



پوشش‌های دما بالا

□ تألیف: سودهانگشو یاس

□ ترجمه: محمد شایگانی

آرام اسعدی





سرشناسه

پاس، سودهانگشو.

.Bose, Sudhangshu

عنوان و نام پدیدآور

: پوشش های دما بالا / سودهانگشو پاس؛ ترجمه محمد شایگانی، آرام اسعدی.

مشخصات نشر

: تهران: پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۹۱.

مشخصات ظاهری

: ۲۸۴ ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک

: ۹۷۸-۶۰۰-۵۹۶۱-۴۷-۸

وضعیت فهرست نویسی

: فیبا

: عنوان اصلی: High Temperature Coatings

یادداشت

: کتابنامه.

یادداشت

موضوع

: ایکاری دیرگداز

موضوع

: مواد صنعتی دیرگداز

شناسه افزوده

: شایگانی، محمد، ۱۳۵۶-، مترجم.

شناسه افزوده

: اسعدی، آرام، ۱۳۶۵-، مترجم.

شناسه افزوده

: پژوهشگاه صنعت نفت.

رده بندی کنگره

: ۶۷۰/۷۲: ۹۱۳/۱ ب ۱/ب TS۶۹۵/۹

رده بندی دیویی

: ۶۷۰/۷۲

شماره کتابشناسی ملی

: ۲۸۱۱۳۶۰

چاپ این کتاب، پس از دوری در چهل و هشتمین جلسه شورای نشر پژوهشگاه صنعت نفت مورخ ۱۳۹۰/۸/۱۷، به تصویب رسید.



تهران: بلوار غربی مجموعه ورزشی آزادی، پژوهشگاه صنعت نفت □ کد پستی: ۱۴۸۵۷۳۳۱۱۱
صندوق پستی: ۱۳۷-۱۴۶۶۵ □ تلفن مرکز نشر: ۴۸۲۵۲۰۴۸، دورنگار: ۴۴۷۳۹۶۸۶
وب سایت پژوهشگاه: www.ripi.ir، ایمیل مرکز نشر: nashr@ripi.ir

پوشش های دما بالا

تألیف: سودهانگشو پاس

ترجمه: محمد شایگانی، آرام اسعدی

ناشر: پژوهشگاه صنعت نفت □ ویراستار ادبی: منیر قنبریان □ صفحه آرا: اشرف السادات حسینی

طراح جلد: پرویز بیانی □ چاپ اول: تابستان ۱۳۹۱ □ شمارگان: ۲۰۰۰ نسخه

قیمت: ۱۵۵۰۰۰ ریال □ چاپ: سازمان چاپ و انتشارات اوقاف

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۹۶۱-۴۷-۸ ISBN: 978-600-5961-47-8

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹	پیشگفتار ناشر
۱۱	پیشگفتار مترجمان
۱۳	درباره نویسنده
۱۵	پیشگفتار
۱۹	فصل اول: مقدمه
۲۵	مراجع
۲۷	فصل دوم: مفاهیم پایه
۲۹	۱-۲- مفاهیم ترمودینامیکی
۳۲	۲-۲- مفهوم سینتیک
۳۶	۳-۲- ساختار کریستالی
۳۹	۴-۲- فازهای متعادل
۴۲	مراجع
۴۳	فصل سوم: آلیاژهای پایه
۴۵	۱-۳- تحمل دمایی فلزات و آلیاژها
۴۶	۲-۳- ساز و کارهای استحکام‌دهی
۴۷	۳-۳- آلیاژهای تیتانیومی
۴۹	۴-۳- فولادها
۵۲	۵-۳- آلیاژهای نیکل-آهن
۵۳	۶-۳- سوپرآلیاژهای با پایه نیکل و کبالت
۵۷	۷-۳- دلایل نیاز به پوشش دادن
۵۷	مراجع

صفحه	عنوان
۵۹	فصل چهارم: اکسید شدن
۶۱	۴-۱- فرآیند اکسید شدن
۶۷	۴-۲- آزمایش و ارزیابی اکسید شدن
۷۵	۴-۳- اکسید شدن آلیاژها
۸۲	۴-۴- نقش برخی از عناصر آلیاژی مشخص
۸۵	۴-۵- اکسید شدن در حضور بخار آب
۸۶	۴-۶- اکسید شدن آلیاژهای پلی کریستالی در مقایسه با آلیاژهای تک کریستالی
۸۶	مراجع
۸۹	فصل پنجم: خوردگی در مایع‌ها
۹۱	۵-۱- فرآیندهای خوردگی داغ
۹۸	۵-۲- خوردگی داغ فلزات و آلیاژها
۱۰۱	۵-۳- نقش عناصر آلیاژی خاص در خوردگی داغ آلیاژها و پوشش‌های پایه نیکل و کبالت
۱۰۴	۵-۴- تأثیر دیگر آلاینده‌ها
۱۰۶	۵-۵- خوردگی داغ TBCها
۱۰۷	۵-۶- تخریب شبیه به خوردگی داغ
۱۰۸	مراجع
۱۱۳	فصل ششم: پوشش‌های مقاوم به اکسید شدن و خوردگی
۱۱۵	۶-۱- شرایط لازم برای پوشش‌های فلزی
۱۱۷	۶-۲- فرآیندهای پوشش‌دهی
۱۱۷	۶-۳- پوشش‌های نفوذی
۱۴۵	۶-۴- پوشش‌های از نوع روکشی
۱۴۶	۶-۵- اعمال پوشش‌های روکشی با فرآیندهای پاشش و قوسی
۱۶۸	۶-۶- اعمال پوشش‌های از نوع روکشی با رسوب‌گذاری فیزیکی در فاز بخار (PVD)
۱۸۷	۶-۷- اکسید شدن و مقاومت به خوردگی نسبی پوشش‌ها
۱۹۰	۶-۸- مدل‌سازی طول عمر اکسید شدن و خوردگی
۲۰۴	۶-۹- تعامل سایش-اکسید شدن و سایش-خوردگی
۲۰۵	مراجع
۲۱۵	فصل هفتم: پوشش‌های مانع حرارت
۲۱۸	۷-۱- کاهش دما به کمک TBCs

صفحه	عنوان
۲۲۱	۳-۷- شرایط مواد برای TBC ها
۲۲۲	۳-۷- زیر کونیای تا حدی پایدار شده
۲۲۵	۴-۷- TBC های پاشش هوا- پلازما
۲۴۸	۵-۷- TBC های تولیدشده با روش EB-PVD
۲۹۸	۶-۷- پوشش های سدکننده محیط (EBC's)
۲۹۹	مراجع
۳۱۱	فصل هشتم: بازرسی غیرمخرب پوشش ها
۳۱۳	۸-۱- تکنیک های NDT
۳۲۸	مراجع
۳۳۱	فصل نهم: تعمیر پوشش ها
۳۳۳	۹-۱- محدودیت های تعمیر پوشش ها
۳۳۴	۹-۲- فرآیند تعمیر
۳۳۷	۹-۳- پوشش دهی مجدد و بازیابی مواد
۳۳۷	مراجع
۳۳۹	فصل دهم: آزمایش های میدانی و شبه میدانی
۳۴۱	۱۰-۱- کاربرد در موتور توربین گازی
۳۶۱	۱۰-۲- دیگر کاربردهای TBC
۳۶۵	مراجع
۳۶۹	ضمائم
۳۷۵	واژه نامه

پیشگفتار ناشر

از زمان فوران اولین چاه نفت ایران و خاورمیانه در مسجد سلیمان و تولد صنعت نفت ایران صد سال می‌گذرد. از آن زمان که مردم تنها برای روشنایی از نفت خام استفاده می‌کردند تاکنون، که تقریباً در هر صنعتی دریایی از نفت خام و فرآورده‌هایش دیده می‌شود، پژوهشگران مختلف در تمام زمینه‌ها و کاربردهای مربوط به نفت خام تحقیقات فراوانی انجام داده‌اند که پیشرفت‌های فناوری وسیعی را در زمینه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی در پی داشته است. چگونگی ظهور و بروز فناوری و نحوه به‌کارگیری آن مقدار تولید صنعت نفت را در آینده تعیین خواهد کرد.

تحقیق و پژوهش، در صد سالگی صنعت نفت ایران، بسیار جوانتر از این صنعت است و ما هنوز در گام‌های اولیه فعالیت‌های علمی در این صنعت هستیم. واضح است که پژوهش در صنعت نفت با بازدهی متناسب با تجربه و قدمت تاریخی آن حرکت نکرده است و صد افسوس که مشکلات و ویژگی‌های آن به خوبی شناخته نشده‌اند. خصلت‌های زمان‌بر بودن، هزینه‌بر بودن، ریسک‌پذیری، کیفیت نه چندان مطلوب، مشکلات عدم تأمین مالی به موقع و عدم وجود ضمانت‌های لازم از مولفه‌های ذاتی نهفته در پژوهش‌اند.

به رغم وجود این چالش‌های سنگین، تعامل مستقیم پژوهش و فناوری می‌تواند اقتدار و توسعه واقعی فناوری و مدیریت دانش را در صنعت نفت به همراه داشته باشد به این خاطر مرکز نشر پژوهشگاه صنعت نفت، با بهره‌گیری از خرد جمعی نخبگان علمی و فنی کشور در بخش پژوهش و فناوری و نیز توسعه ارتباط با مراکز علمی، پژوهشی و صنعتی معبر داخلی و خارجی و مشارکت با آنان برای توسعه رشته‌ها و علوم و فنون وابسته به صنعت نفت و در پی آن انجام پروژه‌ها و طرح‌های توسعه‌ای و انتشار کتب علمی - آموزشی و پژوهشی، گامی بلند در رسیدن به این هدف برمی‌دارد.

کتاب پیش رو، تالیف سودهانگشو باس و ترجمه آقایان دکتر محمد شایگانی و مهندس آرام اسعدی، یکی دیگر از مجموعه انتشارات جدید پژوهشگاه است که با هدف توسعه دانش در صنعت نفت منتشر می‌شود و امید است نظر پژوهشگران و دانشجویان محترم را جلب کند.

پیشگفتار مترجمان

یکی از مشکلات اساسی دانشجویان، دانش‌پژوهان و صنعتگران کشور در اغلب رشته‌های علوم فنی و مهندسی کمبود منابع علمی به زبان فارسی است. در سال‌های اخیر با ترجمه و نشر کتاب قدم‌هایی مؤثر برای حل این مشکل برداشته شده‌اند، اما با توجه به رشد روزافزون استفاده از توربین‌های گازی صنعت نفت و صناعی که با سیستم‌های دمای بالا در کشور سر و کار دارند، تصمیم گرفته شد این کتاب به زبان فارسی ترجمه شود تا قدمی کوچک برای رشد و توسعه و تعالی علم در این زمینه در ایران عزیز برداشته شود و امیدواریم که این قدم به آبادانی و رفاه کشورمان کمک کند.

کتاب حاضر شامل ده فصل و مجموعه ضمائم است و پس از مقدمه‌ای کوتاه در فصل اول، در فصل دوم توضیحی مختصر دربارهٔ منابع پایه در زمینه خوردگی داغ ارایه می‌شوند. فصل سوم دربارهٔ آلیاژهای پایه مناسب در زمینه عملیات دما بالاست. در فصل چهارم به مبحث اکسید شدن و در فصل پنجم به مقوله خوردگی در دماهای بالا، به خصوص در TBCها پرداخته شده است. در فصل ششم، مبحث پوشش‌های مقاوم به اکسید شدن و خوردگی بررسی می‌شود و در فصل هفتم مستقیماً به بحث پوشش‌های TBC وارد خواهیم شد. در فصل‌های هشتم، نهم و دهم به بحث بازرسی‌های غیرمخرب، تعمیرات و کاربری این پوشش‌های نوین پرداخته می‌شود و در نهایت در بخش ضمائم اطلاعات لازم در این زمینه ارایه می‌شوند.

از دوستان و همکاران محترم که ما را در تهیه، تدوین و ویرایش این کتاب یاری کرده‌اند صمیمانه تشکر می‌کنیم. همچنین لازم می‌دانیم تشکر مخصوص خود را به جناب آقای مهندس اسعد اسعدی (واحد تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی)، سرکار خانم دکتر فرشته رضایی (واحد پوشش و رنگ) و دکتر محسن محسنی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر) و دیگر همکاران در مرکز نشر پژوهشگاه صنعت نفت، که دلسوزانه ما را در ویرایش این کتاب یاری کردند، تقدیم کنیم.

از اساتید، دانشجویان و دوستان محترم صمیمانه تقاضا داریم هر گونه نقص و اشکال را در این کتاب مستقیماً به ما اطلاع دهند تا با رفع آنها بر کیفیت آن افزوده شود.

محمد شایگانی

آرام اسعدی

بهار ۱۳۹۰

shayegan8@yahoo.com
asaadi.aram@yahoo.com

درباره نویسنده

دکتر سودانگشو باس^۱ کارفرما و مدیر شرکت پرات و ویتنی^۲ (تولیدکننده توربین‌های گازی و موتورهای جت) و همچنین استاد مجرب انستیتو پلی تکنیک رنسلر در شهر تروی نیویورک است. وی مدرک دکترای تخصصی خود را در رشته مهندسی و علم مواد از دانشگاه برکلی کالیفرنیا و مدرک لیسانس افتخاری و فوق لیسانس خود را در رشته فیزیک از دانشگاه رانچی هند گرفته است. دکتر باس سابقه‌ای طولانی در زمینه تدریس در رشته فیزیک دارد و در سالیان گذشته، برای تکمیل دفاعیه خود برای اخذ مدرک دکترای تحقیقاتی در زمینه طبقه‌بندی تفرق اشعه ایکس در کارنامه کاری خود داشته است. در طول ۲۹ سال اخیر که در شرکت پرات و ویتنی مشغول به کار بوده، دکتر باس مدیریت و انجام تحقیقات و توسعه را در زمینه مواد پیشرفته و فرایندهایی از جمله اکسید شدن و خوردگی در واحدهای سوختی و موتورهای توربین‌های گازی، کاتالیست‌ها، پوشش‌های دما بالا، سوپرآلیاژها، دوفلزی‌ها و شبکه‌های کامپوزیت سرامیک‌ها بر عهده داشته است. وی تاکنون ۱۴ مقاله ارائه کرده و به ادامه تدریس در زمینه آلیاژهای دما بالا و پوشش‌های آنها در دوره‌هایی که شرکت پرات و ویتنی در شهر رنسلر برگزار می‌کند مشغول است.

^۱ Sudhangshu boss
^۲ Pratt & Whitney

پیشگفتار

ایدهٔ تألیف کتابی در زمینهٔ پوشش‌های دما بالا برخاسته از نیاز به یک واحد درسی طولانی برای دانشجویان مهندسی مواد بود. این کتاب همچنین می‌تواند یک مرجع عملی برای متخصصان باشد و حاصل سال‌ها تجربهٔ مؤلف در زمینه تدریس و آزمایش‌های او است که تمام مباحث را به صورت متعادل و منطقی گردآوری کرده و به رشته تحریر در آورده است.

پوشش دادن در دمای بالا به یک تکنولوژی مهم گفته می‌شود که از نظر اقتصادی پرمفعت و از نظر عقلانی سودمند است و زمینه توسعه‌ای سریع دارد. این موضوع نیازمند مفاهیمی پایه از مواد، اصول متالورژی فیزیکی و شیمی، برهم‌کنش‌های محیطی، علوم فرآیند و تکنیک‌های ساخت و تولید است. اطلاعاتی فراوان درباره اهداف مختلف ناشی از اعمال این نوع پوشش‌ها موجوداند، اگر چه این اطلاعات را تولیدکنندگان شخصی و کسانی که در زمینه پوشش دادن کار می‌کنند در هزاران مجله تکنیکی، مقالات ارایه‌شده در کنفرانس‌ها، هندوک‌ها و کتاب‌ها به شکلی پراکنده گزارش و چاپ کرده‌اند. همچنین لایراتوارهای ملی و سازمان‌های دیگر نیز اطلاعاتی را در این زمینه ارایه کرده‌اند. با این حال، نویسنده تلاش کرده که به اکثر این منابع اطلاعاتی دست یابد و از تجربیات شخصی خود در طی ربع قرن تجربه کاری در زمینه صنعت هوافضا نیز بهره گرفته است.

کسانی که قصد استفاده از این کتاب را دارند، باید اطلاعاتی ابتدایی از فیزیک و شیمی داشته باشند. مفاهیم اساسی شامل ترمودینامیک و اصول سینتیک و همچنین فازها و نمودارهای فازی در فصل اول تشریح شده‌اند. مفاهیم اصلی آلیاژهای ساختاری به کار رفته در فرآیندهای دما بالا و تجهیزات آنها، خصوصاً در موتورهای توربین‌های گازی که نیازمند پوشش‌های مقاوم در دمای بالا هستند، نیز در بخشی جداگانه توضیح داده شده‌اند. برهم‌کنش‌های محیطی شامل اکسید شدن و خوردگی در دمای بالا در فصل‌های چهارم و پنجم بررسی شده‌اند. بحث پوشش‌های فلزی برای حفاظت در برابر اکسید شدن و خوردگی در فصل ششم، با ارایه جزئیات فرآیندهای مربوطه و مشخصه‌ها و خواص آنها آمده است. تعدادی از فرآیندهایی که به صورت سنتی در صنعت الکترونیک برای رسوب‌دهی لایه‌های نازک استفاده شده‌اند، به دلیل مشخصه‌های منحصر به فرد و تطبیق روزافزون اما کنندشان برای رسوب‌دهی پوشش‌های ضخیم‌تر برای حالات خاص، لحاظ شده‌اند. پوشش‌های ممانعت‌کننده حرارتی (TBC)¹ که برای حفاظت در برابر حرارت به کار می‌روند در فصل هفتم بررسی شده‌اند. برای درک آسان‌تر و روان‌تر، این فصل به سه بخش تقسیم

¹ Thermal Barrier Coatings

شده که با یک مقدمه در ابتدا شروع می‌شود؛ سپس بحث‌های پاشش پلاسما TBC در بخش میانی و پرتو الکترونی TBC نیز در انتها مطرح می‌شوند و مراجع تمام این بخش‌ها در انتهای هر فصل ارایه شده‌اند. بازرسی‌های غیرمخرب، تعمیر پوشش‌ها و تجربیات در زمینه پوشش‌دهی در این زمینه در سه فصل آخر آمده‌اند. مأخذهای فراوان برای خوانندگان ارایه شده‌اند تا بتوانند به منابع اصلی مراجعه کنند.

مؤلف بهره فراوان از همکاری در کنار بسیاری از پیشگامان صنعت از گذشته تاکنون برده که از آن جمله می‌توان به دکتر بیل گوارد اشاره کرد که از ایشان به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در طول مدت تألیف این کتاب متشکرم. همچنین از پروفسور فرد پتی^۱ از دانشگاه پیتزبورگ^۲، پروفسور دیوید کلارک^۳ از دانشگاه کالیفورنیا در سانتا باربارا^۴، پروفسور ماری گل^۵ از دانشگاه Jell کانکتیکت^۶ و دکتر باب میلر^۷ در مرکز تحقیقات گلن^۸ در سازمان ناسا^۹ نیز بسیار سپاسگزارم.

همچنین از تمام افرادی که در زمینه پوشش دادن در دمای بالا تلاش و با ارایه نظرات و پیشنهادها خود من را در بهبود این کتاب یاری کرده‌اند متشکرم.

تشکر مخصوص من به پروفسور ارنستو گوتیرز-میراوه^{۱۰} از شهر رنسلر تقدیم می‌شود که مرا در این زمینه تشویق کردند.

آقای جوئل استاین^{۱۱} از انتشارات الزویر^{۱۲} با ارایه پیشنهاد، تشویق من و کمک در انتخاب لغات مناسب، نهایت همکاری و کمک را از ابتدای شروع به کار این پروژه داشته‌اند که تشکری خالصانه را به ایشان مدیون هستم. تشکر ویژه دارم از ویراستار انتشارات الزویر، شلی پالن^{۱۳}، به خاطر کمک به ویرایش کتاب، و جولی آچز^{۱۴}، به خاطر تلاش بی وقفه‌اش در آماده کردن متن اولیه این کتاب.

پیشاپیش به خاطر هر گونه اشتباه و یا از قلم افتادگی احتمالی منابع و مطالب در این کتاب پوزش می‌خواهم.

از تمام صاحبان منابع و تألیفات زیر، که از داده‌ها، جداول، تصاویر و تجربه‌های آنها در این کتاب یاد شده است، بسیار متشکرم:

الزویر، انتشارات جان وایلی و پسران^{۱۵}، انتشارات اسپرینگر^{۱۶}، انتشارات تیلور و فرانسیس^{۱۷}،

^۱ Fred Pettit

^۲ Pittsburgh

^۳ David Clarke

^۴ Santa Barbara

^۵ Maury Gell

^۶ Connecticut

^۷ Bob Miller

^۸ Glenn Research Center

^۹ NASA

^{۱۰} Ernesto Gutierrez-Miravete

^{۱۱} Joel Stein

^{۱۲} Elsevier

^{۱۳} Shelly Palen

^{۱۴} Julie Ochs

^{۱۵} John Wiley & Sons Inc.

^{۱۶} Springer

^{۱۷} Taylor and Francis

انتشارات مانی^۱، انتشارات بلک‌ول^۲، انجمن مواد معدنی، مواد و فلزات^۳ (TMS)، انجمن بین‌المللی مواد آمریکا^۴ (ASM)، انجمن سرامیک آمریکا^۵، انجمن مهندسان مکانیک آمریکا^۶ (ASME)، مؤسسه فیزیک آمریکا^۷، نامه‌های علوم و فناوری^۸، نقدهای سالانه^۹، انجمن ملی مهندسان خوردگی^{۱۰} (NACE)، جامعه الکتروشیمی^{۱۱}، شرکت پراکسیر تکنولوژی^{۱۲}، شرکت سولزر-متکو^{۱۳}، پروفسور جاگندر سینگ^{۱۴} (دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا)^{۱۵}، دکتر جیم اسمیالک^{۱۶} و نیز دکتر باب میلر از مرکز تحقیقات گلن سازمان ناسا، دکتر توماس استرانگمن^{۱۷} از گروه انرژی دانشگاه هانیول^{۱۸}، نیروی هوایی آمریکا^{۱۹} و سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^{۲۰} در نهایت از شرکت پرات و ویتنی به خاطر دادن مجوز استفاده از مثال‌های زده‌شده در این کتاب در زمینه پوشش‌ها، سخت‌افزارهای موتور پوشش‌داده‌شده، مطالب منتشرشده و تصاویر پره‌های توربینی، که یکی از آنها روی جلد کتاب چاپ شده است، متشکرم.

سودانگشو باس

امریکا، کانکتیکت، منچستر

۲۰۰۷

Sudhabose@gmail.com

- ¹ Taylor and Francis
- ² Blackwell Publishers
- ³ The Minerals, Metals and Materials Society (TMS)
- ⁴ The International American Society of Materials (ASM)
- ⁵ American Ceramic Society
- ⁶ American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- ⁷ American Institute of Physics
- ⁸ Science and Technology Letters
- ⁹ Annual Reviews
- ¹⁰ National Association of Corrosion Engineers
- ¹¹ The Electrochemical Society
- ¹² Praxair Technologies
- ¹³ Sulzer-Metco
- ¹⁴ Jogender Singh
- ¹⁵ Pennsylvania State University
- ¹⁶ Jim Smialek
- ¹⁷ Thomas Strangman
- ¹⁸ Honeywell
- ¹⁹ United States Airforce
- ²⁰ the National Aeronautic and Space Administration