

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مقدمه‌ای بر

اکسیداسیون دما بالای فلزات

مؤلفین :

نیل برکس - جرالد مایر - فرد پتیت

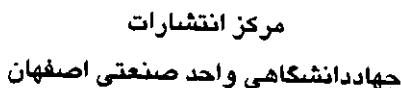
مترجمین :

دکتر مسعود عطاپور

استادیار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندس میثم جلالی

دانشجوی دوره دکتری دانشکده مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت ایران



واحد صنعتی اصفهان

سرسنانه	برکس، آن.	Birks, N
عنوان و نام پدیدآور	مقدمه‌ای بر اکسیداسیون دما بالای فلزات/ مؤلفین نیل برکس، جerald مایر، فرد پتیت؛ مترجمین مسعود عطاپور، میثم جلالی.	
مشخصات نشر	اصفهان: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۹۲.	
مشخصات ظاهری	۱۳ص: مصور، جدول، نمودار.	
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۱۵۱-۵۳-۱	
وضعیت فهرست نویسی	فیا	
یادداشت	عنوان اصلی: Introduction to the high-temperature oxidation of metals, 2nd. ed, 2006.	
یادداشت	واژه نامه.	
یادداشت	کتابنامه.	
یادداشت	نمایه.	
موضوع	فلزها — اثر دما	
موضوع	اکسیدهای فلزی	
شناسه افزوده	مایر، جی. اچ.	
شناسه افزوده	G. H. Meier	
شناسه افزوده	پتیت، فردریک اس.، ۱۹۳۰ - م.	
شناسه افزوده	(Frederick S.) Pettit, F. S.	
شناسه افزوده	عطاپور، مسعود، ۱۳۵۸ - مترجم	
شناسه افزوده	جلالی، میثم، ۱۳۶۲ -، مترجم	
شناسه افزوده	جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان	
رده بندی کنگره	۶۲۰/۱۶۱۷	QD ۵۰۱/۶۱۷
رده بندی دیویی	۶۲۰/۱۶۱۷	۶۲۰/۱۶۱۷
شماره کتابشناسی ملی	۳۱۸۸۷۹۷	

شماره کتابشناسی ملی :	۱۳۸۷۹۷
نام کتاب	مقدمه‌ای بر اکسیداسیون دما بالای فلزات
تألیف	نیل برکس، جرالد مایر، فرد پتیت
ترجمه	دکتر مسعود عطاپور، مهندس میثم جلالی
ارزیاب علمی	مهندس محمود فرازپی
ناشر	جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان - مرکز انتشارات
نوبت چاپ	اول
تاریخ نشر	۱۳۹۲
شمارگان	۵۰۰ جلد
تعداد صفحات	۵۱۳
قیمت	۱۹۵۰۰۰ ریال
مدیر تولید	غلامرضا قجاوند
ناظر فنی	محمد احمدی
صفحه‌آرایی	طلاهره رشیدی
طراح جلد	محمدعلی نریمانی
نقوشگرافی	پارسا
چاپ	پرنو
صحافی	سید
«تغییر قیمت کتاب بدون اجازه کتبی ناشر، مجاز نمی‌باشد.»	

مطالعه کتاب به عهده مترجمین بوده و ناشر مسئولیتی در این موضوع ندارد.

حق چاپ برای ناشر محفوظ است، تکثیر این کتاب یا بخشی از آن به هر شکل، شرعاً و قانوناً ممنوع بوده و دارای

پیکر کا قانونی استنباط

فره‌شگاه : ۳۹۱۲۵۹۴

۳۹۱۲۵۴۱ : ننگار

www.isba.ir : گاه

www.jdlut.ac.ir : گاه

نشانی الکترونیکی: sec.iut@nccer.ac.ir

شماره ۱۰ - شماره مسلسل ۵۰۱۱۱۱۱۱۱۱ (اصفهان - پانزدهمین صنعتی - اصفهان - تلفن: ۲۹۱۲۵۹۴)

مرکز پخش: ۱- کتابفروشی جهاندانشگاهی (اصفهان) - دانشگاه صنعتی اصفهان - شعبه ۳۰۱۱۵۴
 ۲- نمایشگاه کتاب جهاندانشگاهی (تهران) - خیابان انقلاب اسلامی - بین خیابان قسطنطین و چهارراه ولی عصر (عج) - جنب مؤسسه
 نمایشگاههای فرهنگی ایران تلفن: ۶۱۶۸۷۸۶۳ - ۳- علم گستر سپاهان (اصفهان) - خیابان آمانگاه - کوچه فتح آباد - پلاک ۹۰
 ۴- چاپخانه های فرهنگستان (اصفهان) - خیابان آمانگاه - کوچه فتح آباد - پلاک ۹۰
 ۵- چاپخانه های فرهنگستان (اصفهان) - خیابان آمانگاه - کوچه فتح آباد - پلاک ۹۰
 ۶- چاپخانه های فرهنگستان (اصفهان) - خیابان آمانگاه - کوچه فتح آباد - پلاک ۹۰
 ۷- چاپخانه های فرهنگستان (اصفهان) - خیابان آمانگاه - کوچه فتح آباد - پلاک ۹۰

شماره تماس برای خرید تلفنی کتاب از سرانسر کشور: ۳۹۱۲۵۹۴-۳۱۱

بسم الله الرحمن الرحيم

سخن ناشر

جای خرسندی و شکر بسیار است که در آستانه تابش پرتوهای حیات بخش اسلام بر پهنه زمین، خود را در زمانی می یابیم که اندیشه اصلاح نه تنها عث نیست که پیمودن راههای کمال و رشد در هر بعدی از ابعاد انسانی هموارتر و شدنی تر می نماید. وظیفه آنان که در این دوره و در این سرزمین مقدس زندگی می کنند مس سنگین و دشوار است و بطور خاص مسئولیت دانشگاه و دانشگاهیان در کنار حوزه های مقدس علمیه جایگاهی حساس و تعیین کننده در روند حرکت اجتماع دارد. تلاش پیگیر و همه جانبه برای بریدن بندهای وابستگی، جهاد مقدسی است که باید از دانشگاه و حوزه شروع شود و انتشار کتب علمی از سوی ما کوششی است در راستای آنچه ذکر آن رفت. بدیهی است این کوشش زمانی به نتایج مفید می رسد که بطور مداوم از سوی استادان، دانشگاهیان و اندیشمندان متعهد مورد انتقاد و پیشنهادات سازنده قرار گیرد.

اینک که چاپ اول این کتاب تقدیم دانشگاهیان ارجمنند و مشتاق علم می گردد جای دارد از تمامی عزیزانی که در آماده سازی و تدوین آن تلاش نموده و زحمات زیادی را متحمل شده اند تشکر و قدردانی بعمل آید.

مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی

واحد صنعتی اصفهان

بِسْمِ تَعَالٰی

تقدیم به آنان که فریفته دنیا نشده، دل از آلودگی به دور داشته، شوق لقای محبوب در دل نشانده، در راه وی مجاهدت کرده و «عِنْدَ رَبِّهِمْ يُرْزَقُونَ» گشتند. مترجمین، این کتاب را به شهیدان عرصه علم و فناوری تقدیم می‌دارند که به درستی، علم نافع را تعریف نموده و مصادیقی روشن از مجاهدان و مبارزان سبیل الهی را به تصویر کشیدند.



پیشگفتار مؤلفان

فلزات بسیار کمی وجود دارند (مخصوصاً از میان آنهایی که در کاربردهای صنعتی متداول هستند) که با قرارگیری در اتمسفر، چه در دمای پایین و چه در دمای بالا، پایدار باقی بمانند. در نتیجه، امروزه اغلب فلزات در حین کار، یا از طریق خوردگی در دمای محیط یا از طریق اکسیداسیون در دمای بالا، در معرض تخریب قرار دارند. میزان خوردگی بسیار متفاوت است. برخی فلزات، مثل آهن، به سرعت زنگ زده و اکسید می‌شوند در حالی که سایر فلزات، مثل نیکل و کروم، نسبتاً به کندی خورده می‌شوند. در ادامه مشاهده خواهد شد که ماهیت لایه‌های سطحی ایجاد شده بر روی فلز، نقش مهمی در رفتار این مواد در اتمسفرهای خورنده ایفا می‌کند.

موضوع اکسیداسیون دما بالای فلزات، مستعد تحقیقات گسترده و مطالعات نظری زیادی است. مطالعات نظری محدوده وسیعی از اصول مثالورژیکی، شیمیایی، و فیزیکی را در بر گرفته و می‌تواند توسط محققین رشته‌های مختلفی صورت پذیرد که در این صورت تلاش‌های یکدیگر را تکمیل خواهند کرد.

در ابتدا، این موضوع با هدف کلی ممانعت از تخریب فلزات در حین کار، یعنی عواقب قرارگیری فلزات در دمای بالا و اتمسفرهای اکسید کننده، مورد مطالعه قرار گرفت. در سال‌های اخیر، داده‌های بنیادین ارزشمندی در دسترس قرار گرفته‌اند. این داده‌ها محدوده وسیعی از پدیده‌ها، همچون انتقال جرم درون پوسته‌های اکسیدی، تبخیر اکسید یا اجزای فلزی، نقش تنش مکانیکی در اکسیداسیون، رشد پوسته‌ها در محیطهای پیچیده حاوی بیش از یک اکسید کننده، و روابط مهم بین ترکیب آلیاژ و ریزساختار و اکسیداسیون، را در بر

می‌گیرد. چنین اطلاعاتی از طریق بکارگیری عملی تکنیک‌های فیزیکی و شیمیایی پژوهش در مورد موضوع حاصل می‌شوند.

هدف این کتاب، معرفی مفهوم اکسیداسیون دما بالای فلزات به دانشجویان و نیز مهندسانی است که حرفه آنها نیازمند آشنایی با این موضوع می‌باشد. تمرکز جدی کتاب بر ایجاد شناختی اساسی و بنیادین از فرآیندهای درگیر در اکسیداسیون است.

به منظور حفظ این موضوع، در این کتاب تلاشی برای فراهم آوردن مروری جامع، یا حتی گسترده، از منابع مطالعاتی صورت نگرفته است. به نظر نویسندگان، این امر فقط محتوای واقعی کتاب را، بدون الزاماً بهبود شناخت موضوع، افزایش می‌داد و بنابراین، حجم و هزینه کتاب را بدون ارتقای هدف آن به عنوان معرفی این مبحث، افزایش می‌داد. مرور گسترده منابع مطالعاتی در کتب و مقالات مروری که قبلاً در این موضوع منتشر شده بودند، در دسترس قرار دارند. به طور مشابه، بررسی تکنیک‌های پژوهش به سطحی محدود شده است که برای خواننده به منظور آگاهی وی از چگونگی مطالعه موضوع بدون درگیر شدن با حجم بسیار زیادی از جزئیات تجربی کفایت می‌کند. چنین جزئیاتی نیز در منابع دیگر موجود می‌باشند.

پس از پرداختن به وضعیت کلاسیک در مورد اکسیداسیون ساده فلزات و آلیاژها در پنج فصل اول کتاب، فصول نهایی به مباحثی از جمله واکنش‌ها در محیط‌های مخلوط، یعنی حاوی بیش از یک اکسید کننده، واکنش‌های درگیر در یک فاز جامد در خوردگی داغ، و پیچیدگی‌های اضافی ناشی از ذرات فرساینده می‌پردازند. در نهایت، برخی پوشش‌های متداول برای کاربردهای دما بالا و استفاده از اتمسفرهای محافظ در حین فرآوری تشریح می‌شوند.

جرالد مایر - فرد پتیت

پیشگفتار مترجمین

اکسیداسیون و خوردگی فلزات در دمای بالا یکی از مهمترین چالش‌های موجود در صنایع مختلف از جمله هوافضا، توربین‌های گازی، موتورهای احتراق داخلی، پتروشیمی و پالایش مواد نفتی، عملیات حرارتی و فرآیندهای متالورژیکی محسوب می‌شود. این پدیده باعث تخریب و کاهش قابل ملاحظه عمر قطعات می‌گردد. از سوی دیگر، امروزه به دلیل نیاز به دستیابی به دماهای بالاتر در توربین‌های گازی برای افزایش راندمان آنها، و همچنین اهمیت و توسعه صنایع مرتبط با بازیافت زباله‌ها و تبدیل ضایعات به انرژی، تحقیقات مرتبط با اکسیداسیون و خوردگی فلزات در دمای بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. از این رو، پژوهش‌های زیادی به این زمینه معطوف شده است. بر این اساس، دسترسی به منابع معتبر علمی در این حوزه مورد توجه بسیاری از اساتید، دانشجویان و صنعت‌گران قرار دارد.

کتاب حاضر ترجمه نسخه ویرایش دوم (Introduction to High Temperature Oxidation of Metals) تألیف پروفیسور نیل برکس، پروفیسور جرالده مایر و پروفیسور فردریش پیت (همگی از دانشگاه یوتسبورگ)، یکی از منابع شناخته شده در عرصه خوردگی و اکسیداسیون می‌باشد که در سال ۲۰۰۶ توسط ناشر معتبر و بین المللی انتشارات دانشگاه کمبریج به چاپ رسیده است. یکی از ویژگی‌های مطلوب این کتاب از دیدگاه مترجمین، پرداختن همزمان به مبانی علمی و ارائه موارد و مثال‌های متعدد از تحقیقات آزمایشگاهی و صنعتی در حوزه اکسیداسیون و دما بالاست که این کتاب را به منبعی مبدل ساخته است که برای اقشار مختلفی همچون دانشجویان رشته‌های مرتبط با مباحث خوردگی و اکسیداسیون، محققین، پژوهشگران و حتی متخصصین حاضر در صنعت قابل بهره برداری است. استفاده تلفیقی از مراجع قدیمی

و به روز، ارائه مثال‌های علمی و عملی، تشریح ساده فرآیندها، پرداختن به مکانیزم و جزئیات رخداد پدیده‌ها از جمله دیگر شاخصه‌های بارز این کتاب بشمار می‌روند. از دیدگاه دانشگاهی، این کتاب در سطوح مختلف تحصیلات پایه و تکمیلی، در رشته‌های متالورژی و بخش‌های مرتبط با مهندسی شیمی قابلیت بکارگیری در زمینه تدریس و انجام پروژه‌های تحقیقاتی را دارا می‌باشد. در اینجا لازم است از مدیریت و کارکنان مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان جهت پذیرش چاپ کتاب حاضر قدردانی نمایم.

مسعود عطاپور

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

میثم جلالی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

پاییز ۱۳۹۲

www.ketab.ir

درباره مترجمین

دکتر مسعود عطاپور متولد سال ۱۳۵۸ در شهرستان نیریز از توابع استان فارس می‌باشد. ایشان پس از اخذ مدرک دیپلم در سال ۱۳۷۷ وارد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی امیرکبیر شد و در سال ۱۳۸۲ موفق به اخذ مدرک کارشناسی مهندسی مواد از آن دانشگاه گردید. در سال ۱۳۸۲ دوره کارشناسی ارشد خود را در دانشگاه صنعتی اصفهان در گرایش انتخاب و شناسایی مواد مهندسی آغاز کرده و در سال ۱۳۸۴ در دوره دکتری همین دانشگاه پذیرفته شد. ایشان رساله دکتری خود را در زمینه خوردگی و اکسیداسیون اخذ و پس از گذراندن یک دوره پژوهشی در مرکز خوردگی فونتانا در دانشگاه ایالتی اوهایو در آمریکا، در سال ۱۳۹۱ دوره دکتری را به اتمام رساند. دکتر عطاپور پس از پایان دوره دکتری به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده مهندسی مواد در دانشگاه صنعتی اصفهان ادامه کار داده و در حال حاضر به عنوان استادیار در زمینه خوردگی و اکسیداسیون فعالیت می‌کند. ایشان تا کنون مقالات علمی مختلفی در مجلات معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسانده است. برای آشنایی بیشتر با نامبرده، به نشانی <http://atapour.iut.ac.ir/> مراجعه فرمایید.

مهندس میثم جلالی در سال ۱۳۶۲ در تهران زاده شد و پس از اتمام دوره دبیرستان در سال ۱۳۸۰، در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی مواد و متالورژی وارد دانشگاه علم و صنعت ایران شد. وی پس از فارغ التحصیلی در سال ۱۳۸۵ از این مقطع، همان سال در مقطع کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی اصفهان در گرایش انتخاب و شناسایی مواد فلزی پذیرفته شد. پس از اتمام این دوره، وی دوره دکتری مهندسی مواد در دانشگاه علم و صنعت را به عنوان دانشجوی ممتاز در سال ۱۳۸۸ آغاز نمود. او در این دوره پس از اخذ بورس تحصیلی از وزارت علوم، و با اخذ پذیرش تحصیلی، یک دوره فرصت مطالعاتی را در انستیتوی تحقیقاتی مواد و سرامیک سویا در اسپانیا گذراند. وی در زمان چاپ این کتاب، مشغول طی کردن آخرین مراحل دوره دکتری بوده و به زودی از رساله دکتری خود دفاع خواهد کرد. از وی تا کنون چندین مقاله علمی در مجلات معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسیده و همچنین تا کنون سه کتاب نیز از وی منتشر شده است.

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۵	فصل ۱. روش‌های ارزیابی اکسیداسیون
۶	۱-۱) اندازه گیری سینتیک واکنش.....
۱۰	۲-۱) روش‌های ناپیوسته ارزیابی سینتیک واکنش.....
۱۰	۳-۱) روش‌های پیوسته ارزیابی سینتیک واکنش.....
۱۱	۱-۳-۱) روش‌های افزایش وزن.....
۱۵	۲-۳-۱) مصرف گاز.....
۱۶	۴-۱) آزمون‌های عمر تسریع شده.....
۱۶	۵-۱) روش‌های ارزیابی نمونه.....
۱۷	۱-۵-۱) آماده سازی سطح مقطع نمونه‌ها.....
۱۷	۱-۱-۵-۱) مانت کردن.....
۱۸	۲-۱-۵-۱) پولیش کردن.....
۱۹	۳-۱-۵-۱) اچ کردن.....
۱۹	۶-۱) تشریح تکنیک‌های ویژه ارزیابی.....
۲۲	۱-۶-۱) میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....
۲۲	۲-۶-۱) پراش اشعه ایکس (XRD).....
۲۳	۳-۶-۱) میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM).....

۲۴.....	۱-۶-۴) تکنیک‌های آنالیز سطحی
۲۶.....	مراجع

فصل ۲. مبانی ترمودینامیکی

۲۹.....	۱-۲) مقدمه
۳۰.....	۲-۲) ترمودینامیک بنیادی
۳۲.....	۳-۲) انجام و استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی
۳۲.....	۱-۳-۲) نمودارهای انرژی آزاد گیبس بر حسب ترکیب شیمیایی و نمودارهای اکتیویته بر حسب ترکیب شیمیایی
۳۷.....	۲-۳-۲) نمودارهای انرژی آزاد استاندارد تشکیل بر حسب دما
۳۹.....	۳-۳-۲) نمودارهای اجزای بخار
۴۳.....	۴-۳-۲) نمودار دو بعدی پایداری همدم: یک جزء فلزی و دو جزء غیرفلزی
۵۰.....	۵-۳-۲) نمودار دو بعدی پایداری همدم: دو جزء فلزی و یک جزء غیرفلزی
۵۲.....	۶-۳-۲) نمودار سه بعدی پایداری همدم: دو جزء فلزی و دو جزء غیرفلزی
۵۲.....	۴-۲) محاسبه اکتیویته‌ها در شرایط گازی
۵۵.....	خلاصه
۵۵.....	مراجع

فصل ۳. مکانیزم‌های اکسیداسیون

۵۹.....	۱-۳) مقدمه
۶۰.....	۲-۳) مکانیزم‌های اکسیداسیون
۶۰.....	۳-۳) مکانیزم‌های انتقال
۶۱.....	۱-۳-۳) ترکیبات یونی کاملاً استوکیومتری
۶۳.....	۲-۳-۳) ترکیبات یونی غیراستوکیومتری
۶۴.....	۱-۲-۳-۳) نیمه هادی‌های منفی (نوع n)
۶۴.....	الف) فلز مازاد

۶۸	ب) کمبود غیر فلز
۷۰	۳-۲-۲) نیمه هادی‌های منفی (نوع p)
۷۰	الف) کمبود فلز
۷۳	۳-۲-۳) نیمه هادی‌های ذاتی
۷۳	۳-۴) نرخ اکسیداسیون
۷۴	۳-۵) عملیات ساده سازی شده اکسیداسیون کنترل شده با نفوذ
۷۶	۳-۶) تئوری اکسیداسیون واکنر
۹۳	۳-۶-۱) نفوذ اتصال کوتاه
۹۴	۳-۷) قانون سرعت خطی
۹۹	۳-۸) اتمسفرهای رقیق شده
۱۰۱	۳-۹) گازهای رقیق
۱۰۲	۳-۱۰) گذار از قانون خطی به قانون سهموی
۱۰۳	۳-۱۱) قانون سرعت لگاریتمی
۱۰۷	۳-۱۲) روابط میان ثوابت سرعت سهموی
۱۰۹	مراجع

۱۱۳

فصل ۴. اکسیداسیون فلزات خالص

۱۱۳	۴-۱) مقدمه
۱۱۸	۴-۲) سیستم‌های تشکیل دهنده پوسته‌های تک لایه
۱۱۸	۴-۲-۱) اکسیداسیون نیکل
۱۲۲	۴-۲-۲) اکسیداسیون روی
۱۲۴	۴-۲-۳) اکسیداسیون آلومینیوم
۱۲۵	۴-۳) سیستم‌های تشکیل دهنده پوسته‌های چند لایه
۱۲۵	۴-۳-۱) اکسیداسیون آهن
۱۳۰	۴-۳-۲) اکسیداسیون کبالت
۱۳۴	۴-۳-۱) تئوری رشد پوسته چند لایه

۱۳۶	سیستم‌هایی که اجزای فرار در آنها حائز اهمیت هستند.....
۱۳۶	۴-۴-۱) اکسیداسیون کروم.....
۱۴۱	۴-۴-۲) اکسیداسیون مولیبدن و تنگستن.....
۱۴۳	۴-۴-۳) اکسیداسیون پلاتین و رودیم.....
۱۴۴	۴-۴-۴) اکسیداسیون سیلیسیم.....
۱۴۷	۴-۵) فلزاتی با حد حلالیت زیاد اکسیژن.....
۱۴۷	۴-۵-۱) اکسیداسیون تیتانیم.....
۱۴۸	۴-۶) سیستم‌هایی با ترک خوردگی زیاد پوسته.....
۱۴۸	۴-۶-۱) اکسیداسیون نایوبیم.....
۱۴۹	مراجع.....

فصل ۵. اکسیداسیون آلیاژها ۱۵۳

۱۵۳	۵-۱) مقدمه.....
۱۵۴	۵-۲) دسته بندی انواع واکنش‌ها.....
۱۵۴	۵-۲-۱) زمینه نجیب با عناصر آلیاژ فعال.....
۱۵۷	۵-۲-۱-۱) اکسیداسیون داخلی.....
۱۵۹	۵-۲-۱-۲) سینتیک.....
۱۶۴	۵-۲-۱-۳) مورفولوژی رسوب.....
۱۶۸	۵-۲-۱-۴) گذار از اکسیداسیون داخلی به خارجی.....
۱۷۴	۵-۲-۱-۵) اکسیداسیون انتخابی.....
۱۷۴	۵-۲-۲) زمینه فعال با عناصر آلیاژی فعال.....
۱۷۴	۵-۲-۲-۱) اکسیداسیون آلیاژهای پایه نیکل، آهن و کبالت.....
۱۷۵	الف) آلیاژهای تشکیل دهنده کرومیا.....
۱۸۴	ب) آلیاژهای تشکیل دهنده آلومینا.....
۱۸۹	ج) آلیاژهای تشکیل دهنده سیلیکا.....
۱۹۲	۵-۲-۲-۲) اکسیداسیون سایر سیستم‌های آلیاژی مهم.....

- الف) آلیاژهای آهن-مس ۱۹۲
- ب) آلیاژهای نایوبیم- زیرکونیم ۱۹۴
- ج) آلیاژهای نیکل- کبالت ۱۹۴
- ۳-۲-۲-۵) اکسیداسیون ترکیبات بین فلزی ۱۹۶
- الف) حلالیت اکسیژن ۱۹۶
- ب) استوکیومتری ترکیب ۱۹۷
- ج) پایداری نسبی اکسیدها ۱۹۷
- د) سرعت رشد اکسیدهای انتقالی ۱۹۹
- ۳-۵) سایر عوامل موثر بر اکسیداسیون آلیاژها ۲۰۱
- ۱-۳-۵) ایجاد و آزادسازی تنش در لایه‌های اکسیدی ۲۰۱
- ۲-۳-۵) ایجاد تنش ۲۰۲
- ۱-۲-۳-۵) تنش‌های رشد ۲۰۲
- الف) اختلاف حجم میان اکسید و فلز ۲۰۲
- ب) تنش‌های رانشی ۲۰۳
- ج) تغییرات ترکیب در آلیاژ یا پوسته ۲۰۵
- د) تنش‌های حاصل از عیوب نقطه‌ای ۲۰۵
- ذ) تنش‌های تبلور مجدد ۲۰۶
- ر) تشکیل اکسید درون پوسته ۲۰۶
- ز) هندسه قطعه ۲۰۸
- ۲-۲-۳-۵) تنش‌های حرارتی ۲۰۹
- ۳-۳-۵) اندازه گیری تنش‌ها ۲۱۲
- ۱-۳-۳-۵) تفرق اشعه ایکس ۲۱۳
- ۲-۳-۳-۵) روش‌های لیزری ۲۱۵
- ۳-۳-۳-۵) عکس العمل در برابر تنش ۲۱۵
- ۴-۳-۳-۵) اثرات عنصر فعال ۲۱۷
- ۴-۵) اکسیداسیون فاجعه آمیز ناشی از افزودن فلز دیرگداز ۲۲۵
- ۵-۵) اکسیداسیون و کربن زدایی فولادها ۲۲۷

۲۳۰	 (۱-۵-۵) پوسته سازی و کربن زدایی همدمای همزمان
۲۳۶	 (۲-۵-۵) تأثیرات نرخ پوسته سازی بر کربن زدایی
۲۳۷	 (۳-۵-۵) تأثیر کربن زدایی قبلی
۲۳۸	 (۴-۵-۵) پوسته سازی و کربن زدایی غیرهمدمای همزمان
۲۳۸	 نتیجه گیری
۲۳۹	 مراجع

فصل ۶. اکسیداسیون در محیطهای اکسید کننده غیر از اکسیژن ۲۴۵

۲۴۵	 (۱-۶) مقدمه
۲۴۵	 (۲-۶) واکنش با گوگرد
۲۵۳	 (۳-۶) واکنش با هالوژن ها
۲۵۷	 (۴-۶) واکنش با کربن
۲۶۱	 (۵-۶) واکنش با نیتروژن
۲۶۲	 مراجع

فصل ۷. واکنش های فلزات در محیطهای مخلوط ۲۶۵

۲۶۵	 (۱-۷) مقدمه
۲۶۶	 (۲-۷) اتمسفرهای هوا - H_2O و هوا - CO_2
۲۷۴	 (۳-۷) سیستم های فلز - گوگرد - اکسیژن
۲۸۰	 (۴-۷) شرایط تشکیل سولفید
۲۹۵	 (۱-۴-۷) تهاجم به آلیاژها در اتمسفرهای پیچیده
۳۰۳	 مراجع

فصل ۸. خوردگی داغ ۳۰۷

۳۰۷	 (۱-۸) مقدمه
-----	-------------------

۳۱۰	 مراحل تخریب در خوردگی داغ..... (۲-۸)
۳۱۴	 مرحله آغاز خوردگی داغ..... (۳-۸)
۳۱۷	 انواع اشاعه خوردگی داغ..... (۴-۸)
۳۲۱	 فلاکسینگ قلیایی..... (۱-۴-۸)
۳۳۶	 فلاکسینگ اسیدی..... (۲-۴-۸)
۳۳۶	 فلاکسینگ اسیدی ناشی از آلیاژ..... (۱-۲-۴-۸)
۳۴۴	 فلاکسینگ اسیدی ناشی از فاز گازی..... (۲-۲-۴-۸)
۳۵۰	 خوردگی داغ ناشی از گوگرد (سولفیداسیون)..... (۳-۲-۴-۸)
۳۵۷	 تأثیرات رسوبات دیگر..... (۵-۸)
۳۶۵	 تأثیر دما و ترکیب شیمیایی گاز بر خوردگی داغ ناشی از Na_2SO_4 (۶-۸)
۳۶۷	 روش‌های آزمایش..... (۷-۸)
۳۶۸	 مراجع.....

فصل ۹. فرسایش - خوردگی فلزات در اتمسفرهای اکسیدکننده ۳۷۱

۳۷۱	 مقدمه..... (۱-۹)
۳۷۱	 فرسایش مواد..... (۲-۹)
۳۷۶	 مطالعه فرآیندهای فرسایش - خوردگی در دمای بالا..... (۳-۹)
۳۷۸	 فرسایش - خوردگی فلزات خالص در دمای بالا..... (۴-۹)
۳۹۲	 فرسایش - خوردگی آلیاژها..... (۵-۹)
۳۹۵	 مراجع.....

فصل ۱۰. پوشش‌های محافظ ۳۹۷

۳۹۷	 مقدمه..... (۱-۱۰)
۳۹۸	 انواع سیستم‌های پوششی..... (۲-۱۰)
۳۹۸	 پوشش‌های نفوذی..... (۱-۲-۱۰)
۳۹۸	 آلومینایزینگ آلیاژهای پایه نیکل..... (۱-۱-۲-۱۰)

۴۰۷	 پوشش‌های کروماته (۲-۱-۲-۱۰)
۴۰۷	 پوشش‌های سیلیسیدی (۳-۱-۲-۱۰)
۴۰۸	 روش‌های دیگر ایجاد پوشش‌های نفوذی (۲-۱-۲-۱۰)
۴۰۹	 پوشش‌های روکشی (۲-۲-۱۰)
۴۱۰	 رسوب فیزیکی بخار (تبخیر) (۳-۱-۲-۱۰)
۴۱۶	 فرایندهای پاشش پلاسمایی (۱-۳-۱۰)
۴۱۷	 سایر تکنیک‌های پاشش (۲-۳-۱۰)
۴۱۹	 تکنیک‌های دیگر برای رسوب دادن پوشش‌های روکشی (۳-۳-۱۰)
۴۱۹	 پوشش‌های سد حرارتی (۴-۳-۱۰)
۴۲۱	 تخریب پوشش (۴-۱۰)
۴۲۱	 پوشش‌های مقاوم به اکسیداسیون (۱-۴-۱۰)
۴۲۲	 تخریب پوشش‌های نفوذی و روکشی (۱-۱-۴-۱۰)
۴۲۸	 پوشش‌های روی آلومینایدهای تیتانیم (۲-۱-۴-۱۰)
۴۳۰	 پوشش‌های سد حرارتی (۳-۱-۴-۱۰)
۴۳۹	 تفجوشی پوشش‌های سد حرارتی (۴-۱-۴-۱۰)
۴۴۱	 خلاصه
۴۴۲	 مراجع

فصل ۱۱. کنترل اتمسفر برای حفاظت از فلزات در حین فرایندهای تولید ۴۴۵

۴۴۵	 مقدمه (۱-۱۱)
۴۴۶	 جلوگیری یا کنترل تشکیل لایه اکسیدی (۲-۱۱)
۴۴۹	 ایجاد اتمسفرهای محافظ در آزمایشگاه (۳-۱۱)
۴۴۹	 خلأ (۱-۳-۱۱)
۴۵۰	 اتمسفرهای گازی (۲-۳-۱۱)
۴۵۹	 ایجاد اتمسفرهای کنترل شده در صنعت (۴-۱۱)
۴۶۰	 انواع اتمسفرها (۱-۴-۱۱)

۴۶۰	 ۱۱-۴-۱) اتمسفرهای گرمازا
۴۶۲	 الف) روش MEA
۴۶۲	 ب) روش غربال مولکولی
۴۶۳	 ج) گازهای غنی از نیتروژن
۴۶۳	 ۱۱-۴-۲) اتمسفرهای گرماگیر
۴۶۴	 ۱۱-۴-۳) اتمسفرهای پایه نیتروژن
۴۶۷	 ۱۱-۵) رصد و کنترل
۴۶۸	 ۱۱-۶) روش‌های حرارت‌دهی
۴۶۹	 مراجع

۴۷۱	پیوست الف) حل قانون دوم فیک برای یک جامد نیمه بی نهایت
۴۷۵	پیوست ب) محاسبه دقیق سینتیک اکسیداسیون داخلی
۴۸۱	پیوست ج) اثر ناخالصی‌ها بر ساختار عیب اکسیدها

۴۸۷	واژه نامه
۴۹۱	نمایه

مقدمه

هدف اصلی این کتاب، ارائه یک مقدمه برای اصول بنیادینی است که بر برهمکنش‌های محیط‌های گازی فعال (معمولاً حاوی اکسیژن به عنوان یک جزء) و مواد جامد، معمولاً فلزات، در دماهای بالا حاکم می‌باشند. این اصول به طیف وسیعی از کاربردها قابل اعمال می‌باشند، این کاربردها می‌توانند حتی شامل مواردی باشند که اکسیداسیون در آنها مطلوب است، همانند تشکیل لایه مقاوم سیلیکا بر روی نیمه هادی‌های پایه سیلیسیمی یا حذف عیوب سطحی از شمشال‌های فولادی در حین تولید از طریق اکسیداسیون سطحی سریع. اما اکثر کاربردها به حالت‌هایی می‌پردازند که واکنش قطعه با اتمسفر گازی نامطلوب است و تلاش می‌شود نرخ انجام واکنش به حداقل برسد.

واژه «دما بالا» نیازمند تعریف است. بر خلاف خوردگی آبی، دماهای مورد نظر در این کتاب، همیشه تا حدی بالا هستند که آب، در صورت وجود در سیستم، به صورت بخار و نه به صورت مایع حضور خواهد داشت. به علاوه، هنگام قرارگیری در شرایط اکسید کننده در دماهای بین 100°C تا 500°C ، اغلب فلزات و آلیاژها، محصولات خوردگی نازکی تشکیل می‌دهند که بسیار آهسته رشد می‌کنند و برای مشخصه یابی دقیق آنها به میکروسکوپ الکترونی عبوری نیاز است. در حالی که برخی اصول مورد بحث در این کتاب ممکن است قابل اعمال به لایه‌های نازک باشند، عبارت «دما بالا» برای حدود 500°C و بالاتر در نظر گرفته می‌شود.

در طراحی آلیاژها برای استفاده در دماهای بالا، آلیاژها نه تنها باید تا حد امکان در برابر اثرات حاصل از واکنش با اکسیژن مقاوم باشند، بلکه مقاومت در برابر هجوم سایر اکسیدکننده‌ها در محیط نیز ضروری است. به علاوه، محیط همیشه یک گاز نیست، زیرا در عمل، نشستن خاکستر بر روی آلیاژها غیرمتداول نیست. بنابراین در این گونه موارد، صحبت از مقاومت به خوردگی دما بالای مواد به جای مقاومت به اکسیداسیون آنها، واقعی‌تر به نظر می‌رسد.

نرخ رخداد واکنش‌ها توسط ماهیت محصول تشکیل شده واکنش کنترل می‌شود. در مورد موادی همچون کربن، محصول واکنش گازی است (CO و CO_2)، و مانعی برای ادامه واکنش ایجاد نمی‌کند. موادی که برای بکارگیری در دمای بالا طراحی می‌شوند، از طریق تشکیل یک محصول واکنش جامد (معمولاً یک اکسید) که قطعه و اتمسفر را از یکدیگر جدا می‌کند، حفاظت می‌شوند. نرخ واکنش بعدی توسط انتقال واکنشگرها درون این لایه جامد کنترل می‌شود. مواد طراحی شده برای استفاده در دمای بالا آنهایی هستند که اکسیدهایی با آهسته‌ترین نرخ انتقال برای واکنش‌گرها (معمولاً SiO_2 یا $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)، یعنی کمترین نرخ رشد، تشکیل می‌دهند. اما سایر مواد، اگر اکسیدهای آنها دارای سرعت رشد به حد کافی آهسته‌ای باشد، اغلب در دماهای پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا احتمالاً یا از خواص مکانیکی بهتری (استحکام، مقاومت خزشی) برخوردار هستند، یا راحت‌تر به شکل قطعه در می‌آیند (شکل پذیری/ جوش پذیری مناسب) و یا ارزان‌تر هستند.

در برخی موارد برای ایجاد یک مقاومت مطلوب در برابر خوردگی در آلیاژهای سازه‌ای می‌توان از طریق اصلاح ترکیب شیمیایی، موانعی در برابر عوامل خوردگی تشکیل داد. اما در بسیاری از کاربردهای عملی برای آلیاژهای سازه‌ای، تغییرات مورد نیاز در ترکیب با خواص فیزیکی مورد نیاز آلیاژ سازگاری ندارند. در چنین مواردی، اصلاح ترکیب شیمیایی از طریق استفاده از پوشش‌ها بر روی سطوح آلیاژهای سازه‌ای ایجاد می‌شود و موانع مناسبی از محصول واکنش بر روی سطح پوشش بوجود می‌آید.

یک دسته بندی کلی از آلیاژهای رایج مهندسی نسبت به دمای بکارگیری آنها شامل موارد ذیل می باشد:

- فولادهای دما پایین، که لایه های سطحی M_2O_3 ($M=Fe, Cr$) تشکیل می دهند، تا دماهای حدود $500^\circ C$ استفاده می شوند.
 - آلیاژهای پایه تیتانیومی، که TiO_2 تشکیل می دهند، تا حدود $600^\circ C$ استفاده می شوند.
 - فولادهای زنگ نزن فریتی، که لایه های سطحی Cr_2O_3 تشکیل می دهند، تا دمای حدود $650^\circ C$ مورد استفاده قرار می گیرند. این حد دمایی بر اساس خواص خزشی تعیین شده است نه نرخ اکسیداسیون.
 - آلیاژهای استیتی $Fe-Ni-Cr$ ، که لایه های سطحی Cr_2O_3 تشکیل می دهند و استحکام خزشی بالایی از آلیاژهای فریتی دارند، تا حدود $850^\circ C$ استفاده می شوند.
 - آلیاژهای استیتی $Ni-Cr$ ، که لایه های سطحی Cr_2O_3 تشکیل می دهند، تا حدود $950^\circ C$ استفاده می شوند که حد نهایی برای حفاظت اکسیداسیونی از طریق تشکیل کرومیا می باشد.
 - آلیاژهای استیتی $Ni-Cr-Al$ و پوشش های آلومیناییدی و ($M=Ni, Co, Fe$) $MCrAlY$ ، که لایه های سطحی Al_2O_3 تشکیل می دهند، تا حدود $1100^\circ C$ مورد استفاده قرار می گیرند.
 - کاربردهای بالاتر از $1100^\circ C$ مستلزم استفاده از سرامیک ها یا فلزات دیرگداز هستند. آلیاژهای حاصل از این گونه فلزات معمولاً به طور فاجعه آمیز اکسید می شوند و باید آنها را با یک ماده مقاوم تر که معمولاً SiO_2 تشکیل می دهد، پوشش داد.
- عمل «انتخاب آلیاژ» برای یک کاربرد معین، تمام عوامل فوق را در نظر می گیرد. با اینکه سایر خواص نیز گاهی اوقات مورد توجه قرار می گیرند، اما تمرکز این کتاب بر رفتار اکسیداسیون و خوردگی است.