные принципы построения математической модели для описания гидродинамических процессов в промежуточном ковше .....   | 113        |
| 3.4. Математическое моделирование перемешивания металла и шлака в шестиручьевом промежуточном ковше сортовой МНЛЗ.....   | 120        |
| 3.5. Математическое моделирование перемешивания металла и шлака в семиручьевом промежуточном ковше сортовой МНЛЗ.....  | 125        |
| 3.6. Исследование процессов движения расплава в промежуточном ковше одноручьевой слябовой МНЛЗ .....   | 127        |
| 3.7. Особенности движения расплава в промежуточном ковше двухручьевой слябовой МНЛЗ при использовании металлоприемника типа «турбостоп».....   | 131        |
| 3.8. Основные возможности математического моделирования процессов перемешивания металла в жидкой ванне промежуточного ковша .....  | 134        |
| <b>Г Л А В А 4. ВСПЛЫТИЕ И УДАЛЕНИЕ<br/>НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ИЗ ЖИДКОЙ СТАЛИ<br/>В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ .....</b>  | <b>136</b> |
| 4.1. Неметаллические включения при непрерывной разливке стали .....  | 136        |
| 4.2. Термодинамический анализ формирования и всплытия включений в дисперсных системах.....   | 147        |
| 4.3. Процессы удаления неметаллической фазы из расплава стали (влияние образования пленок на термодинамику продуктов раскисления) .....  | 161        |
| 4.4. Ассимиляция включений шлаковым покровом: вход включений в межфазную границу металл- шлак, переход включения через межфазную границу металл-шлак и растворение в шлаковой фазе ..... | 169        |
| <b>Г Л А В А 5. РАФИНИРОВАНИЕ СТАЛИ<br/>В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ.....</b>   | <b>175</b> |
| 5.1. Исследование механизма удаления неметаллических включений при продувке инертным газом .....   | 175        |
| 5.2. Формирование, движение и массообмен капель металла в шлаковой фазе.....   | 187        |
| 5.3. Промышленные исследования эффективности продувки стали аргоном в промежуточном ковше .....  | 196        |
| <b>Г Л А В А 6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ<br/>ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ<br/>ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ МНЛЗ .....</b>  | <b>215</b> |
| 6.1. Плазменный подогрев стали в промежуточном ковше .....   | 215        |
| 6.2. Индукционный подогрев стали в промежуточном ковше .....   | 220        |
| 6.3. Концепция multifunctionального промежуточного ковша применительно к современным условиям разливки стали на МНЛЗ .....   | 226        |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 228        |