

اصول و کاربرد

عملیات حرارتی

فولادها (ویرایش دوم)

پدیدآورنده:

محمدعلی گل‌عذار

استاد دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه صنعتی اصفهان



دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

شماره کتاب ۲

گروه فنی و مهندسی ۱

اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها (ویرایش دوم)

تألیف.....	دکتر محمدعلی گلگذار
حروف چین.....	محمدرضا ایزدخواستی
صفحه آرا.....	فرزانه قدیمی
ویراستار.....	آتوسا سعادت
ناشر.....	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
لیتوگرافی، چاپ و صحافی.....	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ شانزدهم.....	بهار ۱۳۹۴
شمارگان.....	جلد ۳۰۰۰
شابک.....	۹۷۸-۹۶۴-۶۰۲۹-۷۳-۶
قیمت.....	۱۵۸۰۰۰ ریال

سرشناسه	گلگذار، محمدعلی، ۱۳۲۹ -
عنوان و نام پدیدآور	اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها/ تألیف محمدعلی گلگذار.
وضعیت ویراست	ویراست دوم.
مشخصات نشر	اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	چهارده، ۵۱۰ ص. مصور، جدول، نمودار.
فروست	دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر؛ ۲ گروه فنی و مهندسی، ۱
شابک	۹۶۴-۹۷۸-۷۳-۶۰۲۹-۶
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	ص.ع. به انگلیسی: M.A. Golozar, Principles & Applications of Heat Treatment Steels
یادداشت	چاپ پانزدهم.
یادداشت	فروست چاپ قبلی: دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر؛ ۲ گروه فنی و مهندسی، ۳۷
یادداشت	واژه نامه.
یادداشت	کتابنامه.
یادداشت	نماینه.
موضوع	فولاد - عملیات حرارتی
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر
رده بندی کنگره	۱۳۹۱ : الف ۵۱۷/۸۸ TNV
رده بندی دیویی	۶۷۲/۳۶
شماره کتابشناسی ملی	۲۷۴۲۸۸۰

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - مرکز نشر - کدپستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ تلفن: ۱۰-۳۳۹۱۲۵۰۹ (۰۳۱)۳۳۹۱۲۵۵۲ دورنگار: (۰۳۱)۳۳۹۱۲۵۵۲
برای خرید اینترنتی کلیه کتابهای منتشره مرکز نشر می‌توانید به وبگاه <http://publication.iut.ac.ir> مراجعه و یا مستقیماً از کتابفروشی مرکز نشر واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۲۹۵۲) خریداری فرمائید.

به نام آینده جان را فطرت آموخت

گزیده‌ای از پیشگفتار چاپ ۱۳۷۶

قبل از ظهور مثال بری به عنوان یک علم، بسیاری از عملیات مربوط به سخت کردن فولادها، افزایش قابلیت شکل پذیری آنها و یا عملیات مشابه دیگر، در پرده‌ای از ابهام و اسرار نهفته بود. به بیان دیگر، تبدیل یک قطعه آهن نرم و انعطاف پذیر به یک ابزار و یا اسلحه فلزی مقاوم، سخت و برنده نظیر شمشیر، خنجر و یا چاقو، اساس و راز صنعتگران به حساب می‌آمد و هیچگونه علم و دانشی برای روشن کردن این مگونگی این تغییر حالتها وجود نداشت. به عنوان مثال، برای مدت‌ها تصور می‌شد که، تغییرات بسیار بالای فولادهای ساخته شده توسط صنعتگران شقیلید در انگلستان، ناشی از خواص سحرآمیز آب این شهر است. در همین رابطه، گفته شده است که زمانی یک تاجر از ایالت یورک در انگلستان، مقدار بسیار زیادی از آب شهر شقیلید را به قیمت گزافی به ژاپن صادر نمود.

در گزارشها آمده است که در زمان بسیار قدیم، صنعتگران دهمشق برای سخت کردن شمشیرهای فولادی، آنها را ابتدا حرارت داده، کاملاً داغ کرد و سپس در شکم برده‌های اسیر شده فرو برده، به شدت حرکت داده و می‌چرخاندند. از جمله عوامل مؤثر در سخت شدن فولاد در این روش وحشتناک عملیات حرارتی، می‌تواند جذب نیتروژن غریب باشد. در یادداشت‌های مربوط به تاریخچه عملیات حرارتی آمده است که جیمز باوی^۱ سازنده اصلی چاقوی باوی^۲ در دوران غرب وحشی به منظور سخت کردن چاقوهای خود آنها را پس از حرارت دادن و سرخ شدن، نه مرتبه پشت سرهم در روغن پلنگ فرو می‌برده است.

گرچه از زمان باستان، عملیات حرارتی به عنوان یکی از مهمترین مراحل تولید ابزارهای فولادی (به‌طور کلی فلزی) استفاده می‌شده است، ولی ظهور آن به عنوان یک علم به اواسط قرن نوزدهم بر می‌گردد. تا آن زمان، دانش بشر در زمینه عملیات حرارتی به مجموعه‌هایی از

۱- James Bowie

۲- Bowie Knife

دستورالعملهای به دست آمده از قرنهای متوالی تجربه منحصر می شود. این دستورالعملها که اغلب ارزش بسیار زیادی داشته، از پدر به پسر به ارث می رسند. در این میان، بسیاری از اسرار گم شده و دو مرتبه کشف می شود، ولی طبیعت و ماهیت واقعی عملیات حرارتی همچنان در پرده ابهام باقی بود.

در قرن نوزدهم، با پیشرفت سریع علم، عملیات حرارتی نیز به جرگه علوم پیوست، جهش اولیه و ناگهانی که در این زمینه به وقوع پیوست، ناشی از مطالعات انجام شده توسط میکروسکوپ نوری بود. در این زمان با تغییراتی که در میکروسکوپ نوری داده شد، "تکنیک متالوگرافی" برای مشاهده و مطالعه ساختار فلزات و آلیاژها ارائه شد. این تکنیک که شامل پولیش و حکاکی با محلول شیمیایی مناسب و مشاهده ساختار سطح نمونه توسط میکروسکوپ نوری است، هنوز هم یکی از مهمترین ابزارهای دانشمندان متالورژی برای مطالعه رتین میکروساختار فلزات و آلیاژها محسوب می شود.

پیشرفتهای وسیع نظریه های عملیات حرارتی پس از سالهای ۱۹۲۰، مدیون دستگاه آنالیزکننده با پرتی ایکس^۱ است. به کمک این دستگاه مطالعات عمیق در رابطه با طبیعت، مکانیزم و سینتیک برگردانی حالت جامد انجام شد. در مدت دو یا سه دهه، اطلاعات بسیار و جامعی در رابطه با قوانین ذاتی حرارتی بر روی میکروساختار و خواص فلزات و آلیاژها به دست آمد. در اواخر سالهای ۱۹۵۰ میکروسکوپیهای الکترونی از نوع عبوری^۲ برای مطالعه تغییرات میکروساختار درونی در عملیات حرارتی و سپس تکنیکهای جدید به منظور آنالیز در مقیاس میکروسکوپی^۳ نظیر استفاده از میکروسکوپیهای اویژه^۴ به طور وسیعی به کار گرفته شدند.

در مرحله جدید مطالعات، اثرات و نقش معایب شکستگیهای بلوری در فلزات بر روی چگونگی تغییرات میکروساختار درونی در اثر عملیات حرارتی مختلف بررسی شد. اهمیت این امر با توجه به این نکته مشخص می شود که، در بسیاری از موارد معایب بلوری اثرات بسیار شدید و حتی در برخی موارد اثرات تعیین کننده ای بر روی مکانیزم تغییرات ساختار و در نتیجه تغییرات خواص در ضمن عملیات حرارتی دارند.

ارائه نظریه های جدید، بسط و گسترش آنها، بهبود روشهای عملیات حرارتی - ایمنی موجود و ارائه روشهای نوین نظیر عملیات حرارتی - شیمیایی (ترموشیمی)^۵ و بالاخره به کارگیری روشهای جدید نظیر القای یونی^۶ به منظور سخت کردن سطحی، موجب گسترش هرچه وسیعتر گستره عملیات حرارتی در دهه اخیر شده است.

نظر به اینکه، هدف از تدوین این کتاب، تهیه مجموعه ای مفید و قابل استفاده برای

۱- X-ray analyser

۲- Transmission electron microscopy

۳- Microanalysis

۴- Auger electron microscopy

۵- Thermochemical

۶- Ion implantation

دانشجویان، مهندسان و متخصصان متالورژی، به ویژه عملیات حرارتی بوده است، سعی شده که در هر مورد، هم جنبه‌های نظری بحث شده و هم زمینه‌های کاربردی آن توضیح داده شود. گرچه سعی زیادی مبذول شده است که از به کارگیری واژه‌های جدید فارسی خودداری شده و به هنگام لزوم از بین واژه‌های موجود مصطلح‌ترین آنها انتخاب شود، به علاوه معادل انگلیسی مربوط به هر واژه که برای اولین بار استفاده شده به صورت زیرنویس آورده شود، اما به منظور توضیح بیشتر و همچنین سهولت در امر یافتن معادل انگلیسی مربوط به واژه خاص و برعکس، در پایان کتاب "فرهنگ واژه‌های علمی" که شامل دو بخش یکی واژه‌نامه انگلیسی - فارسی و دیگری فارسی - انگلیسی است نیز اضافه شده است.

روش انتخاب شده در تهیه و تدوین این کتاب، براساس مطالعه و بررسی ارتباط بین عملیات حرارتی اعمال شده، میکروساختار حاصل و خواص مکانیکی به دست آمده است. در حقیقت همین ارتباط است که مهمترین نقش را در بسیاری از فرایندهای مختلف عملیات حرارتی دارد. در این رابطه، تاکید اصلی بر روی میکروساختار و چگونگی تغییرات آن گذاشته شده است، زیرا، می‌تواند اهمیت و نقش بسیار زیاد، این نکته در بسیاری از کتابهای عملیات حرارتی که به فارسی ترجمه شده، آموزش شده است.

محمدعلی گل‌نزار

دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

فروردین ۱۳۶۷

به نام خداوند جان آفرین

حکیم سفر در زبان آفرین

پیشگفتار چاپ ۱۳۷۸

پروردگار تو را شاکرم و از تو سپاسگزارم که این فرصت را به من دادی تا اینکه بتوانم مطالب ارائه شده در کتاب "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها" که در سال ۱۳۶۷ به چاپ رسیده بود را امروز به مرتبه مرور کامل، ویرایش و تجدیدنظر کرده و با اصلاحات و اضافه کردن مطالب جدید مورد نیاز دانشجویان، مهندسان، صنعت‌گران، متخصصان صنایع و علاقه‌مندان به علم متالورژی و ویژه عملیات حرارتی به صورت کتاب حاضر و تحت عنوان "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها" تهیه و تدوین کنم.

پس از گذشته ده سال از انتشار چاپ اول این کتاب، با توجه به تغییرات به وجود آمده در سرفصلهای برخی از کتابهای درسی، رشته‌های علمی مواد و متالورژی، ادغام برخی از دروس، ارائه دروس با سرفصلهای جدید، و همچنین نیاز دانشجویان و صنایع به مطالبی علاوه بر آنچه در چاپ ۱۳۶۷ این کتاب منتشر شده بود، تصمیم گرفتم که در مطالب کتاب مزبور تجدید نظر به عمل آید.

چاپ ۱۳۶۷ این کتاب که مشتمل بر عملیات حرارتی فولادها، عمدتاً کربنی ساده و چدن‌ها بود، براساس نیازهایی که در آن تاریخ احساس می‌شد و با توجه به سرفصلهای دروسی مانند عملیات حرارتی و متالورژی فیزیکی چدن و فولاد تهیه و تدوین شد بود. کتاب مزبور، شامل مجموعه‌ای از مطالب آموزشی، پژوهشی و تحقیقاتی گردآوری شده بود. به سبب انجانب در حد فاصل سالهای ۱۳۶۰ تا ۱۳۶۷ بود. در آن زمان تصمیم بر آن بود که با توجه به گستردگی موضوع عملیات سطحی و نیاز صنعت به این شاخه از علم عملیات حرارتی، این بخش به صورت جداگانه تهیه و تدوین شود. گرچه به علت مشغله‌های گوناگون، این امر در زمان در نظر گرفته شده برای آن به تحقق نپیوست، اما خوشبختانه به لطف و یاری پروردگار بزرگ، ترغیب و تشویق همکاران، دانشجویان و علاقه‌مندان به این زمینه، کمک و یاری دوستان و همت والای مسئولان محترم نشر ارکان اصفهان، توانستم بالاخره مطالب مورد نظر در این رابطه را در کتابی تحت عنوان "عملیات حرارتی و مهندسی سطح" منتشر کنم. مطالب مورد بحث در این کتاب که تقریباً تمامی فرایندهای متداول و مرسوم مانند کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، سخت کردن شعله‌ای ... و همچنین فرایندهای نوین مانند کاشت یون، رسوب شیمیایی بخار، رسوب فیزیکی بخار،

استفاده از پرتوهای یونی، الکترونی و لیزر و ... را می‌پوشاند، براساس بخشهایی از سرفصلهای ارائه شده، در دروس مهندسی سطح، مهندسی سطح پیشرفته، پوشش‌دهی و همچنین نیازهای صنعت تهیه و تدوین شده است.

با توجه به انتشار کتاب "عملیات حرارتی و مهندس سطح" و به منظور اجتناب از تکرار در تهیه و تدوین این کتاب فصل اختصاص یافته به فرایندهای سطحی (فصل ۱۰) به طور خلاصه تهیه شده و برای اطلاعات بیشتر و گسترده‌تر به کتاب مزبور ارجاع داده شده است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه امید است در آینده‌ای نزدیک مجموعه‌ای تحت عنوان "عملیات حرارتی چدن‌ها" تهیه و تدوین شود، فصل چدن‌ها نیز از کتاب حاضر حذف شده است. در حقیقت، این کتاب صرفاً به "عملیات حرارتی فولادها" اختصاص داده شده است.

در چاپ جدید و تجدید نظر شده که تحت عنوان "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها" از سال ۱۳۷۸ به چاپ رسیده است، دو فصل جدید به چاپ قدیمی آن اضافه شده است. این دو فصل شامل عملیات حرارتی فولادهای زنگ نزن (فصل ۱۱) و عملیات حرارتی فولادهای ابزار (فصل ۱۲) است. همچنین بر حسب نیاز، برخی از فصلها گسترش یافته و مطالبی جدید به آنها اضافه شده است. به عنوان مثال در فصل سوالاتی از مطالب ارائه شده در آن فصل آورده شده است. همچنین به منظور - ردآزایی بیشتر خوانندگان گرامی، در پایان کتاب تعداد ۸۰ سوال و مسئله برگزیده از متن مربوط به فصل‌های مختلف آورده شده است.

مشابه با چاپ قبلی، در کتاب حاضر نیز تکیه بر جنبه‌های میکروساختاری و اثرات آن بر خواص و رفتار فولادها در ضمن فرایندهای مختلف عملیات حرارتی گذاشته شده است. اما در تجدید نظر، بسیاری از جنبه‌های آلیاژی، فرایندی، میکروساختاری گسترده‌تر از آنچه مربوط به فولادهای کربنی ساده است و در چاپ قبلی ارائه شده بود ارائه گردید. در این راستا، سعی شده است از نمودارهای تعادلی و نمودارهای زمان - دما - گرگ‌نی همراه با تصاویر میکروسکوپی متعدد و مناسب کمک گرفته شود.

امید است همچون چاپ قبلی، کتاب حاضر نیز بتواند نیازهای دانشجویان، مهندسان، متخصصان و دیگر علاقه‌مندان به علم عملیات حرارتی را مرتفع ساخته و مورد پذیرش آنها قرار گیرد، زیرا این امر، هدف اصلی از تجدید نظر کتاب قبلی و انتشار مجموعه جدید است. در اینجا از مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان به خاطر فراهم کردن امکان دید نظر و انتشار این کتاب سپاسگزاری می‌شود. از سرکار خانم فرزانه قدمی به خاطر تایپ صفحه‌آرایی کتاب قدردانی می‌شود. همچنین از کلیه همکاران و افرادی که به نحوی از انحاء، اینجانب را در تهیه، تدوین و انتشار این کتاب کمک و یاری کردند، به ویژه آقای مهندس رضا آفاتقی به خاطر بازخوانی و تطابق متن با دست‌نویس، صمیمانه تشکر می‌شود.

از تمامی عزیزانی که ضمن مطالعه این کتاب، اشکالات آن را استخراج کرده و برای تصحیح در چاپهای بعدی به اینجانب منعکس نمایند، پیشاپیش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

محمدعلی گل‌عذار

دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

بهمن‌ماه ۱۳۷۸

فهرست مطالب

فصل اول: فازها و ساختارهای بلوری

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	نمودار تعادلی آهن - کربن	۵
۱-۲-۱	ساختارهای بلوری و خواص آهن خالص	۷
۷	الف: آهن آلفا	۷
۸	ب: آهن گاما	۸
۹	ج: آهن دلتا	۹
۱۰	۲-۲-۱ اثر کربن	۱۰
۱۰	الف: آستنیت	۱۰
۱۱	ب: فریت	۱۱
۱۴	ج: فریت دلتا	۱۴
۱۴	۳-۲-۱ کاربید آهن (سمنتیت)	۱۴
۱۵	۴-۲-۱ دماهای بحرانی	۱۵
۱۸	۳-۱ توزیع و اثرات عناصر آلیاژی در فولادها	۱۸
۲۷	۱-۳-۱ فاز کاربید در فولادهای آلیاژی	۲۷
۳۱	۲-۳-۱ اثرات عناصر آلیاژی بر روی فریت	۳۱
۳۳	تمرین	۳۳

فصل دوم: فازها و ساختارهای تعادلی

۳۵	۱-۲ مقدمه
۳۵	۲-۲ دگرگونی یوتکتویدی
۳۷	۳-۲ ساختار پرلیت
۳۹	۴-۲ تشکیل پرلیت
۴۲	۵-۲ اثر دما بر دگرگونی پرلیتی
۴۷	۶-۲ فازهای پرویوتکتوید
۵۱	۷-۲ تشکیل فازهای پرویوتکتوید
۵۴	۸-۲ تشکیل پرلیت در فولادهای حاوی عناصر آلیاژی
۵۵	تمرین

فصل سوم: مارتنزیت

۵۷	۱-۳ مقدمه
۵۷	۲-۳ مارتنزیت و دگرگونی مارتنزیتی
۶۲	۳-۳ سینتیک تشکیل مارتنزیت
۶۷	۴-۳ شکل‌های مختلف مارتنزیت در فولادها
۶۸	۱-۴-۳ مارتنزیت بشقابی
۷۰	۲-۴-۳ مارتنزیت لایه‌ای
۷۱	۳-۴-۳ مخلوط مارتنزیت‌های بشقابی و لایه‌ای (مارتنزیت مختلط)
۷۲	۵-۳ بینیت و دگرگونی بینیتی
۷۴	۱-۵-۳ بینیت بالایی
۷۶	۲-۵-۳ بینیت پایینی
۷۸	۶-۳ بلورشناسی دگرگونی مارتنزیتی
۸۲	تمرین

فصل چهارم: نمودارهای زمان - دما - دگرگونی

۸۳	۱-۴ مقدمه
۸۳	۲-۴ نمودارهای دگرگونی همدم (IT)
۸۷	۳-۴ اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی همدم
۸۸	۴-۴ نمودارهای دگرگونی در ضمن سرد کردن پیوسته - (CT)
۹۲	۵-۴ اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی غیرهمدم (سرد شدن پیوسته)
۹۳	۶-۴ نمودارهای TTT برای فولادهای کربنی ساده غیر یوتکتویدی

۷-۴	نمودارهای TTT مربوط به فولادهای آلیاژی	۹۵
۸-۴	نمودارهای دگرگونی در سرد شدن پیوسته و قطر میل	۹۸
۱۰۰	تمرین	

فصل پنجم: عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی

۱-۵	مقدمه	۱۰۳
۲-۵	همگن کردن (یکنواخت کردن)	۱۰۳
۳-۵	آنیل کردن	۱۰۴
۱-۳-۵	آنیل کامل	۱۰۵
۲-۳-۵	آنیل ملدما	۱۰۸
۴-۵	باله کردن	۱۰۸
۵-۵	کروی کردن	۱۱۱
۶-۵	بازیابی و تبلور مجدد	۱۱۵
۱-۶-۵	بازیابی	۱۱۵
۲-۶-۵	تبلور مجدد	۱۱۷
۷-۵	تنش گیری	۱۲۱
۸-۵	خواص مکانیکی میکروساختارها تعادلی	۱۲۲
۹-۵	ورقهای فولادی سرد نوردیده و آنیل شده	۱۳۰
۱۰-۵	پیرکرنشی و پیرسرمایی	۱۳۵
۱۱-۵	فولادهای میکروآلیاژی، میل گرد و آهنکری	۱۴۰
۱۴۳	تمرین	

فصل ششم: سختی و سختی پذیری

۱-۶	مقدمه	۱۴۵
۲-۶	سختی و درصد کربن	۱۴۵
۳-۶	استحکام مارتنزیت	۱۴۹
۴-۶	سختی پذیری	۱۵۲
۱-۴-۶	توزیع سختی در یک قطعه	۱۵۲
۲-۴-۶	پارامترهای مؤثر بر روی سختی پذیری	۱۵۵
۱-۵	اندازه دانه های آستنیت	۱۵۵
۲-۵	درصد کربن	۱۵۷
۳-۵	عناصر آلیاژی	۱۵۷

۱۵۹	۴- آخال ناخالصیهای نافلزی
۱۶۰	۵- همگن بودن میکروساختار
۱۶۰	۶-۴-۳ آهنگ سرد شدن و پارامترهای مؤثر بر آن
۱۶۴	۶-۴-۴ شدت سردکنندگی محیط
۱۶۶	۶-۴-۵ کمیت سختی پذیری
۱۷۰	۶-۵ محاسبه قطر ایده آل و مطالعه سختی پذیری
۱۷۱	۶-۵-۱ محاسبه قطر ایده آل با استفاده از ترکیب شیمیایی
۱۷۴	۶-۵-۲ محاسبه قطر ایده آل به روش گراسمن
۱۷۴	۶-۵-۳ آزمایش جامینی برای تعیین سختی پذیری
۱۷۷	۶-۶ کاربرد نتایج حاصل از آزمایش جامینی
۱۸۵	تمرین

فصل هشتم: آستنیت فولادها

۱۸۷	۷-۱ مقدمه
۱۸۷	۷-۲ نقش آستنیت در خواص مکانیکی فولادها
۱۹۰	۷-۳ تشکیل آستنیت
۱۹۷	۷-۴ اندازه دانه آستنیت
۲۰۲	۷-۵ کنترل اندازه دانه های آستنیت
۲۰۶	تمرین

فصل هشتم: بازپخت

۲۰۷	۸-۱ مقدمه
۲۰۷	۸-۲ تغییرات میکروساختار
۲۱۵	۸-۳ تغییرات خواص مکانیکی
۲۲۳	۸-۴ اثرات عناصر آلیاژی
۲۳۲	۸-۵ نقش آستنیت باقیمانده
۲۳۵	۸-۶ ارتباط دما و زمان بازپخت
۲۳۵	۸-۷ پدیده تردی
۲۳۷	الف) تردی مارتنزیت بازپخت شده (TME)
۲۴۰	ب) تردی بازپختی (TE)
۲۴۲	ج) تردی نیتريد آلومینیم
۲۴۲	د) تردی فلز مایع (LME)

۲۴۴	ه) تردی هیدروژنی (HE)
۲۴۶	و) بیش گرمایش قطعات آهنگری
۲۴۷	تمرین

فصل نهم: تغییرات ابعاد و اثرات آن

۲۴۹	۱-۹ مقدمه
۲۴۹	۲-۹ تغییرات ابعاد
۲۵۰	۱-۲-۹ تغییرات ابعاد در گرم و سرد شدن تعادلی
۲۵۱	۲-۲-۹ تغییرات ابعاد در ضمن سریع سرد شدن
۲۵۲	۳-۲-۹ تغییرات ابعاد در ضمن بازبخت
۲۵۳	۳-۹ اثرات ناشی از تغییرات ابعاد در ضمن سرد کردن
۲۵۴	۱-۳-۹ تنشهای اولیه -حاله ای ناشی از تجزیه آستنیت
۲۵۵	۲-۳-۹ تنشهای حواشی در ضمن سردشدن
۲۵۸	۴-۹ چگونگی توزیع و اثرات تنشهای باقیمانده در ضمن سرد شدن
۲۵۸	۱-۴-۹ توزیع و اثرات، تنشهای باقیمانده در سخت شدن سرتاسری
۲۶۱	۲-۴-۹ توزیع و اثرات تنشهای باقیمانده در سخت شدن پوسته ای
۲۶۳	۵-۹ تنشهای حاصل در ضمن گرم شدن
	۶-۹ راههای جلوگیری از تغییر شکل، ترک برداشتن و یا ایجاد تنشهای داخلی
۲۶۴	در ضمن عملیات حرارتی
۲۶۴	۱-۶-۹ کنترل آهنگ گرم کردن
۲۶۶	۲-۶-۹ روشهای سرد کردن کنترل شده
۲۶۸	الف: مارتمپرینگ
۲۷۱	ب: آستمپرینگ
۲۷۳	۳-۶-۹ عملیات حرارتی - مکانیکی (ترمو مکانیکال)
۲۷۷	۴-۶-۹ عملیات حرارتی بین دماهای بحرانی
۲۸۲	تمرین

فصل دهم: سخت کردن سطحی

۲۸۳	۱-۱۰ مقدمه
۲۸۴	۲-۱۰ کربن دهی
۲۸۶	۱-۲-۱۰ کربن دهی پودری (جامد)
۲۹۰	۲-۲-۱۰ کربن دهی مایع

۲۹۱	۱۰-۲-۳ کربن‌دهی گازی
۲۹۳	۱۰-۳ نیتروژن‌دهی
۲۹۷	۱۰-۴ کربن - نیتروژن‌دهی
۲۹۷	۱۰-۵ نیتروژن - کربن‌دهی
۲۹۹	۱۰-۶ سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی
۲۹۹	۱۰-۶-۱ سخت کردن شعله‌ای
۳۰۳	۱۰-۶-۲ سخت کردن القایی
۳۰۵	۱۰-۷ فرایندهای دیگر
۳۰۶	۱۰-۱-۱ بوردهی
۳۰۷	۱۰-۷-۲ فرایندهای نفوذی جانشینی
۳۰۸	۱۰-۶-۳ روشهای نوین سخت کردن سطحی
۳۰۸	الف) عملیات حرارتی سطحی به کمک لیزر
۳۰۹	ب) سخت کردن تر - لپرتوی الکترونی
۳۰۹	ج) عملیات حرارتی سطحی به روش کاشت یون
۳۱۱	تمرین

فصل یازدهم: فولادهای زنگ نزن

۳۱۳	۱۱-۱ مقدمه
۳۱۳	۱۱-۲ نمودارهای تعادلی
۳۲۱	۱۱-۳ فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۳۲۴	الف) کاربردهای بین‌دانه‌ای در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۳۲۷	ب) تشکیل مارتنزیت در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۳۳۱	ج) فازهای دیگر در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۳۳۳	د) فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دیگر
۳۳۵	ه) عملیات حرارتی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۳۳۵	۱۱-۴ فولادهای زنگ‌نزن فریتی
۳۳۸	الف) فازهای بین‌فلزی در فولادهای زنگ‌نزن فریتی
۳۴۱	ب) تردی ۴۷۵ درجه سانتیگراد در فولادهای زنگ‌نزن فریتی
۳۴۳	۱۱-۵ فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی
۳۴۸	۱۱-۶ فولادهای زنگ‌نزن رسوب سختی
۳۵۳	۱۱-۷ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی
۳۵۷	تمرین

فصل دوازدهم: فولادهای ابزار

۳۵۹	۱-۱۲	مقدمه
۳۵۹	۲-۱۲	طبقه‌بندی فولادهای ابزار
۳۶۵	۳-۱۲	طراحی فولاد ابزار آلیاژی
۳۷۰	۴-۱۲	فرایندهای اولیه فولادهای ابزار
۳۷۴	۵-۱۲	آنیل کردن فولادهای ابزار
۳۷۵	۶-۱۲	تنشگیری فولادهای ابزار
۳۷۵	۷-۱۲	سخت کردن فولادهای ابزار
۳۷۶	۸-۱۲	پیشگرم و آستنیت‌کردن
۳۷۸	۹-۱۲	سختی پذیری و تشکیل مارتنزیت
۳۸۱	۱۰-۱۲	سختکاری کاربرد در مرز دانه‌ها
۳۸۲	۱۱-۱۲	بازپخت فولادهای ابزار
۳۸۶	۱۲-۱۲	دگرگونی استنیت، قیسمانده و بازپخت دومرحله‌ای در فولادهای ابزار
۳۸۶		تمرین

فصل سیزدهم: نکات عملی و کارآردی

۳۸۹	۱-۱۳	مقدمه
۳۸۹	۲-۱۳	محیطهای گرم‌کننده در عملیات حرارتی
۳۹۰		الف) کوره‌های حمام نمک
۳۹۲		ب) کوره‌های موفلی برقی
۳۹۳		ج) کوره‌ها با محیطهای کنترل شده
۳۹۸		د) کوره‌های خلأ
۳۹۹		ه) کوره‌های موفلی شعله‌ای (سوخت مایع و یا گاز)
۴۰۰	۳-۱۳	آهنگ گرم کردن
۴۰۳	۴-۱۳	دمای آستنیت‌کردن برای سخت کردن: دمای سخت کردن
۴۰۶	۵-۱۳	زمان نگهداری در دمای سخت کردن
۴۰۷		الف) فولادهای ساختمانی کم‌آلیاژ و کربنی ساده
۴۰۷		ب) فولادهای ساختمانی یا آلیاژ متوسط
۴۰۷		ج) فولادهای ابزار کم‌آلیاژ
۴۰۸		د) فولادهای پرآلیاژ کرم‌دار
۴۰۹		ه) فولادهای گرم‌کار
۴۰۹		و) فولادهای تندبر

۴۱۰	۶-۱۳	زمان گرم کردن و زمان نگهداری در دمای سخت کردن
۴۱۱	۷-۱۳	محیطهای سردکننده
۴۱۱		الف) آب
۴۱۳		ب) روغن
۴۱۵		ج) محلول آب و روغن
۴۱۶		د) آب با اضافات مخصوص
۴۱۸		ه) هوا
۴۲۰		و) حمامهای نمک
۴۲۲	۸-۱۳	مشخصات محیطهای سرد (سخت) کننده
۴۲۲		الف) کنترل دما
۴۲۲		ب) مزدن محیط - ایجاد تلاطم در محیط
۴۲۵		تمرین

فصل چهاردهم: تجربیات حرارتی فولادها

۴۲۷	۱-۱۴	مقدمه
۴۲۸	۲-۱۴	ترک خوردن
۴۳۰	۳-۱۴	تغییر شکل و یا تاب برداشتن
۴۳۲	۴-۱۴	نواحی پراکنده نرم
۴۳۲	۵-۱۴	سختی کم پس از سریع سرد شدن
۴۳۳	۶-۱۴	مثالهایی از عیوب ناشی از عملیات حرارتی
۴۴۰	۷-۱۴	ترک برداشتن در ضمن سریع سرد شدن
۴۴۱	۸-۱۴	انهدام ناشی از آستینته کردن در دمای نسبتاً بالا
۴۴۴	۹-۱۴	ترک برداشتن ناشی از افزایش کرنش سطح
۴۴۹	۱۰-۱۴	شکسته شدن ناشی از کاهش کرنش سطح
۴۵۲	۱۱-۱۴	سوختن یا ذوب موضعی ناشی از دمای بالا
۴۵۲	۱۲-۱۴	شکست ترد ناشی از سخت کردن مجدد فولادهای تندبر
۴۵۵		تمرین
۴۵۷		پیوست ۱: جدول مشخصات فولادها
۴۶۳		پیوست ۲: سؤالات و مسئله‌های اضافی
۴۷۳		منابع و مراجع
۴۷۷		واژه‌نامه انگلیسی - فارسی
۴۸۹		واژه‌نامه فارسی - انگلیسی
۵۰۱		واژه‌یاب