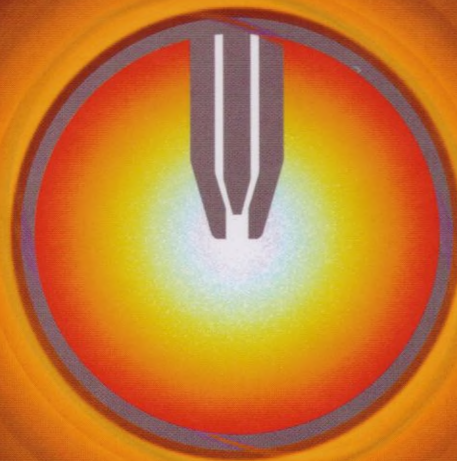




Б. Е. ПАТОН, Г. М. ГРИГОРЕНКО, И. В. ШЕЙКО,  
В. А. ШАПОВАЛОВ, В. Л. НАЙДЕК, В. Н. КОСТЯКОВ

# ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ И ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА  
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Б.Е. ПАТОН, Г.М. ГРИГОРЕНКО,  
И.В. ШЕЙКО, В.А. ШАПОВАЛОВ,  
В.Л. НАЙДЕК, В.Н. КОСТЯКОВ

# **ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ И ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 2013

УДК 621.745.5

В монографии приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях. Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также для преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.

У монографії наведено наукові та прикладні аспекта застосування плазмових джерел нагрівання (плазмотронів) у металургійному і ливарному виробництві. Розглянуто основні типи плазмотронів, які використовуються для плавлення металів і обробки металічних розплавів у лабораторних і промислових умовах. Показано промислове застосування плазмових джерел нагрівання, на базі яких розроблено нові металургійні процеси та технології. Описано конструкції плавильних печей на керамічному поду та переплавних печей з формуванням зливка в охолоджувальному кристалізаторі, установок для рафінованої переплавки поверхневого шару зливка, вирощування монокристалів тугоплавких металів та ін. Наведено результати порівняння якості металів і сплавів, виплавлених із застосуванням різних технологій.

Для наукових та інженерно-технічних працівників металургійних підприємств та ливарного виробництва, а також для викладачів, аспірантів і студентів вищої школи відповідних спеціальностей.

Рецензенты:

академик НАН Украины *В.И.Дубоделов*  
доктор технических наук *С.В.Ахонин*

*Видання здійснено за державним замовленням  
на випуск видавничої продукції*

Научно-издательский отдел физико-математической  
и технической литературы

Редактор *В. В. Вероцкая*

© Б.Е. Патон, Г.М. Григоренко,  
И.В. Шейко, В.А. Шаповалов,  
В.Л. Найдек, В.Н. Костяков, 2013  
© НВП «Видавництво “Наукова думка”  
НАН України», дизайн, 2013

ISBN 978-966-00-1301-8

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Г Л А В А 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ, ЕЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ .....	8
1.1. Элементарные процессы в электрических дугах и плазме .....	8
1.2. Методы получения низкотемпературной плазмы .....	11
1.3. Температура плазменного факела .....	14
1.4. Основные характеристики низкотемпературной плазмы .....	16
1.5. Общие условия устойчивости горения дуговой плазмы и методы регулирования электрической дуги постоянного тока.....	23
1.6. Плазмообразующие и технологические газы .....	28
Г Л А В А 2. ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ (ПЛАЗМОТРОНЫ).....	35
2.1. Классификационные признаки и классификация плазмотронов .....	35
2.2. Дуговые плазмотроны .....	36
2.2.1. Струйные дуговые плазмотроны .....	39
2.2.2. Дуговые плазмотроны прямого действия .....	47
2.2.3. Особенности конструкции дуговых металлургических плазмотронов .....	56
2.2.4. Плазмотроны постоянного тока .....	66
2.2.5. Плазмотроны переменного тока.....	72
2.2.6. Плазмотроны с плазменным электродом .....	84
2.2.7. Плазменный нагревательный комплекс переменного тока .....	90
2.2.8. Погружные плазмотроны .....	91
2.2.9. Плазменно-дуговой нагреватель с полым графитовым электродом .....	94
2.2.10. Вакуумные плазмотроны .....	98
2.2.11. Охлаждаемые нерасходуемые электроды с магнитной стабилизацией дуги.....	102
2.2.12. Переплавные (расходуемые) плазмотроны .....	107
2.3. Индукционные плазмотроны .....	ПО
2.4. Топливо-плазменные горелки .....	114
Г Л А В А 3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА С ГАЗАМИ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА .....	117
3.1. Общие закономерности гетерогенных реакций в системе жидкий металл—газ.....	117
3.2. Передача тепла металлической ванне в условиях плазменного нагрева .....	122
3.3. Основные закономерности газообменных процессов в условиях плазменной плав- ки металлов .....	126

## Оглавление

3.4. Кинетические закономерности поглощения азота и водорода при плазменной плавке .....	131
3.5. Влияние легирующих элементов на характер поглощения газов из плазмы .....	135
3.6. Особенности поглощения азота высокорекреакционными металлами.....	142
<b>Г Л А В А 4 ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА В МЕТАЛЛУРГИИ .....</b>	<b>147</b>
4.1. Рудовосстановительные процессы .....	149
4.2. Выплавка металлов и сплавов в плазменно-дуговых печах с огнеупорной футеровкой .....	164
4.3. Плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов в охлаждаемых тиглях и кристаллизаторах .....	183
4.3.1. Плазменно-дуговая гарнисажная плавка .....	183
4.3.2. Плазменно-дуговой переплав с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе.....	194
4.4. Специальные виды плазменно-дуговой плавки и обработки металлических расплавов и слитков.....	200
4.4.1. Применение плазменных источников нагрева для обработки стали в агрегатах типа ковш-печь .....	200
4.4.2. Применение низкотемпературной плазмы для переплава поверхностного слоя слитков .....	209
4.4.3. Выращивание монокристаллов тугоплавких металлов .....	221
4.4.4. Производство металлических гранулированных порошков .....	229
4.4.5. Получение металлических лент с аморфной и мелкозернистой структурой .....	234
<b>Г Л А В А 5. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ С ОХЛАЖДАЕМЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ.....</b>	<b>241</b>
5.1. Элементы конструкций, механизмы и системы печей ПДП .....	241
5.2. Печи для процессов рафинирования и азотирования металлов и сплавов .....	253
5.3. Печи для переплава отходов титана .....	262
5.3.1. Плазменно-дуговая печь У-599 для переплава листовых отходов титана .....	262
5.3.2. Плазменно-дуговая печь УП-100 для переплава низкосортной титановой губки .....	270
<b>Г Л А В А 6 ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕПЛАВА В ОХЛАЖДАЕМОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ .....</b>	<b>292</b>
6.1. Легирование стали и сплавов азотом из газовой фазы в плазменно-дуговых печах .....	294
6.2. Плазменно-водородное раскисление металлов и сплавов.....	302
6.3. Процессы рафинирования при плазменно-дуговом переплаве .....	309
6.3.1. Рафинирующий переплав в атмосфере инертного газа .....	310
6.3.2. Рафинирование от неметаллических включений .....	315
6.3.3. Рафинирование металла шлаком (плазменно-шлаковая десульфурация) .....	321
6.3.4. Обезуглероживание металла кислородом .....	326
6.3.5. Рафинирование за счет испарения примесей.....	329
<b>Г Л А В А 7 ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ .....</b>	<b>335</b>
7.1. Явление электромагнитной индукции и ее основные закономерности .....	335
7.2. Выделение тепла и особенности нагрева проводящих тел в электромагнитном поле .....	341
7.3. Классификация методов индукционной плавки металлов и плавильных агрегатов .....	347

## Оглавление

7.4. Методы интенсификации плавки в индукционных тигельных печах .....	352
7.5. Плазменно-индукционные печи .....	357
7.6. Плазменные приставки переменного тока.....	366
7.7. Тепловая работа плазменно-индукционных печей .....	376
7.8. Металлургические процессы в плазменно-индукционных печах .....	381
Г Л А В А 8. КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА, ВЫПЛАВЛЕННОГО В ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ПЕЧАХ .....	407
8.1. Качество металла, выплавленного в плазменно-дуговых печах с водоохлаждае- мым кристаллизатором .....	407
8.2. Качество металла, выплавленного в плазменно-индукционных печах .....	436
8.3. Качество металла, выплавленного в гарнисажных печах с плазменным нагревом	453
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	459
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	461