

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

## فناوری تولید فوآلیاژها

www.ketab.ir

تدوین و گردآوری:

دکتر رضا تقی آبادی

دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

|                     |                                                                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | تقی آبادی، رضا، ۱۳۵۴ -                                                                                                              |
| عنوان و نام پدیدآور | فناوری تولید فروآلیاژها/ تدوین و گردآوری رضا تقی آبادی.                                                                             |
| مشخصات نشر          | قزوین: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، ۱۴۰۰.                                                                                    |
| مشخصات ظاهری        | ۳۵۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.                                                                                                         |
| شابک                | ۹۷۸-۶۲۲-۶۸۹۸-۹۹-۷                                                                                                                   |
| وضعیت فهرست نویسی   | فبا                                                                                                                                 |
| یادداشت             | کتابنامه: ص ۳۳۳-۳۳۵.                                                                                                                |
| موضوع               | آلیاژهای آهن<br>Iron alloys<br>آلیاژهای آهن -- ذوب و استخراج<br>Iron alloys -- Metallurgy<br>سنگ معدن -- آماده سازی<br>Ore-dressing |
| شناسه افزوده        | دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)                                                                                                  |
| شناسه افزوده        | Imam Khomeini International University                                                                                              |
| رده بندی کنگره      | TA۴۷۹                                                                                                                               |
| رده بندی دیویی      | ۶۶۹/۳۰۳                                                                                                                             |
| شماره کتابشناسی ملی | ۸۷۸۷۵۰                                                                                                                              |
| اطلاعات رکورد       | فبا                                                                                                                                 |
| کتابشناسی           |                                                                                                                                     |

|                 |                                             |
|-----------------|---------------------------------------------|
| عنوان           | فناوری تولید فروآلیاژها                     |
| تدوین و گردآوری | رضا تقی آبادی                               |
| صفحه آرا        | منیره چادریاف زاده                          |
| ناظر فنی        | حمید کلهر                                   |
| شابک            | ۹۷۸-۶۲۲-۶۸۹۸-۹۹-۷                           |
| نوبت چاپ        | اول ۱۴۰۰                                    |
| قیمت            | ۹۰ هزار تومان                               |
| شمارگان         | ۵۰۰ جلد                                     |
| ناشر            | انتشارات دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) |

قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، تلفن ۰۲۸ - ۳۳۹۰۱۴۲۶

کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است.  
مسئولیت حقوقی و قانونی محتوای کتاب بر عهده صاحبان اثر است.

## فهرست

### فصل اول: مقدمه‌ای بر فرو آلیاژها

- ۱-۱- تعریف و کلیات فروآلیاژها..... ۱
- ۲-۱- پیش زمینه تولید و توسعه فروآلیاژها..... ۴
- ۳-۱- نقش فروآلیاژها در توسعه فولادها..... ۷
- ۴-۱- بررسی تولید جهانی فرو آلیاژها..... ۱۴

### فصل دوم: ترموشیمی فرآیندهای تولید فروآلیاژ

- ۱-۲- ترمودینامیک واکنش‌های تشکیل اکسید..... ۲۲
- ۲-۲- ترمودینامیک واکنش‌های تشکیل کاربید..... ۲۸
- ۳-۲- ترموسینتیک فرآیندهای تولید فروآلیاژ..... ۳۰
- ۴-۲- تأثیر دما بر سرعت واکنش..... ۳۱

### فصل سوم: مبانی نظری فرآوری فروآلیاژها

- ۱-۳- آشنایی با فروآلیاژها و فرآوری آن‌ها..... ۳۳
- ۲-۳- طبقه‌بندی فرآیندهای تولید فروآلیاژها بر اساس نوع احیاکننده..... ۳۶
- ۱-۲-۳- احیا توسط کربن (فرآیند کربوترمی)..... ۳۶
- ۲-۲-۳- احیا توسط سیلیسیم (فرآیند سیلیکوترمی)..... ۳۶
- ۳-۲-۳- احیا توسط آلومینیم (فرآیند آلومینوترمی)..... ۳۷
- ۳-۳- طبقه‌بندی فرآیندهای تولید فروآلیاژ با توجه به فناوری مورد استفاده..... ۳۸
- ۱-۳-۳- فرآیندهای مداوم و غیر مداوم..... ۳۸
- ۲-۳-۳- فرآیندهای سرباره و بدون سرباره..... ۳۸
- ۳-۳-۳- فرآیندهای با گدازآور و بدون گدازآور..... ۳۸
- ۴-۳- تجهیزات تولید فروآلیاژها..... ۴۱
- ۱-۴-۳- مقدمه‌ای بر فناوری تولید فروآلیاژها..... ۴۱
- ۲-۴-۳- طراحی و عملکرد کوره‌های تولید فروآلیاژ..... ۴۴
- ۱-۲-۴-۳- روش کلی..... ۴۶
- ۲-۲-۴-۳- روش وستلی..... ۴۷
- ۳-۲-۴-۳- روش گلاذکی و همکاران..... ۴۸

|     |                                                                          |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|
| ۵۱  | ۳-۴-۳- کوره‌های فرو کروم، فرو سیلیسیم، فرو منگنز و فرو سیلیکو منگنز..... |
| ۶۰  | ۳-۴-۴- کوره‌های سیلیسیم فلزی.....                                        |
| ۶۴  | ۳-۴-۵- کوره‌های فرو نیکل.....                                            |
| ۶۸  | ۳-۴-۶- کوره‌های جریان مستقیم.....                                        |
| ۷۱  | ۳-۴-۷- تأمین برق و عملکرد.....                                           |
| ۷۲  | ۳-۴-۷-۱- کوره‌های جریان متناوب.....                                      |
| ۷۳  | ۳-۴-۷-۲- کوره‌های جریان مستقیم.....                                      |
| ۷۴  | ۳-۴-۷-۳- الکترودها.....                                                  |
| ۸۵  | ۳-۴-۸- آستر کوره.....                                                    |
| ۸۷  | ۳-۴-۹- مراحل اصلی عملکرد کوره ذوب فروآلیاژ.....                          |
| ۸۸  | ۳-۴-۱۰- کنترل کوره.....                                                  |
| ۸۹  | ۳-۵-۵- تجهیزات فرآوری مواد شارژ کوره.....                                |
| ۹۰  | ۳-۵-۱- آگلومره کردن مواد شارژ.....                                       |
| ۹۱  | ۳-۵-۱-۱- بریکت‌سازی.....                                                 |
| ۹۲  | ۳-۵-۱-۲- تولید گندله‌های زینتر شده.....                                  |
| ۹۳  | ۳-۵-۲- زینتر کردن سنگ معدن منگنز.....                                    |
| ۹۵  | ۳-۵-۳- فرآیند پیش گرم.....                                               |
| ۹۶  | ۳-۵-۴- پیش احیا.....                                                     |
| ۹۷  | ۳-۶-۶- فرآوری پایین دست مواد اولیه.....                                  |
| ۹۷  | ۳-۶-۱- تصفیه.....                                                        |
| ۹۸  | ۳-۶-۲- ریخته‌گری.....                                                    |
| ۱۰۱ | ۳-۷-۷- سایر کوره‌های فرآوری فروآلیاژها.....                              |

#### فصل چهارم: طبقه‌بندی فرآیندهای تولید فروآلیاژ

|     |                                                                          |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|
| ۱۰۵ | ۴-۱- طبقه‌بندی فلزات-عناصر پیشرو فروآلیاژها.....                         |
| ۱۰۸ | ۴-۲- طبقه‌بندی فرآیندهای تولید فروآلیاژ بر اساس نوع عوامل احیاکننده..... |
| ۱۱۱ | ۴-۳- طبقه‌بندی فرآیندهای فروآلیاژ بر اساس روش تولید.....                 |
| ۱۱۲ | ۴-۴- طبقه‌بندی فرآیندهای فروآلیاژ بر اساس مشخصات فنی.....                |
| ۱۱۴ | ۴-۵- کوره‌های فروآلیاژ.....                                              |
| ۱۱۶ | ۴-۵-۱- کوره‌های الکتریکی ذوب سنگ معدن ذوب سنگ معدن.....                  |
| ۱۲۳ | ۴-۵-۲- مکانیزم چرخش حمام کوره ذوب سنگ معدن.....                          |
| ۱۲۴ | ۴-۵-۳- سقف کوره‌های ذوب سنگ معدن.....                                    |
| ۱۳۰ | ۴-۵-۴- کوره‌های الکتریکی تصفیه.....                                      |

## فصل پنجم: فناوری تولید فرو سیلیسیم

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| ۱۳۷ | ۱-۵- مواد خام و ترکیب فرو سیلیسیم    |
| ۱۳۷ | ۱-۵-۱- منابع سیلیس                   |
| ۱۴۲ | ۱-۵-۲- احیا کننده‌های پایه کربن      |
| ۱۴۵ | ۱-۵-۳- ترکیبات سیلیسیم و فرو سیلیسیم |
| ۱۴۷ | ۲-۵- فناوری ذوب فرو سیلیسیم          |
| ۱۴۷ | ۱-۲-۵- اصول اساسی عملیات             |
| ۱۴۹ | ۱-۲-۵- ویژگی‌های ذوب فروسیلیسیم      |
| ۱۵۲ | ۱-۲-۵-۲- عملیات ریخته‌گری و بهسازی   |

## فصل ششم: فناوری تولید فرو منگنز

|     |                                                                  |
|-----|------------------------------------------------------------------|
| ۱۵۷ | ۱-۶- فرآوری و احیای کانه‌های منگنز                               |
| ۱۵۷ | ۱-۶-۱- سنگ معدن منگنز                                            |
| ۱۶۲ | ۱-۶-۲- فرایندهای آگلومراسیون                                     |
| ۱۶۵ | ۲-۶- فروآلیاژهای منگنز                                           |
| ۱۶۵ | ۲-۶-۱- مشخصات فروآلیاژهای منگنز                                  |
| ۱۶۹ | ۲-۶-۲- ناخالصی‌ها در آلیاژهای منگنز                              |
| ۱۷۰ | ۳-۶- فناوری‌های ذوب آلیاژهای منگنز                               |
| ۱۷۰ | ۳-۶-۱- مبانی فرایند احیا                                         |
| ۱۷۲ | ۳-۶-۲- چهارچوب فعالیت صنعتی                                      |
| ۱۸۰ | ۴-۶- فناوری تولید فرو منگنز                                      |
| ۱۸۰ | ۴-۶-۱- تولید فرو منگنز پرکربن                                    |
| ۱۸۲ | ۴-۶-۲- تولید تجاری فرو سیلیکو منگنز                              |
| ۱۸۵ | ۴-۶-۳- فرایندهای فرآوری پس از تخلیه فرو منگنز و فرو سیلیکو منگنز |
| ۱۸۶ | ۵-۶- عملیات تصفیه فرو منگنز کم کربن                              |
| ۱۸۶ | ۵-۶-۱- تولید فرو منگنز کم کربن                                   |
| ۱۹۰ | ۵-۶-۲- تولید سیلیکو منگنز کم کربن                                |
| ۱۹۰ | ۶-۶- فرآوری پس از تولید فروآلیاژهای منگنز                        |
| ۱۹۰ | ۶-۶-۱- ریخته‌گری                                                 |
| ۱۹۲ | ۶-۶-۲- خرد کردن و الک کردن                                       |
| ۱۹۳ | ۷-۶- فرو سیلیکو منگنز نیتریده شده                                |

## فصل هفتم: فناوری تولید فرو کروم

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۱۹۵ | ۱-۷- مواد خام مورد استفاده در تولید فرو کروم و فراوری آنها |
| ۱۹۷ | ۱-۱-۷- کانه‌های کروم و فراوری کرومیت                       |
| ۲۰۱ | ۲-۷- فناوری تولید فرو کروم                                 |
| ۲۰۲ | ۱-۲-۷- فناوری فرو کروم کم کربن                             |
| ۲۰۴ | ۱-۱-۲-۷- روش کوره                                          |
| ۲۰۶ | ۲-۱-۲-۷- فناوری خارج از کوره (روش اختلاط)                  |
| ۲۰۹ | ۳-۷- فناوری فرو کروم کربن متوسط                            |
| ۲۱۱ | ۴-۷- فناوری تولید فرو سیلیکو کروم (FeSiCr)                 |
| ۲۱۶ | ۵-۷- فناوری تولید فرو کروم بسیار کم کربن                   |
| ۲۱۸ | ۶-۷- فناوری تولید فرو کروم نیتروژن (FeCrN)                 |

## فصل هشتم: فناوری تولید فرو کروم پر کربن

|     |                                                    |
|-----|----------------------------------------------------|
| ۲۲۹ | ۱-۸- موارد استفاده و کاربردهای فرو کروم پر کربن    |
| ۲۲۹ | ۲-۸- روش‌های تولید فرو کروم پر کربن                |
| ۲۲۹ | ۱-۲-۸- کوره قوس جریان متناوب غوطه‌ور باز نیمه بسته |
| ۲۳۱ | ۲-۲-۸- کوره‌های قوس جریان متناوب غوطه‌ور بسته      |
| ۲۳۷ | ۳-۲-۸- پیش احیا و کوره‌های قوس جریان متناوب        |
| ۲۴۱ | ۴-۲-۸- کوره‌های قوس جریان مستقیم                   |
| ۲۴۵ | ۵-۲-۸- سایر فناوری‌ها                              |
| ۲۴۶ | ۳-۸- عملیات پس از تخلیه و انواع محصول              |
| ۲۴۶ | ۱-۳-۸- تخلیه آلیاژ و سرباره                        |
| ۲۴۸ | ۲-۳-۸- انواع محصولات                               |
| ۲۴۹ | ۳-۳-۸- مدیریت و استفاده از سرباره                  |

## فصل نهم: فناوری تولید فرو نیکل

|     |                                   |
|-----|-----------------------------------|
| ۲۵۱ | ۱-۹- مواد خام نیکل                |
| ۲۵۲ | ۲-۹- ذوب و تصفیه فرو نیکل         |
| ۲۵۲ | ۱-۲-۹- فرو نیکل و ذوب آن          |
| ۲۵۶ | ۲-۲-۹- تصفیه و ریخته‌گری فرو نیکل |

## فصل دهم: فناوری آلیاژهای تنگستن

|     |                                                   |
|-----|---------------------------------------------------|
| ۲۵۹ | ۱-۱۰- مواد معدنی، سنگ معدن و کنسانتره تنگستن..... |
| ۲۶۰ | ۲-۱۰- فناوری تولید فرو تنگستن.....                |
| ۲۶۱ | ۱-۲-۱۰- احیا توسط کربن.....                       |
| ۲۶۲ | ۲-۱۰-۲- احیا توسط کربن و سیلیسیم.....             |
| ۲۶۵ | ۳-۲-۱۰- احیا توسط آلومینیم.....                   |

## فصل یازدهم: فناوری آلیاژهای مولیبدن

|     |                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------|
| ۲۶۷ | ۱-۱۱- مواد معدنی، سنگ معدن و کنسانتره‌های مولیبدن..... |
| ۲۶۸ | ۲-۱۱- تشویه اکسیدکننده کنسانتره‌های مولیبدنیت.....     |
| ۲۶۹ | ۳-۱۱- فناوری تولید فرو مولیبدن.....                    |

## فصل دوازدهم: فناوری فروآلیاژهای وانادیم

|     |                                                             |
|-----|-------------------------------------------------------------|
| ۲۷۵ | ۱-۱۲- فرآوری مواد اولیه وانادیم.....                        |
| ۲۷۵ | ۱-۱-۱۲- فرآوری شیمیایی مواد اولیه وانادیم.....              |
| ۲۷۷ | ۲-۱-۱۲- فرآوری متالورژیکی مواد اولیه وانادیم.....           |
| ۲۷۸ | ۳-۱-۱۲- احیای وانادیم از اکسیدها.....                       |
| ۲۷۸ | ۲-۱۲- فناوری فرو وانادیم.....                               |
| ۲۷۸ | ۱-۲-۱۲- احیا توسط سیلیسیم.....                              |
| ۲۸۰ | ۲-۲-۱۲- فناوری تولید فرو وانادیم با احیا توسط آلومینیم..... |
| ۲۸۱ | ۳-۱۲- فناوری آلیاژهای دیگر فرو وانادیم.....                 |
| ۲۸۱ | ۴-۱۲- فناوری فرو وانادیم نیتride.....                       |

## فصل سیزدهم: فناوری فرو نایوبیم

|     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| ۲۸۳ | ۱-۱۳- منابع نایوبیم و احیای آنها..... |
| ۲۸۳ | ۱-۱-۱۳- مواد معدنی نایوبیم.....       |
| ۲۸۴ | ۲-۱-۱۳- احیای نایوبیم.....            |
| ۲۸۵ | ۲-۱۳- فناوری تولید فرو نایوبیم.....   |

## فصل چهاردهم: فناوری فروآلیاژهای تیتانیم

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۲۸۹ | ۱-۱۴- منابع تیتانیم و روش های احیای آن ها..... |
| ۲۸۹ | ۱-۱-۱۴- مواد اولیه تیتانیم.....                |
| ۲۹۰ | ۲-۱-۱۴- احیای تیتانیم از اکسیدها.....          |
| ۲۹۱ | ۲-۱۴- فناوری تولید فروتیتانیم.....             |

## فصل پانزدهم: فناوری فروآلیاژهای زیرکونیم

|     |                                           |
|-----|-------------------------------------------|
| ۲۹۵ | ۱-۱۵- منابع زیرکونیم و احیای آن.....      |
| ۲۹۶ | ۲-۱۵- فناوری تولید فرو زیرکونیم.....      |
| ۲۹۷ | ۱-۲-۱۵- فرو سیلیکو زیرکونیم.....          |
| ۲۹۹ | ۲-۲-۱۵- فناوری فرو آلومینیم زیرکونیم..... |

## فصل شانزدهم: فرو آلیاژهای بور

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| ۳۰۳ | ۱-۱۶- منابع بور و کاهش آن.....  |
| ۳۰۴ | ۲-۱۶- فناوری تولید فرو بور..... |

## فصل هفدهم: فناوری فروآلیاژها با فلزات نادر خاکی

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| ۳۰۹ | ۱-۱۷- کانه ها، سنگ معدن و مواد معدنی فلزات نادر خاکی..... |
| ۳۱۰ | ۲-۱۷- فناوری تولید فروآلیاژهای عناصر نادر خاکی.....       |
| ۳۱۱ | ۱-۲-۱۷- احیا توسط کربن.....                               |
| ۳۱۲ | ۲-۲-۱۷- احیا توسط آلومینیم.....                           |

## فصل هجدهم: فناوری فروآلیاژها با فلزات قلیایی - خاکی

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۳۱۵ | ۱-۱۸- فناوری تولید آلیاژهای کلسیم-سیلیسیم..... |
| ۳۱۵ | ۱-۱-۱۸- روش احیا توسط کربن.....                |
| ۳۱۷ | ۲-۱-۱۸- روش احیا توسط سیلیسیم.....             |
| ۳۱۹ | ۲-۱۸- فناوری تولید منیزیم و فروآلیاژها.....    |
| ۳۲۰ | ۳-۱۸- فناوری ذوب آلیاژهای استرانسیم.....       |
| ۳۲۱ | ۴-۱۸- فناوری ذوب فرو سیلیکو باریوم.....        |

## فصل نوزدهم: فروآلیاژهای پیچیده

|     |                                              |
|-----|----------------------------------------------|
| ۳۲۴ | ..... ۱-۱۹ - فرو آلیاژهای پیچیده با آلومینیم |
| ۳۲۷ | ..... ۲-۱۹ - فرو آلیاژهای با عناصر دیگر      |
| ۳۲۸ | ..... ۳-۱۹ - فروآلیاژهای عناصر غیر فلزی      |
| ۳۳۰ | ..... ۴-۱۹ - فروآلیاژهای گرمازا              |
| ۳۳۳ | ..... مراجع                                  |