

پوشش‌های سد حرارتی

Thermal Barrier Coatings

مؤلفین:

حسین جمالی؛ راحله احمدی پیدانی

رضا مظفری‌نیا؛ رضا شجاع‌رضوی

عنوان و نام پدیدآور: پوشش‌های سد حرارتی / مولفین: حسین جمالی ... (و دیگران).
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۳.

وضعیت فهرست‌نویسی: فیها

ادداشت: مولفین: حسین جمالی، راحله احمدی پیدانی، رضا مظفری نیا، رضا شجاع رضوی.

موضوع: عایق‌ها و عایق‌سازی حرارتی

شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی مالک اشتر

شناسه افزوده: جمالی، حسین، ۱۳۶۳

کتابشناسی ملی: ۲۴۹۳۳۱۰

رده بندی دیویی: ۶۹۳/۸۳۲

رده بندی کنگره: ۱۳۹۳/پ۹/THV۱۵



انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

معاونت پژوهش و فناوری

عنوان کتاب: پوشش‌های سد حرارتی

مولفین: مهندس حسین جمالی، مهندس راحله احمدی پیدانی،

دکتر رضا مظفری نیا، دکتر رضا شجاع رضوی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

طرح روی جلد: فریناز عسگری

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

صفحه‌آرایی رایانه‌ای: سامانه زمانی جباری

ویراستار ادبی: سامانه زمانی جباری

شمارگان: ۱۰۰ جلد

نوبت چاپ: چهارم، ۹۳

قیمت: ۱۷۰,۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-5665-90-1

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۶۶۵-۹۰-۱

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز فناوری اطلاعات و مدیریت دانش.

مدیریت انتشارات، تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

پیش‌گفتار

دست‌یاب به فناوری موتورهای توربینی پیشرفته، نیازمند ارتقاء در طراحی اجزای موتور و بنابراین افزایش توانایی حرارتی و مکانیکی مواد مورد استفاده در ساخت آنها است. یکی از روش‌های نوین و بسیار کارآمد در بهبود عملکرد موتورهای توربینی، استفاده از فناوری پوشش‌های سد حرارتی است. بیش از چند دهه از ظهور و به کارگیری این پوشش‌ها نگذشت، اما در همین مدت نیز پیشرفت‌های فراوانی در زمینه مواد مورد استفاده و روش‌های اعمال آنها حاصل شده است؛ به گونه‌ای که در دنیای صنعتی امروز، پوشش‌های سد حرارتی بخش جدانشدنی اجزای داغ موتورهای توربینی گازی هوایی و پایه‌زمینی و حتی موتورهای پرتاب به شمار می‌روند. در ایران نیز در چند سال اخیر، پژوهش‌های به‌نسبت پراکنده در زمینه پوشش‌های سد حرارتی و بررسی ویژگی‌های آنها توسط پژوهش‌گران برخی از دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی صنعتی انجام گرفته است، اما متأسفانه این پژوهش‌ها به صورت پراکنده و ناهماهنگ بوده و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. هم‌چنین، با وجود قابلیت‌های زیاد و اثبات شده این پوشش‌ها، هنوز پای این فناوری آن‌چنان که باید به صنایع کشور باز نشده است. دلیل این امر را می‌توان نبود مرجعی کامل برای معرفی اصول، قابلیت‌ها و کاربرد پوشش‌های سد حرارتی دانست.

هدف از نگارش این کتاب، تدوین مجموعه کاملی از اطلاعات طبقه‌بندی شده در زمینه پوشش‌های سد حرارتی است. در گردآوری مطالب این کتاب، نهایت کوشش خود را برای استفاده از به‌روزترین پژوهش‌های دنیا به کار گرفته‌ایم، باشد که مورد رضایت استادان، دانشجویان و پژوهش‌گران دانشگاه و صنعت قرار گیرد.

کتاب حاضر مشتمل بر هفت فصل است. فصل اول شامل مقدمه است. در فصل دوم، مبانی علمی و اصول کلی پوشش‌های سد حرارتی تشریح شده است. فصل‌های سوم و چهارم به ترتیب شامل بررسی و تشریح پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده بر کمک فیلندهای APS و EB-PVD (دو شیوه اصلی رسوب‌دهی این پوشش‌ها) می‌شود. روش‌های جدید رسوب‌دهی پوشش‌های سد حرارتی و بررسی خواص این پوشش‌ها در فصل پنجم ارزیابی شده است. در فصل ششم، مهم‌ترین روش‌های اصلاح پوشش‌های سد حرارتی معرفی شده و در نهایت، در فصل هفتم برخی از کاربردهای پوشش‌های سد حرارتی بیان شده است.

در پایان، بر خود لازم می‌دانیم از تمامی دوستان و همکاران عزیز در دانشگاه صنعتی مالک اشتر که در تمام مراحل انجام این کتاب کوششی و نگارش این کتاب صمیمانه در کنار ما بودند و از نظرات ارزشمند ایشان استفاده کردیم، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

راحله احمدی پیدانی، حسین جمالی، رضا مظفری‌نیا؛ رضا شایان‌سوی

بهار یک‌هزار و سیصد و نود و سه

فهرست مطالب

۳	فصل نخست: مقدمه
۳	۱-۱- محیط‌ها دما بالا
۶	۲-۱- ضرورت پوشش‌های سد حرارتی
۱۱	فصل دوم: مبانی پوشش‌های سد حرارتی
۱۱	۱-۲- مقدمه
۱۶	۲-۲- پیکربندی پوشش سد حرارتی
۱۸	۳-۲- تاریخچه پوشش‌های سد حرارتی
۲۰	۴-۲- نیازمندی‌های مواد برای پوشش‌های سد حرارتی
۲۲	۵-۲- زیرکنیا
۲۴	۶-۲- زیرکنیای پایدار شده با ایتریا
۳۰	۷-۲- آستری
۳۰	۱-۷-۲ پوشش‌های تفوذی
۳۴	۲-۷-۲ پوشش‌های روکشی
۳۹	۸-۲- فواید پوشش‌های سد حرارتی
۴۰	۹-۲- تئوری هدایت حرارتی در سرامیک‌های زیرکنیایی

۱۰-۲- چگونگی کاهش دما به وسیله پوشش‌های سد حرارتی ۴۳

۱۱-۲- پوشش‌های سد حرارتی ضخیم ۴۶

۱۲-۲- روش‌های اعمال پوشش‌های سد حرارتی ۴۸

۱-۱۲-۲- پاشش پلاسمایی اتمسفری ۴۹

۲-۱۲-۲- رسوب فیزیکی بخار به کمک پرتو الکترونی ۵۰

۳-۱۲-۲- روش‌های رسوب‌دهی جدید ۵۱

فصل ۵۵- پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند پاشش پلاسمایی

۱-۳- مقدمه ۵۵

۲-۳- فرایند پاشش حرارتی ۵۶

۳-۳- فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری ۵۹

۱-۳-۳- اصول فرایند ۵۹

۲-۳-۳- تجهیزات فرایند ۶۳

۳-۳-۳- پارامترهای فرایند ۶۴

۴-۳- پوشش‌های سد حرارتی ۶۷

۱-۴-۳- ریزساختار ۶۷

۲-۴-۳- هدایت حرارتی ۷۶

۳-۴-۳- خواص مکانیکی ۸۰

۴-۴-۳- تنش‌های پسماند ۸۱

۵-۴-۳- دوام و پایداری ۸۳

۶-۴-۳- خوردگی داغ ۸۷

۷-۴-۳- سازوکار شکست ۹۱

فصل چهارم: پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند EB-PVD ۹۵

۹۵ ۱-۴-۱ مقدمه

۹۶ ۲-۴-۱ اصول کلی فرایند EB-PVD

۱۰۵ ۳-۴-۱ پوشش‌های سد حرارتی

۱۰۵ ۱-۲-۴-۱ ریزساختار

۱۱۴ ۲-۳-۴-۱ خواص حرارتی

۱۱۵ ۱-۳-۴-۱ انبساط حرارتی

۱۱۵ ۲-۳-۴-۱ هدایت حرارتی

۱۱۹ ۳-۳-۴-۱ ضریب نفوذ حرارتی

۱۱۹ ۳-۳-۴-۱ دوام و پایداری

۱۲۱ ۱-۳-۳-۴-۱ رخنه کردن و نشتی‌های محیطی

۱۲۳ ۲-۳-۳-۴-۱ خوردگی داغ

۱۲۳ ۳-۳-۳-۴-۱ خسارت ناشی از فرایش

۱۲۹ ۴-۳-۳-۴-۱ خسارت شعله خارجی

۱۳۰ ۵-۳-۳-۴-۱ خسارت ناشی از تغییرات در TGO

۱۳۱ ۶-۳-۳-۴-۱ نقش تنش‌های پسماند

فصل پنجم: پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند ماده‌های جدید ۱۳۲

۱۳۷ ۱-۵-۱ مقدمه

۱۳۷ ۲-۵-۱ رسوب شیمیایی بخار

۱۳۹ ۱-۲-۵-۱ اصول فرایند

۱۴۱ ۱-۱-۲-۵-۱ سازوکار رسوب‌دهی

۱۴۲ ۲-۱-۲-۵-۱ پیش‌ماده‌های شیمیایی و شیمی واکنش

- ۱۴۳..... ۵-۲-۱-۳- پارامترهای فرایند
- ۱۴۴..... ۵-۲-۲- مزایا و معایب فرایند CVD
- ۱۴۵..... ۵-۲-۳- انواع شیوه‌های CVD
- ۱۴۶..... ۵-۲-۴- پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند CVD
- ۱۴۷..... ۵-۲-۴-۱- پوشش‌های YSZ تولید شده توسط فرایند CVD حرارتی
- ۵-۲-۴-۲- پوشش‌های YSZ تولید شده توسط فرایند رسوب بخار به کمک
- ۱۵۰..... پوشش الکترواستاتیک
- ۱۵۱..... ۵-۲-۴-۳- پوشش‌های YSZ تولید شده توسط فرایند CVD پلاسمایی
- ۱۵۳..... ۵-۲-۴-۴- پوشش‌های YSZ تولید شده توسط فرایند CVD لیزری
- ۱۵۴..... ۵-۳- رسوب بخار ایت شده به کمک پرتو الکترونی
- ۱۵۷..... ۵-۳-۱- فرایند
- ۱۶۵..... ۵-۳-۲- پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند DVD
- ۱۶۵..... ۵-۳-۱-۲- ریزساختار
- ۱۶۷..... ۵-۳-۲- هدایت حرارتی
- ۱۶۹..... ۵-۴- پوشش پلاسمایی سوسپانسیونی
- ۱۷۲..... ۵-۴-۱- اصول فرایند
- ۱۷۲..... ۵-۴-۱-۱- آماده‌سازی سوسپانسیون
- ۱۷۳..... ۵-۴-۱-۲- انتقال و تزریق سوسپانسیون به داخل جت
- ۱۷۶..... ۵-۴-۱-۳- پدیده‌های قابل وقوع در تماس قطره‌های کوچک با جت
- ۱۷۸..... ۵-۴-۱-۴- تشکیل ریزساختار
- ۱۷۸..... ۵-۴-۲- پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند SPS
- ۱۸۱..... ۵-۵- پوشش پلاسمایی پیش‌ماده محلول
- ۱۸۲..... ۵-۵-۱- اصول فرایند

۱۸۴	آماده‌سازی محلول.....۱-۱-۵-۵
۱۸۵	انتقال و تزریق مایع به داخل جت.....۲-۱-۵-۵
۱۸۵	پدیده‌های قابل وقوع در تماس قطره‌های مایع با جت.....۳-۱-۵-۵
۱۸۷	تشکیل ریزساختار.....۴-۱-۵-۵
۱۹۲	پوشش‌های سد حرارتی رسوب داده شده به کمک فرایند SPPS.....۲-۵-۵
۱۹۷	فصل ششم: اصلاح پوشش‌های سد حرارتی
۱۹۷	۱- مقدمه.....۱-۲-۶
۱۹۸	۱-۲-۶ اصلاح اختاری.....۱-۲-۶
۱۹۸	۱-۲-۶ اصلاح با استفاده از شیب‌دار (FGM).....۱-۲-۶
۲۰۰	۲-۲-۶ پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار.....۲-۲-۶
۲۰۰	۱-۲-۲-۶ موثر نانو ساختار.....۱-۲-۲-۶
۲۰۳	۲-۲-۲-۶ پودرهای سرامیکی پوشش‌دار آگلومره شده.....۲-۲-۲-۶
۲۰۶	۳-۲-۲-۶ پاشش حرارتی پودرهای سرامیکی نانو ساختار آگلومره شده.....۳-۲-۲-۶
۲۰۷	۴-۲-۲-۶ ریزساختار.....۴-۲-۲-۶
۲۱۴	۵-۲-۲-۶ هدایت حرارتی.....۵-۲-۲-۶
۲۱۶	۶-۲-۲-۶ استحکام چسبندگی.....۶-۲-۲-۶
۲۱۷	۷-۲-۲-۶ رفتار سیکل حرارتی.....۷-۲-۲-۶
۲۱۸	۸-۲-۲-۶ رفتار خوردگی داغ.....۸-۲-۲-۶
۲۱۹	۹-۲-۲-۶ اثرات سینترینگ.....۹-۲-۲-۶
۲۲۰	۳-۲-۲-۶ اصلاح سطحی لیزری.....۳-۲-۲-۶
۲۲۲	۱-۳-۲-۶ ریزساختار حاصل از ذوب سطحی لیزری.....۱-۳-۲-۶
۲۲۴	۲-۳-۲-۶ مقاومت به خوردگی داغ.....۲-۳-۲-۶
۲۲۶	۳-۳-۲-۶ مقاومت به شوک حرارتی.....۳-۳-۲-۶

۲۲۷	۳-۶- اصلاح شیمیایی
۲۲۷	۱-۳-۶- استفاده از پایدارکننده‌های جدید
۲۳۰	۱-۱-۳-۶- زیرکنیای پایدار شده با سریا و ایتریا
۲۳۴	۲-۱-۳-۶- زیرکنیای پایدار شده با اسکاندیا و ایتریا
۲۳۷	۲-۳-۶- مواد جدید
۲۳۸	۱-۲-۳-۶- پایروکلرها
۲۴۱	۲-۲-۳-۶- هگزآلومینات‌ها
۲۴۲	۳-۲-۱- پروسکیت‌ها
۲۴۹	فصل هفتم پوشش‌های سد حوراتی
۲۴۹	۱-۷- مقدمه
۲۵۰	۲-۷- موتورهای توربینی آبی
۲۵۰	۱-۲-۷- محفظه
۲۵۲	۲-۲-۷- پلت‌فورم تیغه
۲۵۵	۳-۲-۷- مقطع آیرودینامیکی تیغه
۲۵۶	۴-۲-۷- پره‌ها و تیغه‌های توربین
۲۵۹	۳-۷- موتورهای توربینی گازی صنعتی
۲۶۰	۴-۷- نیروگاه برق سیکل ترکیبی تبدیل زغال‌سنگ
۲۶۲	۵-۷- موتورهای دیزلی
۲۶۹	منابع