



**В. Я. ДАШЕВСКИЙ**

# **ФЕРРОСПЛАВЫ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ**

- ◆ Металлургия сплавов кремния, марганца, хрома, вольфрама, молибдена, ванадия, титана, щелочноземельных и редкоземельных металлов, ниобия, циркония, алюминия, бора, никеля, кобальта, фосфора, селена и теллура
- ◆ Металлургия железоуглеродистых сплавов, электрокорунда и флюсов
- ◆ Ферросплавные печи
- ◆ Самообжигающихся электроды

В. Я. Дашевский

**ФЕРРОСПЛАВЫ:  
ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ**

Москва      Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.168  
ББК 34.326  
Д21

*Посвящается памяти отца автора, Дашевского Якова Вениаминовича –  
одного из создателей отечественной промышленности ферросплавов*

**Дашевский, В. Я.**

**Д21** Ферросплавы: теория и технология / В. Я. Дашевский. – Москва ; Вологда :  
Инфра-Инженерия, 2021. – 288 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0566-9

Изложены физико-химические основы высокотемпературных процессов получения ферросплавов кремнистой, марганцевой и хромистых групп, сплавов молибдена, ванадия, титана, щелочноземельных и редкоземельных металлов, ниобия, циркония, алюминия, бора, никеля, кобальта, фосфора, селена и теллура, железоуглеродистых сплавов. Рассмотрены технологии промышленного производства этих групп ферросплавов, характеристики шихтовых материалов, технологические параметры процессов выплавки. Описаны технологии выплавки электрокорунда и электроплавленных флюсов. Приведено описание ферросплавных печей. Рассмотрены конструкция и технология изготовления самообжигающихся электродов.

Для специалистов в области металлургии, аспирантов и преподавателей. Может быть полезно студентам старших курсов направления подготовки «Металлургия».

УДК 669.168  
ББК 34.326

ISBN 978-5-9729-0566-9

© Дашевский В. Я., 2021  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 8  |
| ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФЕРРОСПЛАВНЫХ ПРОЦЕССОВ .....  | 10 |
| 1.1. Ведущие элементы ферросплавов .....  | 10 |
| 1.2. Общие требования к качеству ферросплавов.....  | 12 |
| 1.3. Классификация ферросплавных процессов по виду применяемых<br>восстановителей.....                            | 12 |
| 1.4. Классификация ферросплавных процессов по виду используемого агрегата.....                                    | 14 |
| 1.5. Классификация ферросплавных процессов по технологическим признакам.....                                      | 15 |
| ГЛАВА 2. КРЕМНИЙ И КАРБИД КРЕМНИЯ.....  | 17 |
| 2.1. Свойства кремния, углерода и их соединений.....  | 17 |
| 2.2. Теоретические основы восстановления кремния углеродом .....  | 21 |
| 2.3. Сортамент кристаллического кремния и качество шихтовых материалов .....                                      | 22 |
| 2.4. Технология выплавки кристаллического кремния .....   | 24 |
| 2.5. Технология производства карбида кремния .....  | 27 |
| ГЛАВА 3. ФЕРРОСИЛИЦИЙ .....   | 30 |
| 3.1. Свойства соединений кремния .....  | 30 |
| 3.2. Теоретические основы восстановления кремния углеродом при получении<br>ферросилиция.....                     | 32 |
| 3.3. Электрические характеристики и геометрические параметры ванны<br>электропечей для выплавки ферросилиция..... | 32 |
| 3.4. Технология выплавки и разлива ферросилиция .....   | 33 |
| ГЛАВА 4. СПЛАВЫ МАРГАНЦА .....  | 41 |
| 4.1. Свойства марганца и его соединений .....   | 42 |
| 4.2. Минералы, руды и концентраты марганца.....   | 48 |
| 4.3. Дефосфорация марганцевых концентратов и марганецсодержащих продуктов.....                                    | 49 |
| 4.4. Технология сушки и окускования марганцевых концентратов .....  | 51 |
| 4.5. Технология выплавки высокоуглеродистого ферромарганца.....   | 53 |
| 4.6. Технология выплавки ферросиликомарганца .....  | 58 |
| 4.7. Технология выплавки металлического марганца, низко- и среднеуглеродистого<br>ферромарганца .....             | 60 |
| 4.8. Технология получения азотированного марганца и силикомарганца .....  | 66 |
| ГЛАВА 5. СПЛАВЫ ХРОМА .....   | 69 |
| 5.1. Свойства хрома и его соединений.....   | 69 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2. Минералы и руды хрома .....  | 75         |
| 5.3. Технология выплавки высокоуглеродистого феррохрома .....   | 76         |
| 5.4. Технология выплавки ферросиликохрома .....   | 79         |
| 5.5. Технология выплавки низкоуглеродистого феррохрома.....   | 81         |
| 5.6. Вакуумные процессы обезуглероживания и дегазации феррохрома .....                                    | 85         |
| 5.7. Кислородно-конвертерный и силикотермический способы выплавки<br>среднеуглеродистого феррохрома ..... | 86         |
| 5.8. Аллюминотермический способ получения хрома и феррохрома .....  | 88         |
| 5.9. Технология получения азотированного феррохрома .....   | 92         |
| <b>ГЛАВА 6. ФЕРРОВОЛЬФРАМ.....</b>  | <b>94</b>  |
| 6.1. Свойства вольфрама и его соединений.....   | 94         |
| 6.2. Минералы, руды и концентраты вольфрама .....   | 97         |
| 6.3. Технология получения ферровольфрама углеродосиликотермическим<br>способом .....                      | 98         |
| 6.4. Технология получения ферровольфрама аллюминотермическим способом.....                                | 101        |
| <b>ГЛАВА 7. ФЕРРОМОЛИБДЕН.....</b>  | <b>102</b> |
| 7.1. Свойства молибдена и его соединений.....   | 102        |
| 7.2. Минералы, руды и концентраты молибдена .....   | 106        |
| 7.3. Окислительный обжиг молибденитового концентрата.....   | 107        |
| 7.4. Технология получения ферромolibдена внепечным<br>силикоаллюмотермическим способом.....               | 108        |
| <b>ГЛАВА 8. ФЕРРОВАНАДИЙ .....</b>  | <b>112</b> |
| 8.1. Свойства ванадия и его соединений .....  | 113        |
| 8.2. Минералы, руды и концентраты ванадия .....   | 116        |
| 8.3. Технология металлургического передела ванадийсодержащих концентратов .....                           | 117        |
| 8.4. Технология химического передела ванадийсодержащих шлаков .....                                       | 119        |
| 8.5. Термодинамика реакций восстановления ванадия из оксидов .....  | 120        |
| 8.6. Технология получения феррованадия силикоаллюминотермическим способом .....                           | 122        |
| 8.7. Технология получения феррованадия аллюминотермическим способом .....                                 | 123        |
| 8.8. Технология получения ферросиликованадия.....   | 125        |
| 8.9. Технология получения азотированного феррованадия.....  | 125        |
| <b>ГЛАВА 9. ФЕРРОТИТАН.....</b>   | <b>126</b> |
| 9.1. Свойства титана и его соединений.....  | 126        |
| 9.2. Минералы, руды и концентраты титана .....  | 131        |
| 9.3. Термодинамика реакций восстановления титана .....  | 132        |
| 9.4. Окислительный обжиг титановых концентратов .....   | 133        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.5. Технология диспергирования алюминия.....                                       | 134        |
| 9.6. Технология получения ферротитана алюминотермическим способом.....              | 134        |
| 9.7. Технология получения металлического титана магниетермическим способом .....    | 138        |
| <b>ГЛАВА 10. ФЕРРОСПЛАВЫ СО ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ.....</b>                    | <b>142</b> |
| 10.1. Карбид кальция и силикокальций .....  | 142        |
| 10.1.1. Свойства кальция и его соединений.....                                      | 142        |
| 10.1.2. Технология выплавки карбида кальция .....                                   | 146        |
| 10.1.3. Технология выплавки силикокальция.....                                      | 149        |
| 10.2. Ферросиликобарий и алюминобарий.....  | 152        |
| 10.2.1. Свойства бария и его соединений .....                                       | 154        |
| 10.2.2. Технология выплавки ферросиликобария .....                                  | 159        |
| 10.2.3. Технология выплавки алюминобария .....                                      | 159        |
| 10.3. Ферросиликостронций.....  | 160        |
| 10.3.1. Свойства стронция и его соединений .....                                    | 160        |
| 10.3.2. Минералы и руды стронция .....  | 163        |
| 10.3.3. Технология выплавки ферросиликостронция .....                               | 164        |
| 10.4. Ферросиликомагний .....   | 164        |
| 10.4.1. Свойства магния и его соединений .....                                      | 164        |
| 10.4.2. Минералы и руды магния.....   | 167        |
| 10.4.3. Технология получения магния и магниевых ферросплавов .....                  | 167        |
| 10.5. Бериллий.....   | 168        |
| 10.5.1. Свойства бериллия и его соединений .....                                    | 168        |
| 10.5.2. Минералы и руды бериллия .....  | 169        |
| 10.5.3. Технология получения бериллия.....  | 169        |
| <b>ГЛАВА 11. ФЕРРОНИОБИЙ .....</b>  | <b>171</b> |
| 11.1. Свойства ниобия и его соединений.....   | 171        |
| 11.2. Минералы и руды ниобия .....  | 176        |
| 11.3. Термодинамика реакций восстановления ниобия .....                             | 176        |
| 11.4. Технология получения феррониобия алюминотермическим способом.....             | 177        |
| <b>ГЛАВА 12. ФЕРРОСИЛИКОЦИРКОНИЙ И ФЕРРОАЛЮМИНОЦИРКОНИЙ .....</b>                   | <b>180</b> |
| 12.1. Свойства циркония и его соединений.....                                       | 180        |
| 12.2. Минералы, руды и концентраты циркония .....                                   | 184        |
| 12.3. Термодинамика реакций восстановления циркония .....                           | 184        |
| 12.4. Технология получения ферросиликоциркония алюминотермическим<br>способом.....  | 185        |
| 12.5. Технология получения ферроалюминоциркония алюминотермическим<br>способом..... | 187        |

|   |         |
|---|---------|
| ГЛАВА 13. ФЕРРОАЛЮМИНИЙ И СИЛИКОАЛЮМИНИЙ .....                            | 189     |
| 13.1. Свойства алюминия и его соединений .....                            | 189     |
| 13.2. Минералы и руды алюминия .....                                      | 193     |
| 13.3. Технология производства ферроалюминия .....                         | 193     |
| 13.4. Технология производства силикоалюминия .....                        | 194     |
| <br>ГЛАВА 14. ФЕРРОБОР И КАРБИД БОРА .....                                | <br>198 |
| 14.1. Свойства бора и его соединений .....                                | 198     |
| 14.2. Минералы и руды бора .....  | 200     |
| 14.3. Термодинамика реакций восстановления бора .....                     | 201     |
| 14.4. Технология получения ферробора .....                                | 202     |
| 14.5. Технология получения карбида бора .....                             | 204     |
| <br>ГЛАВА 15. ФЕРРОСПЛАВЫ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ .....               | <br>207 |
| 15.1. Свойства редкоземельных металлов и их соединений .....              | 207     |
| 15.2. Минералы, руды и концентраты редкоземельных металлов .....          | 212     |
| 15.3. Технология получения ферросплавов с редкоземельными металлами ..... | 212     |
| <br>ГЛАВА 16. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ .....                             | <br>215 |
| 16.1. Свойства железа и его соединений .....                              | 215     |
| 16.2. Восстановление железа углеродом и газами .....                      | 217     |
| 16.3. Электротермия чугуна .....  | 219     |
| <br>ГЛАВА 17. ФЕРРОНИКЕЛЬ .....   | <br>222 |
| 17.1. Свойства никеля и его соединений .....                              | 222     |
| 17.2. Минералы и руды никеля .....  | 226     |
| 17.3. Технология получения и рафинирования ферроникеля .....              | 227     |
| <br>ГЛАВА 18. КОБАЛЬТ .....   | <br>231 |
| 18.1. Свойства кобальта и его соединений .....                            | 231     |
| 18.2. Минералы и руды кобальта .....                                      | 234     |
| 18.3. Технология получения кобальта .....                                 | 235     |
| <br>ГЛАВА 19. ФЕРРОФОСФОР .....   | <br>238 |
| 19.1. Свойства фосфора и его соединений .....                             | 238     |
| 19.2. Минералы и руды фосфора .....                                       | 240     |
| 19.3. Термодинамика реакций восстановления фосфора .....                  | 241     |
| 19.4. Подготовка фосфоритов к электроплавке .....                         | 242     |
| 19.5. Электропечи для восстановления фосфора .....                        | 243     |
| 19.6. Электротермия фосфора .....   | 243     |

|   |     |
|---|-----|
| ГЛАВА 20. ФЕРРОСЕЛЕН И ФЕРРОТЕЛЛУР.....                         | 245 |
| 20.1. Свойства селена, теллура и их соединений.....             | 245 |
| 20.2. Селен- и теллурсодержащие руды .....                      | 247 |
| 20.3. Легирование стали селеном и теллуrom .....                | 248 |
| <br>  |     |
| ГЛАВА 21. ЭЛЕКТРОКОРУНД.....                                    | 250 |
| 21.1. Свойства корунда.....                                     | 250 |
| 21.2. Технология электрокорунда .....                           | 250 |
| 21.3. Технология нормального электрокорунда .....               | 251 |
| <br>  |     |
| ГЛАВА 22. ЭЛЕКТРОПЛАВЛЕННЫЕ ФЛЮСЫ.....                          | 256 |
| 22.1. Требования к флюсам и способы их получения .....          | 256 |
| 22.2. Электроплавка флюсов.....                                 | 257 |
| 22.3. Поведение примесей при электроплавке флюсов.....          | 258 |
| <br>  |     |
| ГЛАВА 23. ФЕРРОСПЛАВНЫЕ ПЕЧИ.....                               | 261 |
| 23.1. Рудно-термические электрические печи .....                | 263 |
| 23.1.1. Ванна рудно-термической печи .....                      | 266 |
| 23.1.2. Механизм вращения ванны рудно-термической печи.....     | 267 |
| 23.1.3. Свод рудно-термической печи.....                        | 268 |
| 23.1.4. Обеспечение печей шихтой.....                           | 269 |
| 23.2. Рафинировочные электрические печи .....                   | 273 |
| <br>  |     |
| ГЛАВА 24. САМООБЖИГАЮЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ .....                      | 277 |
| 24.1. Конструкция самообжигающихся электродов .....             | 277 |
| 24.2. Электродная масса .....                                   | 279 |
| 24.3. Технология производства электродной массы.....            | 282 |
| 24.4. Процессы, происходящие при обжиге электродной массы ..... | 283 |
| <br>  |     |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                  | 286 |