

# عملیات حرارتی فلزات و آلیاژها

تألیف

دکتر سیدعلی صدوق ویننی

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی مکانیک

عضو قطب علمی مکانیک جامدات

انتشارات جهاد دانشگاهی

واحد صنعتی امیرکبیر

صدوق ونینی، علی

عملیات حرارتی فلزات و آلیاژها / تألیف علی صدوق ونینی - تهران: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی  
امیرکبیر، ۱۳۸۴.

۳۲۸ ص: جدول، مبصو، نمودار.

ISBN: 964-8737-04-5: ۲۸۰۰۰ ریال

۲۲۸

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

به انگلیسی:

Ali Sadough Vanini. Heat treatment of metals and alloys.

۱. متالورژی حرارتی      ۲. متابوگرافی      ۳. فلزکاری  
الف. جهاد دانشگاهی. واحد صنعتی امیرکبیر. ب. عنوان.

۶۶۹ / ۲۸۲

۸ ع ۴ ص / ۱۵ / ۶۸۸ TN

۲۶۴۷-۸۴م

کتابخانه ملی ایران



انتشارات جهاد دانشگاهی  
واحد صنعتی امیرکبیر

- 
- عنوان : عملیات حرارتی فلزات و آلیاژها
  - مؤلف : دکتر سیدعلی صدوق ونینی
  - قطع و صفحه : وزیری ۳۴۴ ص
  - چاپ :
  - تیراژ : ۵۰۰ نسخه
  - نوبت چاپ : اول ۱۳۸۴
  - قیمت : ۲۸۰۰۰ ریال
  - شابک : ۹۶۴-۸۷۳۷-۰۴-۵
  - آدرس و مرکز پخش : تهران - خیابان حافظ - روبروی سمیه - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
  - تلفن : ۸۸۹۵۹۶۹-۶۴۶۵۳۹۲
  - فاکس : ۶۹۵۰۹۸۲

## بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

### پیشگفتار جهاد دانشگاهی

اکنون در دوران بازسازی مملکت اسلامیان ایران، توجه به تقویت بنیه علمی دانشگاهها و دیگر نهادهای مقدس علمی یکی از وظایف همه آگاهان و دست‌اندرکاران امور می‌باشد. از این رو جهاد دانشگاهی با علم و آگاهی نسبت به این مهم تمامی نیرو و توان خود را صرف تجهیز علمی و اقتصادی هر چه بیشتر دانشجویان و آینده‌سازان جامعه، نموده است و در این راه از هیچ کوشش و تلاشی دریغ نخواهد ورزید.

در این راستا انتشارات جهاد دانشگاهی با این باور که داشتن استقلال اقتصادی و عقیدتی، مستلزم دارا بودن قدرت بالای علمی و آشنایی با تکنولوژی مدرن، البته در کنار ایمان و اعتقاد به آرمانها است، سعی می‌نماید با آماده‌سازی و انتشار متون متنوع و مختلف علمی به هر دو زبان فارسی و لاتین که از سطح مطلوبی برخوردار باشند، به وظیفه انسانی و اعتقادی خویش جامه عمل بپوشاند. و امیدوار است که توانسته باشد کمکی هر چند ناچیز به علاقه‌مندان و دلسوزان میهن اسلامی و پویندگان راه علم انجام دهد.

با این باور و اعتقاد از همه عزیزان دانش‌پژوه جهت ارائه نظرات و پیشنهادات برای هر چه بهتر شدن سطح امور انتشارات این جهاد، یاری می‌طلبیم.

در انتها این کتاب را به روان پاک شهدای دانشگاهی بویژه شهدای دانشگاه صنعتی امیرکبیر تقدیم می‌نماییم. امید است کلیه دانشگاهیان استوار و ثابت‌قدم پیونده راه شهیدان در محیط مقدس دانشگاه باشند.

والسلام علی من اتبع الهدی

انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر

## مقدمه

در بین تمام دلایلی که می توان برای اهمیت آلیاژها به خصوص فولادها در زندگی مدرن ارائه کرد، تغییر خواص در محدوده ای وسیع و دلخواه با استفاده از ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی، بنیادی و ویژه است. این تغییر شامل خواص مرتبط با ساخت و تولید (ماشینکاری، شکل دهی سرد و گرم، کشش عمیق، جوشکاری) یا خواص کاربردی (حد الاستیک، مقاومت کششی، ضربه پذیری، مقاومت خستگی، سایش، خزش، خوردگی و...) است.

به بررسی علمی فرایندهای مرتبط با عملیات حرارتی آلیاژها و همچنین عواملی که بتوانند بر این فرایندها مؤثر باشند، برای رسیدن به ریزساختار و رفتار مکانیکی مورد نظر روی قطعات ساخته شده و همچنین ساخت آنها با شرایط بهتر توجه شده است. این مسئله موضوع تحقیق تعداد زیادی از پروژه های تحقیقاتی بنیادی بوده است. در این کتاب سعی شده اطلاعات بنیادی عملیات حرارتی فلزات و آلیاژها به صورت منظم ارائه گردند و به اهمیت موضوع از دیدگاه علمی و کاربردی توجهی خاص شده است.

## پیش گفتار

آلیاژهای مهندسی سهم مهمی در صنایع اقتصادی مدرن دارند، بنابراین دانش فنی مرتبط با این مواد برای مهندسان کاربردی ویژه و مهم است. در بین تمام آلیاژهای فلزی فولاد، که عنصر پایه آن آهن است، با توجه به تنوع و کاربرد گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع مکانیک، شیمی، اتومبیل، نفت و گاز، هوا فضا و هسته ای ویژگی خاص خود را دارد. می توان پرسید که اگر آهن و آلیاژهای آهنی نبودند توسعه جامع کنونی چگونه می بود؟

کاربردهای بی انتهای فولادها در درجه اول با نقش عناصر آلیاژی اضافه شده مرتبط اند که به صورت محلول جامد بین نشین و جانشین عمل می کنند. اولین مشکل مهندسان و محققان با تعیین میزان اهمیت نقش هر یک از عناصر اضافه شده مرتبط است که می تواند به صورت همکاری در تقویت خواص یا بر عکس خنثی کردن اثر یکدیگر، بر حسب درصد و به خصوص بر حسب عملیات حرارتی پس از تولید، باشد.

در این کتاب، با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده از تعداد زیادی از فولادهای آزمایشگاهی یا تجاری، نقش ترکیب شیمیایی فولاد، عملیات حرارتی و حرارتی-مکانیکی، که تنوع آنها بی انتهاست بررسی می شود. این تنوع نقش اساساً مرتبط با چند شکلی (پلی مرفیسم) آهن، با سه ساختار معروف  $\alpha$ ،  $\delta$  و  $\gamma$ ، مرتبط است. این خواص از نقطه نظر تعداد ساختار تنها در اورانیوم و پلوتونیم مشاهده می شود. آلومینیم و مس که در تمام دماها ساختار بلوری FCC خود را حفظ می کنند تنوع ساختاری ندارند. بر عکس تیتانیوم و زیرکونیم با داشتن دو نوع ساختار چند شکلی می توانند مانند فولادها عملیات حرارتی شوند؛ به این معنی که با سرد کردن سریع از دمای بالا، ساختار مارتنزیت به دست می آید.

بنابراین مطالب این کتاب ادامه مطالب کتاب «مقدمه ای بر علم مواد» و با خواص فیزیکی و به خصوص ساختاری آهن مرتبط است. همان گونه که نمودارهای تعادل دوتایی یا سه تایی نشان می دهند دمای استحاله چند شکلی آهن تحت تأثیر عناصر آلیاژی بین نشین و جانشین اضافه شده است. شناخت نمودارهای تعادل اساس توصیف ساختارهای حاصل از عملیات حرارتی با تغییر دمای کند است؛ مانند سرد کردن آهسته آستنیت یک فولاد معمولی کربنی که حاصل آن فاز پرلیت است.

پیچیده‌تر از آن تغییرات ساختار حاصل از سرد کردن سریع (یا گرم کردن) است که در این نوع فرایند زمان کافی به منظور نفوذ در حالت جامد و رسیدن به فازهای تعادلی (ارائه شده در نمودار تعادل) وجود ندارد. بنابراین اولین بار بن و داوون پورت رسم نمودارهای استحاله ساختار آستنیت در سرد کردن پیوسته (نمودار CCT) یا نمودار استحاله هم دما، زمان - دما - استحاله (TTT) را پیشنهاد کردند.

رسم نمودارهای CCT و TTT، که تضمین‌کننده عملیات حرارتی صحیح فولادها و دستیابی به بهترین خواص کاربردی است، با استفاده از چندین روش تجربی ممکن است. در این میان می‌توان از آنالیز حرارتی ترمو مغناطیسی، انبساط‌سنجی، مقاومت الکتریکی، تفرق اشعه X و آزمون متالوگرافی نام برد.

خلاصه این که در بین مزایای متعدد کتاب حاضر دو مزیت مهمی ویژه دارد: اولاً مرجع اطلاعاتی غنی برای قشر گسترده‌ای از محققان آزمایشگاهی و تجربی همه گرایشهای مهندسی است و شامل مراجع گسترده و تعداد زیادی شکل است که دقیق انتخاب شده‌اند. در ثانی محتوای کتاب نشان می‌دهد که مرز فتح نشده‌ای بین تحقیقات کاربردی و بنیادی وجود ندارد. این گمان غلط خطر عمیق شدن شکافی غیر قابل فهم را بین تحقیقات آزمایشگاهی بنیادی و تحقیقات صنعتی افزایش می‌دهد. بررسی آلیاژهای صنعتی به علت تعداد زیاد پارامترهای مرتبط با عناصر افزودنی که باید کنترل شوند به تفکر و استدلالهای بیشتری نسبت به آلیاژهای دوتایی فلزات بسیار خالص نیاز دارد. بنابراین کتاب حاضر می‌تواند راهنمای مناسبی برای محققان تحقیقات بنیادی در ارائه و ادامه بهترین روش حل مشکلات مرتبط با آلیاژهای جدید کاربرد صنعتی، باشد.

این کتاب شامل یازده فصل است. در سه فصل اول مسائلی مهم در زمینه درک اصول عملیات حرارتی فلزات و آلیاژها: سینتیک، ترمودینامیک و بازپخت به اجمال مرور شده‌اند.

در سه فصل بعدی نمودارهای TTT و CCT و کاربردهای آنها، سختی و سختی‌پذیری، تمپر و نهایتاً پیش‌بینی رفتار مکانیکی پس از سرد کردن و تمپر بررسی شده‌اند.

در قسمت آخر کتاب (فصلهای هفتم تا یازدهم) عملیات حرارتی فولادهای ضد زنگ، ابزار، سختی سطحی و آلیاژهای غیر آهنی و حافظه‌دار توصیف شده‌اند.

با تمام کوششها، امکان آن وجود دارد که در کتاب غلط‌های چاپی، نارسایی در متن یا واژه‌های غیرمتعارف و متداول وجود داشته باشد. سپاس خود را به تمام عزیزان، همکاران، کارشناسان و دانشجویان که آنها را تذکر خواهند داد تقدیم می‌نمایم.

در خاتمه از خداوند متعال مسئلت می‌نمایم که بیش از پیش ما را در خدمت به دانش و فرهنگ کشور و جامعه مسلمین موفق و مؤید بدارد.

سیدعلی صدوق ونینی

بهار ۱۳۸۴

## فهرست مطالب

عنوان

مقدمه

پیشگفتار

|              |                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------|
| ۱.....       | فصل اول: سرعت واکنشها فرایند نفوذ.....            |
| ۱-۱-۱.....   | ۱-۱-۱- مقدمه.....                                 |
| ۱-۱-۲.....   | ۱-۱-۲- سینتیک واکنشها.....                        |
| ۱-۱-۳.....   | ۱-۱-۳- مطالعه نفوذ.....                           |
| ۱-۳-۱-۱..... | ۱-۳-۱-۱- مقدمه.....                               |
| ۱-۳-۲-۱..... | ۱-۳-۲-۱- مکانیزمهای میکروسکپی نفوذ.....           |
| ۱-۳-۳-۱..... | ۱-۳-۳-۱- قوانین نفوذ: معادلات فیک.....            |
| ۱۳.....      | فصل دوم: سینتیک تغییر فاز در آلیاژها.....         |
| ۱-۲-۱.....   | ۱-۲-۱- مقدمه.....                                 |
| ۱-۲-۲.....   | ۱-۲-۲- جوانه زنی.....                             |
| ۱-۲-۲-۱..... | ۱-۲-۲-۱- جوانه زنی یک نواخت.....                  |
| ۱-۲-۲-۲..... | ۱-۲-۲-۲- جوانه زنی غیر یک نواخت.....              |
| ۱-۲-۲-۳..... | ۱-۲-۲-۳- سرعت جوانه زنی.....                      |
| ۱-۲-۲-۴..... | ۱-۲-۲-۴- رشد جوانه ها و سرعت استحاله با نفوذ..... |
| ۱-۲-۲-۵..... | ۱-۲-۲-۵- بهم چسبیدن رسوبها.....                   |
| ۱-۲-۲-۶..... | ۱-۲-۲-۶- تبلور مجدد.....                          |
| ۱-۲-۲-۷..... | ۱-۲-۲-۷- استحاله بدون نفوذ یا مارتنزیتی.....      |
| ۳۳.....      | فصل سوم: آنیل (باز پخت).....                      |
| ۱-۲-۱.....   | ۱-۲-۱- تعریف.....                                 |
| ۱-۲-۲.....   | ۱-۲-۲- انواع بازپخت.....                          |
| ۱-۲-۳.....   | ۱-۲-۳- آنیل کامل.....                             |

|    |                                                                      |
|----|----------------------------------------------------------------------|
| ۳۴ | ..... ۲-۱-۲-۳- آنیل یک نواخت کردن                                    |
| ۳۵ | ..... ۳-۱-۲-۳- آنیل بازیابی مجدد یا ریز کردن دانه                    |
| ۴۰ | ..... ۲-۲-۳- آنیل با دمای ماکزیمم زیر $Ac_1$                         |
| ۴۰ | ..... ۱-۲-۲-۳- آنیل نرم کردن یا بهبود ماشینکاری                      |
| ۴۰ | ..... ۲-۲-۲-۳- آنیل کروی شدن پرلیت                                   |
| ۴۱ | ..... ۳-۲-۲-۳- آنیل بازیابی و تبلور مجدد                             |
| ۴۲ | ..... ۱-۳-۲-۲-۳- آنیل بازیابی                                        |
| ۴۳ | ..... ۲-۳-۲-۲-۳- آنیل تبلور مجدد                                     |
| ۴۴ | ..... ۳-۳-۲-۲-۳- آنیل تنش زدایی                                      |
| ۴۴ | ..... ۳-۲-۳- آنیل از دیدگاه صنعتی                                    |
| ۴۵ | ..... ۴-۲-۳- آنیل نرماله کردن                                        |
| ۴۵ | ..... ۵-۲-۳- اثر فرایندهای تولید بر خواص فولاد                       |
| ۴۷ | ..... فصل چهارم: نمودارهای زمان-دما-استحاله                          |
| ۴۷ | ..... ۱-۴- مقدمه                                                     |
| ۴۹ | ..... ۲-۴- شرایط متالورژیکی مارتنزیت کردن فولادها                    |
| ۵۰ | ..... ۳-۴- آستنیت کردن فولاد                                         |
| ۵۰ | ..... ۱-۳-۴- تعریف                                                   |
| ۵۰ | ..... ۲-۳-۴- خصوصیات عملیات                                          |
| ۵۱ | ..... ۳-۳-۴- خصوصیات حالت آستنیتی                                    |
| ۵۱ | ..... ۱-۳-۳-۴- ترکیب شیمیایی و یک نواختی فاز آستنیت                  |
| ۵۲ | ..... ۲-۳-۳-۴- بزرگی متوسط دانه آستنیت                               |
| ۵۴ | ..... ۴-۳-۴- اثر عناصر آلیاژی بر آستنیت کردن                         |
| ۵۴ | ..... ۱-۴-۳-۴- خصوصیات آلفاژن (فریت زا) یا گاما ژن (آستنیت زا)       |
| ۵۴ | ..... ۲-۴-۳-۴- خصوصیات کربوریژن (کربور زا) یا غیر کربوریژن           |
| ۵۶ | ..... ۴-۴- تغییر فاز خارج از تعادل آستنیت در شرایط هم دما نمودار TTT |
| ۵۶ | ..... ۱-۴-۴- اصول بررسی                                              |
| ۵۷ | ..... ۲-۴-۴- استحاله آستنیت در شرایط هم دما                          |
| ۵۷ | ..... ۱-۲-۴-۴- استحاله با نقوذ آستنیت                                |

- ۵۹.....۴-۴-۲-۱-۱-استحاله پرلیتی
- ۵۹.....۴-۴-۲-۱-۲-استحاله باینیتی
- ۶۱.....۴-۴-۲-۲-استحاله بدون نفوذ یا مارتنزیتی
- ۶۱.....۴-۴-۲-۲-۱-خصوصیات مارتنزیت
- ۶۴.....۴-۴-۲-۲-۲-خصوصیات استحاله مارتنزیت
- ۶۵.....۴-۴-۳-اثر عوامل مختلف بر تغییر فاز هم دمای آستنیت
- ۶۵.....۴-۴-۳-۱-مثال نمودار TTT فولاد 42Cr4
- ۶۷.....۴-۴-۳-۲-اثر ترکیب شیمیایی
- ۶۸.....۴-۴-۳-۳-اثر شرایط آستنیت کردن
- ۶۹.....۴-۴-۴-توصیف نمودارهای TTT؛ مثال فولاد 42Cr4
- ۷۰.....۴-۴-۵-کاربرد نمودارهای TTT؛ عملیات حرارتی هم دما
- ۷۰.....۴-۴-۵-۱-مارتمپر کردن
- ۷۰.....۴-۴-۵-۲-آستمپر کردن
- ۷۱.....۴-۴-۵-۳-آنیل هم دما
- ۷۲.....۴-۴-۵-۴-آسفورمینگ
- ۷۳.....۴-۵-روشهای آنالیز حرارتی
- ۷۳.....۴-۵-۱-آنالیز انبساط سنجی
- ۷۳.....۴-۵-۱-۱-انبساط سنجی تفاضلی
- ۷۴.....۴-۵-۱-۲-انبساط سنجی مطلق
- ۷۵.....۴-۵-۱-۳-محاسبه ضریب متوسط انبساط  $\alpha_m$  بین دو دمای  $T_1$  و  $T_2$
- ۷۶.....۴-۵-۲-آنالیز حرارتی تفاضلی
- ۷۷.....۴-۵-۳-آنالیز مغناطیسی
- ۷۸.....۴-۵-۴-آنالیز ترموگراویمتری
- ۷۹.....۴-۶-استحاله غیر هم دمای آستنیت؛ نمودار استحاله در سرد شدن پیوسته CCT
- ۷۹.....۴-۶-۱-مثال نمودار CCT فولاد 42Cr4
- ۸۱.....۴-۶-۲-اثر عناصر آلیاژی
- ۸۱.....۴-۶-۳-روش رسم نمودار CCT؛ انبساط سنجی
- ۸۴.....۴-۶-۴-مسئله آستنیت باقیمانده؛ پیش بینی با نمودار CCT

|     |                                                                     |
|-----|---------------------------------------------------------------------|
| ۸۹  | فصل پنجم: سختی و سختی پذیری فولادها                                 |
| ۸۹  | ۱-۵- مقدمه                                                          |
| ۹۲  | ۲-۵- تعیین سختی پذیری و خصوصیات پس از آب دادن                       |
| ۹۲  | ۱-۲-۵- استفاده از نمودار CCT                                        |
| ۹۲  | ۱-۱-۲-۵- سرعت بحرانی آب دادن مارتنزیتی                              |
| ۹۴  | ۲-۱-۲-۵- شرایط سرد کردن قطعه                                        |
| ۹۵  | ۳-۱-۲-۵- معادله قانون سرد کردن                                      |
| ۹۸  | ۴-۱-۲-۵- انتخاب شرایط سرد کردن                                      |
| ۹۹  | ۵-۱-۲-۵- تنشهای عملیات حرارتی                                       |
| ۱۰۳ | ۲-۲-۵- تعیین سختی پذیری با آزمون ژومینی                             |
| ۱۰۳ | ۱-۲-۲-۵- اصول                                                       |
| ۱۰۳ | ۲-۲-۲-۵- منحنی ژومینی                                               |
| ۱۰۴ | ۳-۲-۲-۵- استفاده از نمودار ژومینی                                   |
| ۱۰۵ | ۳-۲-۵- تعیین سختی پذیری به روش گراسمن، محاسبه قطر آرمانی            |
| ۱۱۱ | فصل ششم: تمپر (بازگشت دادن)                                         |
| ۱۱۱ | ۶- تمپر فولادها پس از سرد کردن سریع                                 |
| ۱۱۱ | ۱-۶- مقدمه: تعریف و هدف از تمپر                                     |
| ۱۱۲ | ۲-۶- تغییر ساختارها در طی تمپر                                      |
| ۱۱۲ | ۱-۲-۶- استحاله مارتنزیت در تمپر                                     |
| ۱۱۲ | ۱-۱-۲-۶- فولادهای بدون عناصر کربوریزن                               |
| ۱۱۵ | ۲-۱-۲-۶- تمپر فولادهای دارای عناصر کربوریزن                         |
| ۱۱۵ | ۲-۲-۶- استحاله آستنیت در تمپر                                       |
| ۱۱۵ | ۱-۲-۲-۶- نمودار با زمان جوانه زنی نسبتاً کوتاه برای استحاله باینیتی |
| ۱۱۶ | ۲-۲-۲-۶- نمودار TTT فولادهای با زمان جوانه زنی زیاد                 |
| ۱۱۷ | ۳-۶- انبساط سنجی در تمپر                                            |
| ۱۱۹ | ۴-۶- تحول خواص مکانیکی در تمپر                                      |
| ۱۲۰ | ۱-۴-۶- اثر ترکیب شیمیایی                                            |

|     |                                                                                         |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۲۱ | ۶-۴-۲- اثر عوامل خارجی دما و زمان تمپر: پارامتر معادل دما-زمان، نمودار هدایت کننده تمپر |
| ۱۲۳ | ۶-۴-۳- تحول ضربه پذیری در تمپر                                                          |
| ۱۲۳ | ۶-۴-۱-۳- تردی در تمپر (غیر بازگشتی)                                                     |
| ۱۲۳ | ۶-۴-۲-۳- تردی در تمپر (بازگشتی)                                                         |
| ۱۲۴ | ۶-۴-۴- تغییرات ابعاد نمونه در تمپر                                                      |
| ۱۲۵ | ۶-۵- تمپر از نقطه نظر تجربی                                                             |
| ۱۲۷ | ۶-۶- روشهای کمی پیش بینی رفتار مکانیکی فولادها پس از عملیات حرارتی                      |
| ۱۲۷ | ۶-۶-۱- برنامه پرور-ژومینی کروزلوار                                                      |
| ۱۲۷ | ۶-۶-۱-۱- خصوصیات فولاد و شرایط آستنیته کردن: سرعتهای بحرانی                             |
| ۱۲۹ | ۶-۶-۲-۱- قوانین سرد کردن                                                                |
| ۱۳۰ | ۶-۶-۳-۱- رفتار فولاد پس از آب دادن                                                      |
| ۱۳۱ | ۶-۶-۴-۱- رفتار فولاد پس از بازگشت                                                       |
| ۱۳۳ | ۶-۶-۲- روش ایرسید-موری                                                                  |
| ۱۳۳ | ۶-۶-۱-۲- خصوصیات پس از سرد کردن از دمای آستنیته                                         |
| ۱۳۵ | ۶-۶-۲-۲- خصوصیات پس از بازگشت                                                           |
| ۱۳۶ | ۶-۶-۳- روشهای گرافیکی                                                                   |
| ۱۳۷ | فصل هفتم: عملیات حرارتی فولادهای ضد زنگ                                                 |
| ۱۳۷ | ۷-۱- مقدمه                                                                              |
| ۱۳۷ | ۷-۲- نمودارهای تعادل                                                                    |
| ۱۳۸ | ۷-۲-۱- نمودار دوتایی Fe-Cr                                                              |
| ۱۳۸ | ۷-۲-۲- آلیاژهای دوتایی Fe-Ni                                                            |
| ۱۳۹ | ۷-۲-۳- نمودار سه تایی Fe-Ni-Cr                                                          |
| ۱۴۰ | ۷-۲-۴- فولادهای ضد زنگ با n عنصر                                                        |
| ۱۴۱ | ۷-۲-۵- اثر کربن در فولادهای ضد زنگ                                                      |
| ۱۴۲ | ۷-۳- دسته بندی فولادهای ضد زنگ                                                          |
| ۱۴۵ | ۷-۴- بررسی انواع فولادهای ضد زنگ                                                        |
| ۱۴۵ | ۷-۴-۱- فولادهای ضد زنگ مارتنزیتی (مغناطیسی)                                             |

|     |                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------|
| ۱۴۶ | ۲-۷-۴- عملیات حرارتی فولادهای ضد زنگ فritی                    |
| ۱۴۹ | ۳-۴-۷- فولادهای ضد زنگ آستنییتی                               |
| ۱۵۰ | ۱-۳-۴-۷- عملیات حرارتی                                        |
| ۱۵۲ | ۲-۳-۴-۷- مقایسه خواص مکانیکی فولادهای ضد زنگ فritی و آستنییتی |
| ۱۵۶ | ۴-۴-۷- عملیات حرارتی فولادهای ضد زنگ رسوب سختی                |
| ۱۵۷ | ۱-۴-۴-۷- فولادهای مارتنزیتی استحاله غیر مستقیم                |
| ۱۵۹ | ۲-۴-۴-۷- فولادهای مارتنزیتی استحاله مستقیم                    |
| ۱۵۹ | ۳-۴-۴-۷- خواص مکانیکی                                         |
| ۱۶۰ | ۵-۷- فرایندهای خوردگی در فولادهای ضد زنگ                      |
| ۱۶۰ | ۱-۵-۷- نوع خوردگی در فولادهای ضد زنگ                          |
| ۱۶۱ | ۲-۵-۷- خوردگی عمومی                                           |
| ۱۶۲ | ۳-۵-۷- خوردگی سوزنی                                           |
| ۱۶۵ | ۴-۵-۷- خوردگی شیاری                                           |
| ۱۶۶ | ۶-۵-۷- خوردگی تحت تنش                                         |
| ۱۶۶ | ۷-۵-۷- خوردگی مرزدانه ای                                      |
| ۱۶۷ | ۱-۷-۵-۷- مکانیزم های خوردگی مرزدانه ای                        |
| ۱۶۷ | ۲-۷-۵-۷- روشهای پیش گیری از حساس شدن فولاد                    |
| ۱۷۱ | فصل هشتم: عملیات حرارتی فولادهای ابزار                        |
| ۱۷۱ | ۱-۸- تعریف و خواص کلی                                         |
| ۱۷۱ | ۱-۱-۸- خواص کلی کاربردی                                       |
| ۱۷۲ | ۲-۱-۸- خواص مرتبط با ساخت و تولید                             |
| ۱۷۳ | ۲-۸- ترکیب شیمیایی و ساختار                                   |
| ۱۷۵ | ۱-۲-۸- ساختار پس از آنیل                                      |
| ۱۷۵ | ۲-۲-۸- ساختار پس از عملیات حرارتی                             |
| ۱۷۶ | ۳-۸- دسته بندی فولادهای ابزار                                 |
| ۱۷۸ | ۱-۳-۸- فولادهای غیر آلیاژی سرد کار                            |
| ۱۷۹ | ۲-۳-۸- فولادهای آلیاژی سرد کار                                |
| ۱۷۹ | ۳-۳-۸- فولادهای گرم کار                                       |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۱۷۹ | ۴-۳-۸ فولادهای ابزار تندبر                            |
| ۱۸۰ | ۱-۴-۳-۸ ریز ساختار فولادهای ابزار                     |
| ۱۸۱ | ۲-۴-۳-۸ عملیات حرارتی فولادهای تندبر                  |
| ۱۸۲ | ۵-۳-۸ ابزارهای کربور فلزی                             |
| ۱۸۵ | فصل نهم: عملیات حرارتی سختی سطحی و موضعی              |
| ۱۸۵ | ۱-۹ مقدمه                                             |
| ۱۸۷ | ۲-۹ سرد کردن سریع سطح                                 |
| ۱۸۷ | ۱-۲-۹ اصول و هدف                                      |
| ۱۸۷ | ۲-۲-۹ روشهای مورد استفاده                             |
| ۱۸۷ | ۱-۲-۲-۹ گرم کردن القایی                               |
| ۱۸۹ | ۲-۲-۲-۹ گرم کردن شعله ای                              |
| ۱۹۰ | ۳-۲-۲-۹ روشهای جدید                                   |
| ۱۹۰ | ۳-۲-۹ فولادهای مورد استفاده                           |
| ۱۹۱ | ۳-۹ کربن دهی                                          |
| ۱۹۱ | ۱-۳-۹ اصول و هدف                                      |
| ۱۹۱ | ۲-۳-۹ مرحله غنی سازی سطح از کربن                      |
| ۱۹۶ | ۴-۹ ضخامت لایه کربن داده شده                          |
| ۱۹۸ | ۵-۹ فولادهای مناسب برای کربن دهی                      |
| ۱۹۹ | ۶-۹ کربن دهی به روش جامد                              |
| ۲۰۱ | ۷-۹ کربن دهی به روش مایع                              |
| ۲۰۴ | ۸-۹ کربن دهی به روش گازی                              |
| ۲۰۵ | ۹-۹ کربن دهی انتخابی - کربن دهی موضعی                 |
| ۲۰۷ | ۱۰-۹ عملیات حرارتی پس از کربن دهی و ساختار حاصل از آن |
| ۲۰۸ | ۱۱-۹ مقایسه روشهای مختلف کربن دهی                     |
| ۲۰۹ | ۱۲-۹ تحلیل تنش در قطعات کربن داده شده                 |
| ۲۱۱ | ۱۳-۹ استحکام خستگی فولادهای کربن داده شده             |
| ۲۱۵ | ۱۴-۹ نیتروژن دهی                                      |
| ۲۱۵ | ۱-۱۴-۹ مقدمه                                          |

|     |                                          |
|-----|------------------------------------------|
| ۲۱۶ | ۹-۱۴-۲- روشهای مختلف نیتروژن دهی         |
| ۲۲۱ | ۹-۱۵-کربن- نیتروژن دهی                   |
| ۲۲۳ | فصل دهم: عملیات حرارتی آلیاژهای غیر آهنی |
| ۲۲۳ | ۱۰-۱-۱- آلومینیم                         |
| ۲۲۳ | ۱۰-۱-۱-۱- خواص فیزیکی                    |
| ۲۲۴ | ۱۰-۱-۱-۲- آلومینیم صنعتی ( $Al > 99\%$ ) |
| ۲۲۴ | ۱۰-۱-۲-۱- اثر ناخالصیها                  |
| ۲۲۵ | ۱۰-۱-۳- مقاومت خوردگی                    |
| ۲۲۵ | ۱۰-۱-۴- رفتار مکانیکی                    |
| ۲۲۷ | ۱۰-۱-۵- انواع آلومینیم                   |
| ۲۲۸ | ۱۰-۱-۶- تولید آلومینیم                   |
| ۲۲۹ | ۱۰-۱-۲- آلیاژهای آلومینیم                |
| ۲۳۱ | ۱۰-۱-۲-۱- عملیات حرارتی یک نواخت کردن    |
| ۲۳۱ | ۱۰-۱-۲-۲- عملیات نرم کردن                |
| ۲۳۱ | ۱۰-۱-۲-۳- عملیات سرد کردن سریع           |
| ۲۳۲ | ۱۰-۱-۳-۱- اصول                           |
| ۲۳۲ | ۱۰-۱-۳-۲- مثال آلیاژ $AlCu$ با ۴ درصد مس |
| ۲۳۶ | ۱۰-۱-۳-۳- عملیات صنعتی رسوب سختی         |
| ۲۳۶ | ۱۰-۱-۲-۲- خواص کلی آلیاژهای آلومینیم     |
| ۲۳۶ | ۱۰-۱-۲-۱- مقاومت به گرما                 |
| ۲۳۷ | ۱۰-۱-۲-۲- مقاومت به دما پایین            |
| ۲۳۷ | ۱۰-۱-۲-۳- مقاومت خستگی                   |
| ۲۳۷ | ۱۰-۱-۲-۴- مقاومت خوردگی                  |
| ۲۳۸ | ۱۰-۱-۲-۵- شکل دهی                        |
| ۲۳۸ | ۱۰-۱-۲-۶- جوشکاری                        |
| ۲۳۸ | ۱۰-۱-۲-۷- مقایسه استحکام آلیاژهای مختلف  |
| ۲۳۹ | ۱۰-۱-۲-۳- آلیاژهای کار سختی              |
| ۲۳۹ | ۱۰-۱-۳-۱- آلیاژهای آلومینیم منگنز (۳۰۰۰) |

- ۲۴۰.....آلیاژهای آلومینیم- منیزیم (۵۰۰).....۱-۱-۲-۳-۲
- ۲۴۳.....آلیاژهای سختی رسوبی.....۱-۱-۲-۴-۲
- ۲۴۳.....آلیاژهای آلومینیم - مس (۲۰۰).....۱-۱-۲-۴-۱
- ۲۴۳.....آلیاژهای تغییر شکل پلاستیک.....۱-۱-۲-۴-۱
- ۲۴۳.....آلیاژهای مقاومت مکانیکی زیاد.....۱-۱-۲-۴-۲
- ۲۴۵.....آلیاژهای آلومینیم-سیلیسیم- منیزیم (۶۰۰).....۱-۱-۲-۴-۲
- ۲۴۶.....آلیاژهای آلومینیم- روی- منیزیم (۷۰۰).....۱-۱-۲-۴-۳
- ۲۴۸.....آلیاژهای آلومینیم - سیلیسیم (۴۰۰).....۱-۱-۲-۵
- ۲۴۸.....مس و آلیاژهای آن.....۱-۲-۲
- ۲۴۹.....خواص فیزیکی.....۱-۱-۲
- ۲۴۹.....اثر ناخالصی.....۱-۲-۲
- ۲۵۱.....مس صنعتی.....۱-۲-۳
- ۲۵۱.....خواص مکانیکی.....۱-۲-۴
- ۲۵۲.....مقاومت خوردگی.....۱-۲-۵
- ۲۵۲.....مس کم آلیاژ.....۱-۲-۲
- ۲۵۲.....کلیات.....۱-۲-۲
- ۲۵۲.....مس و نقره (۰/۰۸ درصد).....۱-۲-۲
- ۲۵۳.....مس و کادمیم.....۱-۲-۳
- ۲۵۳.....مس و تلور (۰/۷-۰/۳ درصد).....۱-۲-۴
- ۲۵۴.....مس و کرم (۰/۹-۰/۵ درصد).....۱-۲-۵
- ۲۵۴.....مس و بریلیوم.....۱-۲-۶
- ۲۵۵.....آلیاژهای مس.....۱-۲-۳
- ۲۵۵.....کلیات.....۱-۳-۲
- ۲۵۶.....برنجها.....۱-۳-۲
- ۲۵۶.....برنجهای ساده (دوتایی).....۱-۳-۲
- ۲۵۷.....برنجها با افزودنی.....۱-۳-۲
- ۲۵۸.....خواص مکانیکی.....۱-۳-۳
- ۲۵۸.....مقاومت خوردگی.....۱-۳-۴

|     |                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|
| ۲۵۸ | ۱۰-۲-۳-۳- برنرها                                                   |
| ۲۵۸ | ۱۰-۲-۳-۳-۱- برنرهای ساده (دوتایی)                                  |
| ۲۶۰ | ۱۰-۲-۳-۳-۲- برنرهای با افزودنی                                     |
| ۲۶۱ | ۱۰-۲-۳-۳- خواص مکانیکی                                             |
| ۲۶۱ | ۱۰-۲-۳-۴- برنز آلومینیم دار                                        |
| ۲۶۳ | فصل یازدهم: حرارت و حرکت در آلیاژهای حافظه دار                     |
| ۲۶۳ | ۱۱-۱- مقدمه                                                        |
| ۲۶۵ | ۱۱-۲- مکانیزم و ترمودینامیک استحاله مارتنزیتی                      |
| ۲۶۵ | ۱۱-۲-۱- خصوصیات کلی استحاله مارتنزیتی                              |
| ۲۶۷ | ۱۱-۲-۲- سینماتیک استحاله مارتنزیتی                                 |
| ۲۶۹ | ۱۱-۲-۲-۱- تغییر شکل ماکزیمم در طی استحاله مارتنزیتی با یک واریانت  |
| ۲۷۰ | ۱۱-۲-۲-۲- تغییر شکل طی استحاله با چندین واریانت                    |
| ۲۷۰ | ۱۱-۲-۲-۳- تغییر شکل با جهت یابی مجدد واریانت ها                    |
| ۲۷۱ | ۱۱-۲-۲-۴- تشکیل مارتنزیت در دانه های پلی کریستال                   |
| ۲۷۲ | ۱۱-۳- انواع آلیاژهای حافظه دار و خواص آنها                         |
| ۲۷۳ | ۱۱-۴- خواص ترمودینامیکی آلیاژهای حافظه دار                         |
| ۲۷۳ | ۱۱-۴-۱- فوق ترموالاستیسیته                                         |
| ۲۷۸ | ۱۱-۴-۲- خصوصیات تغییر فاز مارتنزیتی در آلیاژ حافظه دار پلی کریستال |
| ۲۸۰ | ۱۱-۴-۳- حافظه یک جهتی                                              |
| ۲۸۳ | ۱۱-۴-۴- حافظه دوجتهی                                               |
| ۲۸۴ | ۱۱-۴-۵- شبه الاستیسیته                                             |
| ۲۸۷ | ۱۱-۴-۶- اثر کانوچویی                                               |
| ۲۸۸ | ۱۱-۵- کاربرد های آلیاژهای حافظه دار                                |
| ۲۹۹ | ۱۱-۶- نتیجه گیری و دورنمای توسعه آلیاژهای حافظه دار                |
| ۳۰۱ | مراجع و منابع                                                      |
| ۳۰۳ | ضمیمه                                                              |
| ۳۰۵ | فهرست راهنما                                                       |
| ۳۱۱ | واژه نامه فارسی-انگلیسی                                            |