

P Ca Sr Si Mg  
C Ba Ti  
S O Ce La  
Fe Zr

И.В. Рябчиков  
В.Г. Мизин  
В.В. Андреев

**КРЕМНИСТЫЕ  
ФЕРРОСПЛАВЫ И МОДИФИКАТОРЫ  
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.  
ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ**

Si Mg  
C Zr Ti  
Fe

**И. В. Рябчиков, В. Г. Мизин, В. В. Андреев**

**КРЕМНИСТЫЕ ФЕРРОСПЛАВЫ  
И МОДИФИКАТОРЫ  
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.  
ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ**

Челябинск  
Издательство Челябинского государственного университета  
2013

ББК К326

Р985

Рецензенты:

*А. И. Троцан*, доктор технических наук, профессор, заведующий  
отделом Института проблем материаловедения Национальной  
академии наук Украины;

*В. Е. Роцин*, доктор технических наук,  
профессор кафедры металлургии  
и литейного производства ЮУрГУ

**Рябчиков, И.В.**

**Р985** Кремнистые ферросплавы и модификаторы нового  
поколения. Производство и применение / И. В. Рябчиков,  
В. Г. Мизин, В. В. Андреев. Челябинск : Изд-во Челяб. гос.  
ун-та, 2013. 295 с.

ISBN 978-5-7271-1188-8

В книге изложены результаты многолетних исследований авторов в области физико-химических и технологических процессов получения и применения кремния, ферросилиция, комплексных ферросплавов и модификаторов для обработки железоуглеродистых сплавов. Приведены данные о методах управления химизмом процесса при совместном восстановлении кремния, титана, циркония, щелочноземельных и редкоземельных элементов из природных соединений углеродом. Сформулированы принципы создания непрерывных и безотходных технологий производства кремнистых ферросплавов, позволяющих повысить их качество, снизить технологические энергозатраты и стоимость продукции. Рассмотрены современные технологии выплавки и разливки кремния, ферросилиция и модификаторов для получения из них высококачественной продукции нового поколения. Описаны физико-химические процессы наномодифицирования и способы получения объемных псевдонаноизделий с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников металлургического и литейного производства. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам профильных вузов.

ББК К326

ISBN 978-5-7271-1188-8

© Рябчиков И. В., Мизин В. Г.,  
Андреев В. В., 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	6
<b>Глава 1. Производство кремния и ферросилиция. . . . .</b>	<b>10</b>
1.1. Физико-химические основы процесса . . . . .	10
1.1.1. Газификация диоксида кремния . . . . .	11
1.1.2. Термодинамический анализ систем Si-O-C и Si-O-C-Fe . . .	16
1.1.3. Экспериментальное исследование взаимодействия компонентов в системах Si-O-C и Si-O-C-Fe . . . . .	28
1.1.3.1. Условия образования карбида кремния и кремния. . . . .	30
1.1.3.2. Кинетика взаимодействия диоксида кремния с углеродом, карбидом кремния и кремнием . . . . .	35
1.1.3.3. Условия разрушения карбида кремния в системах SiC-Fe и SiC-Fe-SiO <sub>2</sub> . . . . .	44
1.2. Пути и методы интенсификации выплавки кремния и ферросилиция . . . . .	49
1.2.1. Особенности технологии выплавки ферросилиция . . . . .	49
1.2.2. Опытные плавки кремния и ферросилиция на обычной и окускованной шихте . . . . .	54
<b>Глава 2. Производство ферросплавов с титаном и цирконием . . . . .</b>	<b>63</b>
2.1. Сырьевая база титана и циркония. . . . .	63
2.2. Способы получения ферросплавов с титаном и цирконием . . . . .	69
2.2.1. Металлотермические способы. . . . .	69
2.2.2. Углелермические способы. . . . .	70
2.2.2.1. Термодинамический анализ восстановления титана в системах Ti-O-C и Ti-O-C-Si. . . . .	70
2.2.2.2. Термодинамический анализ восстановления циркония в системах Zr-O-C и Zr-O-C-Si . . . . .	75
2.2.2.3. Технология выплавки ферросилицидоциркония . . . . .	77
<b>Глава 3. Производство ферросплавов с редкоземельными   элементами . . . . .</b>	<b>80</b>
3.1. Сырьевая база редкоземельных элементов . . . . .	80
3.2. Физические и физико-химические свойства редкоземельных элементов . . . . .	83

3.3. Термодинамические свойства сплавов редкоземельных элементов . . . . .	87
3.4. Способы получения ферросплавов с редкоземельными элементами. . . . .	90
3.4.1. Аллюминотермический способ. . . . .	90
3.4.2. Углетермический способ . . . . .	91
3.4.2.1. Физико-химические основы процесса. . . . .	92
3.4.2.2. Технология плавки . . . . .	99
<b>Глава 4. Производство модификаторов с магнием и кальцием . . . . .</b>	<b>113</b>
4.1. Сырьевая база магния и кальция . . . . .	113
4.2. Способы получения сплавов с магнием и кальцием . . . . .	114
4.2.1. Сплавление компонентов . . . . .	114
4.2.2. Растворение магния в жидком ферросилиции . . . . .	117
4.2.3. Металлотермические способы. . . . .	119
4.2.3.1. Физико-химические основы процесса. . . . .	119
4.2.3.2. Технология плавки. . . . .	123
4.2.4. Углетермический способ . . . . .	142
4.2.4.1. Совместное восстановление кальция и кремния из обычной шихты . . . . .	143
4.2.4.2. Совместное восстановление кальция и кремния из брикетов. . . . .	147
<b>Глава 5. Производство модификаторов с барием и стронцием . . . . .</b>	<b>150</b>
5.1. Руды и концентраты бария и стронция . . . . .	150
5.2. Способы получения сплавов с барием и стронцием. . . . .	154
5.2.1. Металлотермические способы. . . . .	155
5.2.2. Углетермический способ . . . . .	156
5.2.2.1. Физико-химические основы процесса . . . . .	156
5.2.2.2. Технология плавки . . . . .	176
5.2.2.3. Особенности восстановления бария и стронция из сульфатного сырья. . . . .	188
5.2.2.4. Санитарно-гигиенические условия . . . . .	193
<b>Глава 6. Разливка кремния и кремнистых ферросплавов . . . . .</b>	<b>198</b>
6.1. Современные способы разливки кремния и ферросилиция . . . . .	199
6.2. Разливка модификаторов . . . . .	203
6.2.1. Физико-химические основы процесса . . . . .	203
6.2.2. Выбор материала для кристаллизатора . . . . .	210
6.2.3. Технология непрерывной разливки сплавов . . . . .	212
<b>Глава 7. Модификаторы и технологии внепечной         обработки стали . . . . .</b>	<b>216</b>
7.1. Физико-химические основы раскисления и модифицирования комплексными сплавами . . . . .	217
7.1.1. Раскисление стали. . . . .	217
7.1.2. Модифицирование стали . . . . .	226
7.2. Комплексные раскислители и модификаторы . . . . .	228

7.3. Модифицирование низколегированной стали . . . . .	230
7.4. Модифицирование коррозионностойкой стали . . . . .	235
7.5. Наномодифицирование стали барием . . . . .	237
<b>Глава 8. Модификаторы и технологии внепечной обработки чугуна . . . . .</b>	<b>243</b>
8.1. Свойства и области применения высокопрочного чугуна . .	243
8.2. Физико-химические основы формирования включений графита в чугуне. . . . .	246
8.3. Получение высокопрочного чугуна с шаровидным графитом . . . . .	252
8.4. Получение высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом . . . . .	263
8.5. Графитизирующие модификаторы и технологии повышения качества чугуна с пластинчатым графитом . . . . .	267
<b>Заключение. . . . .</b>	<b>275</b>
<b>Библиографический список . . . . .</b>	<b>278</b>