

بررسی تجربی آثار خستگی حرارتی و بارگذاری خمشی ثابت بر واماندگی یک نمونه پوشش سد حرارتی

محمد صادقی^۱، حسین ابراهیمی^۲، حسین عربی^۳، علیرضا میرحبیبی^۴، سهیل نخودچی^۵، حسین بدر رضایی^۶
۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، m_sadeghi4491@metaleng.iust.ac.ir
۲ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۳ استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۴ دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۵ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۶ کارشناس شرکت مهندسی ساخت و توربین مینا (توگا)، کرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

چکیده

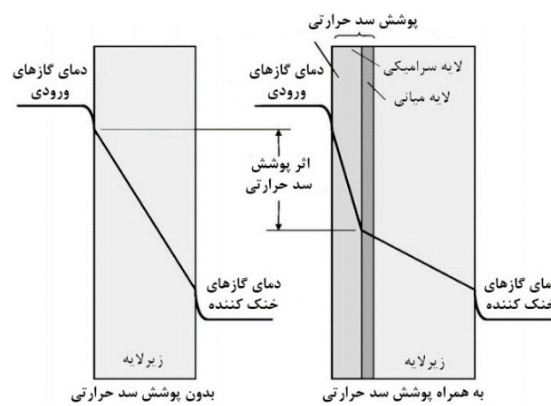
در این پژوهش واماندگی پوشش‌های سد حرارتی تحت تأثیر بارگذاری حرارتی سیکلی و بار مکانیکی ثابت به صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش‌های تجربی روی نمونه‌هایی انجام شده است که از جنس آلیاژ اینکونل ۶۱۷^۱ بوده و با پوشش‌های سد حرارتی دولایه شامل پوشش پیوندی $Ni22Cr10Al1Y$ و پوشش فوقانی $ZrO2.8wt\%Y2O3$ و به روش پاشش پلاسما در محیط هوا پوشش‌دهی شده‌اند. نمونه‌ها توسط یک دستگاه خستگی حرارتی که به طور خاص برای انجام آزمایش‌های این تحقیق طراحی و ساخته شده است، آزمایش شده‌اند. نمونه‌ها در شرایط بیشینه دمایی ۱۱۰۰ و ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و تحت بار خمشی که از طریق دستگاه به نمونه‌ها داده می‌شوند، آزمایش شده‌اند. نتایج با آزمایش‌هایی که بدون اعمال بار خمشی انجام شده است مقایسه شده است. در هر سیکل، زمان حرارت‌دهی نمونه‌ها تقریباً ۱۰ دقیقه و زمان سردکردن آنها تقریباً ۵ دقیقه بوده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش، نشان داد که با بارگذاری‌های متفاوت، سازوکارهای تخریب پوشش‌های سد حرارتی تغییر می‌کند و طول عمر پوشش با افزایش درجه حرارت بیشینه سیکل به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش بارگذاری مکانیکی بر کاهش طول عمر خستگی حرارتی پوشش‌های سد حرارتی نیز تأثیر قابل توجهی دارد.

واژگان کلیدی

پوشش‌های سد حرارتی، خستگی حرارتی سیکل پایین، بار مکانیکی خمشی، سازوکارهای تخریب

۱. مقدمه

گازهای داغ از جمله عوامل مهم در تخریب پره‌های توربین‌های گازی محسوب می‌شوند. این گازها شامل هوای ورودی، سوخت مشتعل به‌همراه بخار آب تزریق‌شده هستند. علاوه بر این، چون محور توربین با سرعت بالایی می‌چرد، منجر به ایجاد تنش‌های گریز از مرکز و تنش‌های ناشی از برخورد گاز در سطح پره‌ها می‌شود [۱-۲]. عوامل دیگری چون شوک حرارتی، تنش‌های خستگی و بارهای ضربه‌ای منجر به ایجاد شرایط کاری بسیار سخت برای پره‌های توربین می‌گردد [۳]. ایجاد یک عایق حرارت روی پره‌های توربین با کاهش دمای سطح پره می‌تواند سبب افزایش عمر این قطعات شود [۴]. به‌طور کلی، این پوشش‌ها روی محفظه داخلی موتورهای هوایی و پره‌های توربین‌های گازی، که در صنایع هوافضایی کاربرد فراوان داشته و تحت شرایط دمای بالا قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۱ چگونگی تأثیر این پوشش‌ها را روی دمای سطح قطعه کار نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از کاهش میزان حرارت

در فصل مشترک پوشش سد حرارتی ایجادشده با زیرلایه [۵]

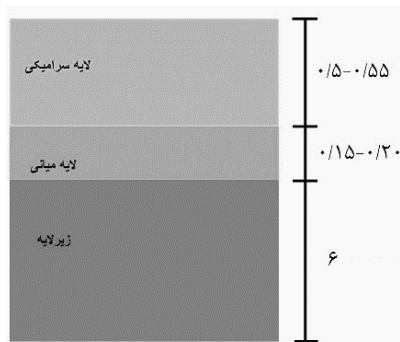
پوشش‌های سد حرارتی معمولاً از سه لایه تشکیل می‌شوند که شامل یک لایه میانی فلزی، یک لایه اکسید رشدیافته حرارتی و یک پوشش فوقانی سرامیکی است و روی قطعات در معرض حرارت بالا، که از جنس سوپر آلیاژ هستند، اعمال می‌شوند. پوشش فوقانی سرامیکی با ضخامت تقریبی ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر و معمولاً از جنس زیرکونیای پایدار شده با ایتریا^۲ بوده و دلیل استفاده از آن هدایت حرارتی پایین و ضریب انبساط حرارتی نسبتاً بالای آن است. معمولاً این پوشش‌ها با استفاده از فرایند پاشش پلاسما یا رسوب‌دهی فیزیکی بخار با پرتو الکترونی روی

پوشش‌های پیوندی نشانده می‌شوند. پوششی که به‌وسیله پاشش پلاسما اعمال شود، حاوی پاشه‌ها^۳، تخلخل‌ها و شبکه‌ای از ریزترک‌هاست که باعث کاهش هدایت حرارتی و افزایش مقاومت به کرنش پوشش می‌شود [۶-۷].

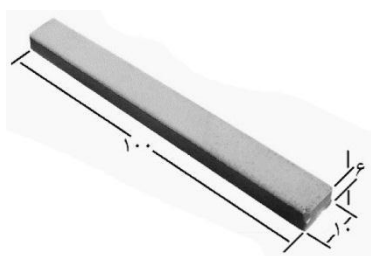
لایه اکسید رشدیافته حرارتی لایه‌ای است که در فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی سرامیکی تشکیل می‌شود و بر پایداری پوشش تأثیر می‌گذارد. همچنین این لایه، که از جنس اکسید آلومینیوم یا α -آلومیناست، خود به‌عنوان عایقی در برابر نفوذ اکسیژن بوده و در مقابل اکسایش مقاومت می‌کند [۸]. پوشش پیوندی^۴ یک لایه آلیاژ فلزی با خواص مکانیکی خوب است که به‌عنوان یک منبع آلومینیوم برای تشکیل α -آلومینا عمل می‌کند [۶]. این لایه از جنس $MCrAlY$ یا $(Pt,Ni)Al$ با ضخامت ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر بوده که در فرمول متداول آن؛ یعنی $MCrAlY$ ، نماد M مخفف نیکل یا کبالت و یا ترکیبی از هر دو است. خواص و ویژگی‌های پوشش پیوندی می‌تواند بر ریزساختار و ریخت‌شناسی^۵ لایه اکسید رشدیافته حرارتی^۶ و درنهایت تخریب پوشش سد حرارتی اثر بگذارد [۸]. در فرایند ساخت پوشش‌های سد حرارتی، پوشش پیوندی در بالای زیرلایه اصلی تشکیل شده و یک پیوند شیمیایی بهتر بین پوشش فوقانی^۷ و زیرلایه اصلی ایجاد می‌کند. خواص مکانیکی و حرارتی لایه‌های نمونه‌های تست‌شده در جدول ۱ آورده شده است [۹].

پژوهش‌های تجربی نسبتاً اندکی درباره آثار بارگذاری مکانیکی خمشی به‌همراه بارگذاری حرارتی روی پوشش‌های سد حرارتی انجام شده است. کوسوک و همکاران با انجام آزمایش خمش چهارنقطه‌ای بر آثار روش پاشش پلاسما روی خواص مکانیکی ایتریای پایدارشده با زیرکونیا مطالعه کردند [۱۰]. ایوانز و همکاران آزمون‌های تجربی بسیاری روی پوشش‌های سد حرارتی انجام دادند و اثر روش آزمایش را بر واماندگی و دوام پوشش‌ها مطالعه کردند [۱۱]. آزمایش‌های متفاوتی از جمله تست کشش و خمش در حالت خستگی و ثابت به‌همراه بارگذاری‌های حرارتی روی پوشش‌ها انجام شده است. یامازاکی و همکاران با استفاده از تست خمش چهارنقطه‌ای روی نمونه‌ای که پوشش دو تکه دارد به بررسی و تعیین مقاومت جدایش در پوشش‌های سد حرارتی پرداختند [۱۲].

مدار کنترل تشکیل می‌شود. محفظه دستگاه، که هم نقش کوره دارد و هم نقش محیط خنک‌کننده، دارای ابعاد داخلی $120 \times 120 \times 80$ میلی‌متر و دیواره‌هایی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر است. در شکل ۴ تصویری از دستگاه تست ارائه شده و اجزای آن مشخص شده است.



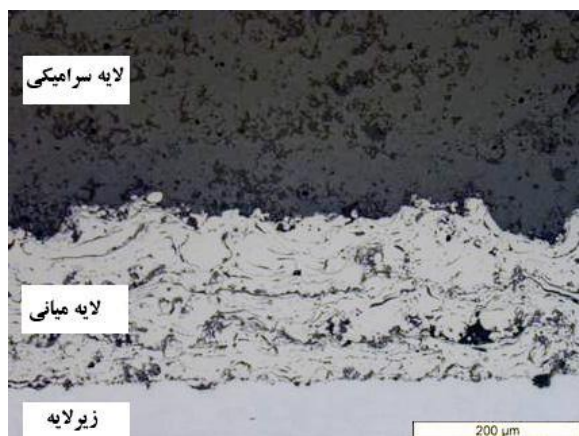
(الف)



(ب)

شکل ۲. نمایی شماتیک از

(الف) سطح مقطع عرضی نمونه بعد از پوشش دهی، (ب) نمونه پوشش داده شده قبل از انجام آزمایش (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع عرضی پوشش قبل از انجام آزمایش خستگی حرارتی

همچنین مائو و همکاران تحقیق آزمایشگاهی بر جدایش ناشی از کمناش مقیاس بزرگ و آثار تخریب از لبه روی نمونه‌های پوشش‌های سد حرارتی داشتند [۱۳]. شین و همکاران نیز براساس کارهای تجربی و مدلسازی اجزای محدود واماندگی پوشش‌های سد حرارتی روی نمونه قرص شکل تحت آزمایش خستگی حرارتی و آزمایش چسبندگی بررسی نمودند [۱۴]. در یکی از جدیدترین پژوهش‌ها، اسلامکا و همکاران با انجام آزمایش خستگی خمشی و شبیه‌سازی اجزای محدود در دو حالت با در نظر گرفتن و نگرفتن لایه اکسید، واماندگی و عوامل مؤثر بر آن را در پوشش‌های سد حرارتی مورد بررسی قرار دادند [۱۵].

۲. آزمون‌های تجربی

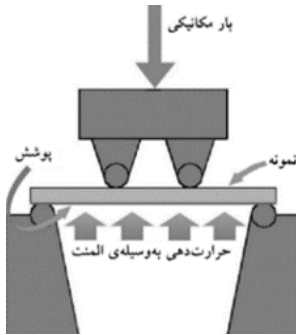
۲-۱. نمونه‌های آزمایش

نمونه‌ها در ابعاد $100 \times 10 \times 6$ میلی‌متر تهیه و سطح آنها با پاشش پلاسما در محیط هوا پوشش داده شده است. پوشش سد حرارتی اعمالی شامل یک لایه پوشش پیوندی فلزی^۸ با ضخامت تقریبی ۱۹۰ میکرومتر و یک لایه پوشش فوقانی سرامیکی ($ZrO_2.8wt\%Y_2O_3$) با ضخامت تقریبی ۵۴۰ میکرومتر است. جنس نمونه‌ها اینکونل ۶۱۷ با میانگین ترکیب شیمیایی $Ni-23.5Cr-11.6Co-9Mo-1.3Fe-1.5Al$ است. در شکل ۲ (الف) نمایی شماتیک از مقطع عرضی نمونه و در شکل ۲ (ب) تصویر یک نمونه از نمونه‌های مورد آزمایش نمایش داده شده است.

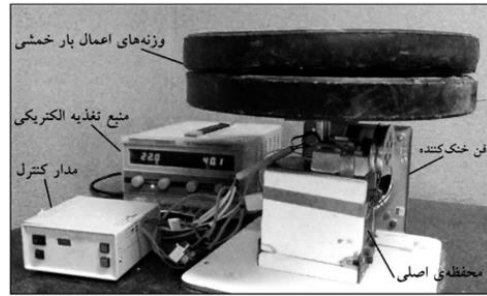
در شکل ۳ ریزساختار یکی از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی سرامیکی اتصال خوبی در مقیاس ماکرو برقرار شده است. لذا نواقص ریزساختاری چندانی در نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش وجود نداشته و پس از انجام آزمایش به بررسی نواقص، ترک‌ها و جدایش‌های رخ داده پرداخته می‌شود.

۲-۲. طراحی و ساخت دستگاه خستگی حرارتی

در این پژوهش، برای انجام آزمایش از دستگاه خستگی حرارتی، که توان اعمال بار خمشی مکانیکی چهارنقطه‌ای را به‌طور همزمان دارد، استفاده شده است. این دستگاه به سفارش شرکت مینا طراحی و ساخته شد. این دستگاه از یک محفظه، فن و یک

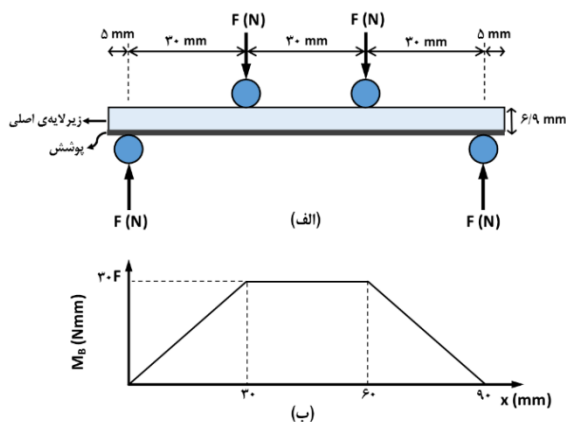


شکل ۵. نمایی از نحوه اعمال بار حرارتی به وسیله المنت و بار مکانیکی خمشی ثابت در دستگاه تست



شکل ۴. دستگاه خستگی حرارتی در حالت درب بسته هنگام اعمال بار مکانیکی

به منظور بررسی آثار بارگذاری مکانیکی بر رفتار ناشی از خستگی حرارتی در پوشش‌های سد حرارتی، برای چند نمونه در حین حرارت‌دهی بارهای مکانیکی ثابت ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ نیوتن و همچنین بدون اعمال بار مکانیکی اعمال شد. هندسه دقیق بارگذاری مکانیکی خمشی چهارنقطه‌ای، که در آزمایش‌ها اعمال می‌شود، در شکل ۶ ارائه شده است. فاصله هر دو تکیه‌گاه مجاور در این هندسه، ۳۰ میلی‌متر است و با نیروی اعمالی F نیوتن بر دو تکیه‌گاه وسط، طبق منحنی شکل ۶ (ب)، ممان خمشی ثابت M نیوتن‌میلی‌متر بین دو تکیه‌گاه وسط، بر قطعه اعمال می‌شود.



شکل ۶. نمایی از الف) هندسه بارگذاری مکانیکی خمشی چهارنقطه‌ای ب) منحنی ممان خمشی در طول قطعه برای بار اعمالی

با توجه به ابعاد تقریبی سطح مقطع نمونه (۱۰×۶/۹ میلی‌متر) و ضخامت لایه‌ها که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است، این ممان خمشی ثابت بین دو تکیه‌گاه وسط، تنشی در راستای طول قطعه یا محور x ایجاد می‌کند که توزیع آن بین دو تکیه‌گاه وسط در راستای ضخامت قطعه با توجه به خمش در تیرهای مرکب، به صورت منحنی شکل ۷ خواهد بود.

برای حرارت‌دادن نمونه‌ها از المنت‌های حرارتی و برای سردکردن آنها از یک فن با دور موتور ۲۸۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. هنگام حرارت‌دهی، درب‌های دستگاه بسته، محفظه نسبتاً ایزوله شده و المنت‌ها به صورت خودکار روشن شده و شروع به گرم‌شدن می‌کنند و هنگام سردکردن نمونه، المنت‌ها خاموش شده، دو درب محفظه باز شده و نمونه به وسیله فن تعبیه شده جلوی محفظه خنک‌کاری می‌شود. تنظیم زمان حرارت‌دهی، زمان سردکردن، باز و بسته‌شدن درب‌ها و خاموش و روشن‌شدن المنت و فن به وسیله مدار کنترل دستگاه انجام می‌شود.

۲-۳. آزمایش خستگی حرارتی تحت بار خمشی ثابت

روش انجام آزمایش به این صورت است که ابتدا نمونه به صورتی که در شکل ۵ نشان داده شده، به گونه‌ای که سطح پوشش داده‌شده آن روی بین‌های دستگاه و مقابل المنت حرارتی قرار گرفته و سپس به وسیله المنت‌های حرارتی که در زیر نمونه به موازات سطح آن قرار می‌گیرد، با تنظیمات مدار کنترل به صورت سیکلی حرارت داده می‌شود. به طور همزمان بار مکانیکی خمشی ثابت از طریق دو تکیه‌گاه فوقانی روی نمونه اعمال می‌شود. بدین ترتیب با توجه به دو تکیه‌گاه بالای نمونه و دو تکیه‌گاه پایین نمونه، هندسه بارگذاری خمشی چهارنقطه‌ای ایجاد شده است. جهت اندازه‌گیری دما در حین آزمایش، از چند ترموکوپل نوع K پایه‌بلند دارای قابلیت اندازه‌گیری دما در بازه صفر تا ۱۳۷۰ درجه سانتی‌گراد و یک ماژول دریافت داده، که مخصوص دریافت داده‌های انواع ترموکوپل است، استفاده شده است. آزمایش خستگی حرارتی همراه با اعمال بار خمشی ثابت انجام شده و با استفاده از مدار کنترل حرارتی دستگاه، سیکل حرارتی در وسط قطعه روی پوشش و روی زیرلایه اصلی (نقاط D_c و D_s) اندازه‌گیری شده است.

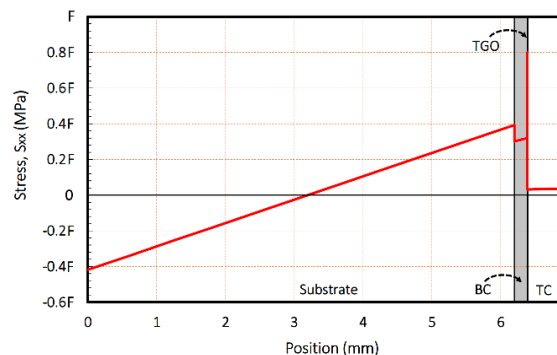
تعریف شده بیشتر شود، تخریب گزارش می‌شود. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده این حد بحرانی را ۱۰ تا ۲۰ درصد در نظر گرفته‌اند. به عبارت دیگر، اگر ۱۰ تا ۲۰ درصد کل سطح پوشش تحت بارگذاری مشخص از زیرلایه جدا شود یا ریزش کند، تخریب گزارش داده می‌شود [۱۶]. در این پژوهش نیز از این معیار برای تشخیص تخریب ناشی از آزمایش، استفاده شده است. لذا سیکل‌های حرارتی در آزمایش‌های انجام شده تا زمان تخریب ۱۵ درصد پوشش، ادامه داشته است [۱۷].

۳. نتایج

به منظور بررسی تخریب پوشش، چون از روش بازرسی چشمی استفاده می‌شود. باید بعد از هر چند چرخه آزمایش متوقف و سطح پوشش به صورت چشمی بازرسی شود. پس از تخریب حدود ۱۵ درصد پوشش در نواحی وسط نمونه، آزمایش‌ها متوقف و پروفیل سطح پوشش داده شده بررسی می‌شود. تعداد چرخه‌های اعمال شده به نمونه تا لحظه تخریب به عنوان عمر پوشش در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، پوشش فوقانی سرامیکی قبل از شروع آزمایش نیز، شامل پاشه‌هاست و در فصل مشترک آنها تخلخل‌ها و میکروتکرهایی است که در حین پوشش‌دهی ایجاد شده‌اند. البته در مقیاس ماکرو می‌توان گفت فصل مشترک پوشش فوقانی و پوشش پیوندی اتصال نسبتاً مناسبی دارد. همچنین با دقت به سطح مشترک پوشش پیوندی و زیرلایه اصلی می‌توان گفت که این دولایه تقریباً به صورت کامل به هم‌دیگر اتصال دارند.

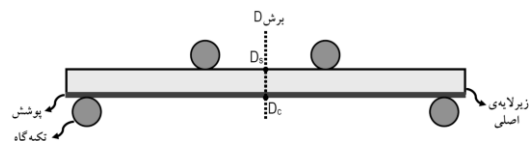
۳-۱. بررسی تعداد سیکل‌های انجام شده تا واماندگی

با توجه به شرایط و امکانات، هشت آزمایش به وسیله دستگاه تست ساخته شده با شرایط بارگذاری زیر انجام شد. نتایج در جدول ۱ به همراه تعداد سیکل انجام شده تا واماندگی نمونه‌ها خلاصه شده است. چنانچه درصد کاهش عمر پوشش را مطابق رابطه ۱ تعریف شود، نتایج جدول ۱ بیانگر این واقعیت است که افزایش درجه حرارت از ۱۱۰۰ به ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد طول عمر پوشش را تقریباً به نصف کاهش داده است. این موضوع تأثیر بسیار زیاد گرادیان حرارتی را بر طول عمر نمونه نشان می‌دهد. همچنین اعمال و افزایش بار مکانیکی خمشی تأثیر بسیار زیادی بر طول عمر خستگی حرارتی پوشش‌های سد حرارتی دارد.



شکل ۷. منحنی تنش طولی بین دو تکیه‌گاه وسط در راستای ضخامت قطعه با بار F

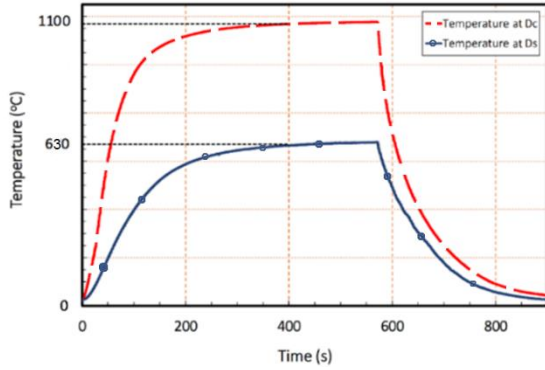
بیشینه دمای آزمایش‌های خستگی حرارتی در میانه نمونه‌ها، که در شکل ۸ نشان داده شده است، ایجاد و توسط ترموکوپل در طی سیکل‌های حرارتی اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۸. نقاط اندازه‌گیری دما روی نمونه با توجه به قرارگیری روی تکیه‌گاه‌ها

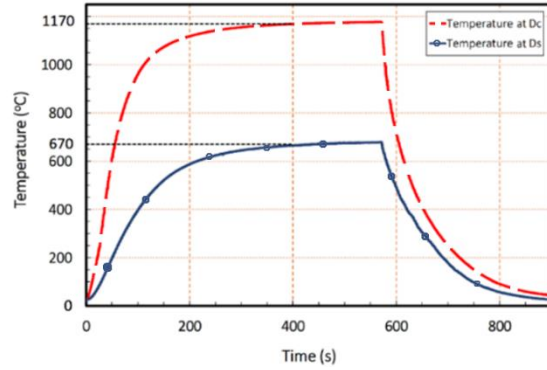
دمای گذرای نقاط D_s و D_c در شکل ۹ در مدت زمان یک سیکل حرارتی اندازه‌گیری و رسم شده است. طبق این شکل، زمان حرارت‌دهی نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای بیشینه ۱۱۷۰ درجه سانتیگراد تقریباً ۶ دقیقه، زمان سکون دمایی تقریبی در دمای بیشینه تقریباً ۴ دقیقه و زمان سرد کردن آنها تقریباً ۵ دقیقه بوده است. در آزمایش‌های انجام شده پس از ۳۶۰ ثانیه بعد از روشن شدن المنت‌ها و بسته شدن درب کوره، تغییرات دما ناچیز شده است. با تغییر در ولتاژ و جریان منبع تغذیه الکتریکی دستگاه می‌توان دمای بیشینه سیکل حرارتی را تغییر داد، لذا در آزمایش‌ها دو سیکل حرارتی نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب با دمای بیشینه ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد اعمال شده است. به منظور تشخیص تخریب در پوشش‌های سد حرارتی روش‌های زیادی وجود دارد که از آن جمله روش‌ها می‌توان به روش‌های تصویربرداری امواج حرارتی، روش نشر صوتی، اندازه‌گیری مقاومت ظاهری و بازرسی چشمی اشاره کرد.

روش بازرسی چشمی به این صورت است که اگر طول ترک‌های سطحی و یا ریزش پوشش از یک حد بحرانی



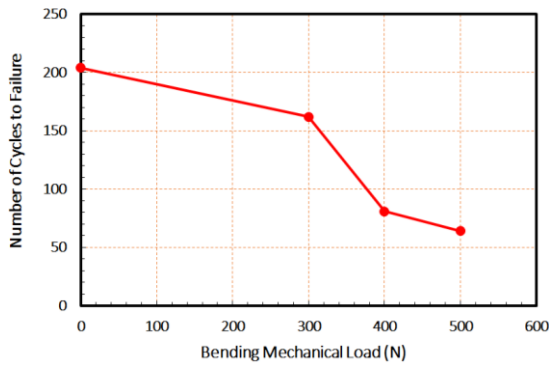
شکل ۱۰. تغییرات دمای سیکل حرارتی با دمای بیشینه ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد

در نقاط D_s و D_c



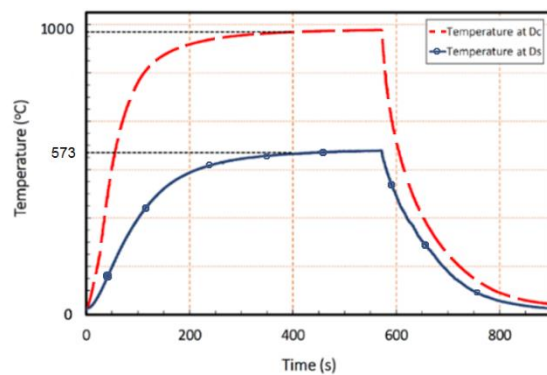
شکل ۹. تغییرات دمای سیکل حرارتی با دمای بیشینه ۱۱۷۰ درجه سانتی گراد

در نقاط D_s و D_c



شکل ۱۲. منحنی عمر نمونه‌ها در دمای بیشینه سیکل حرارتی ۱۱۷۰ درجه

سانتی گراد بر حسب بار مکانیکی خمشی



شکل ۱۱. تغییرات دمای سیکل حرارتی با دمای بیشینه ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد

در نقاط D_s و D_c

جدول ۱. شرایط انجام آزمایش خستگی حرارتی و تعداد چرخه‌ها برای حدود ۱۵ درصد تخریب پوشش

شماره آزمایش	بیشینه دما (درجه سانتی گراد)	بار اعمالی (نیوتن)	تعداد چرخه‌ها تا ۱۵ درصد تخریب پوشش
۱	۱۱۰۰	۰	۳۷۰
۲	۱۱۰۰	۴۰۰	۱۵۸
۳	۱۱۷۰	۰	۲۰۴
۴	۱۱۷۰	۳۰۰	۱۶۲
۵	۱۱۷۰	۴۰۰	۸۱
۶	۱۱۷۰	۵۰۰	۶۴

مکانیکی بر کاهش طول عمر پوشش در دماهای بالا بیشتر بوده است.

$$(1) \quad \text{عمر پوشش با اعمال بار} - \text{عمر پوشش بدون اعمال بار} = \frac{\text{عمر پوشش بدون اعمال بار}}{\text{عمر پوشش در حالت بدون اعمال بار}} \times \text{درصد کاهش عمر}$$

علاوه بر این اعمال بار مکانیکی به مقدار ۴۰۰ نیوتن به صورت خمش چهارنقطه‌ای عمر پوشش نمونه ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد را ۵۷/۳ درصد و نمونه ۱۱۷۰ درجه سانتی گراد را ۶۰/۳ درصد کاهش داده است. مشاهده می‌شود که تأثیر بارگذاری

می‌باشند، رشد نکرده‌اند بلکه ترک‌های جدید عمود بر این ترک‌ها به‌وجود آمده‌اند که نشان از تغییر سازوکار واماندگی پوشش دارد. در حالتی که بار مکانیکی اعمال نشده است، این‌طور به‌نظر می‌رسد که ترک‌های ایجادشده در سطح بالایی پوشش انرژی کافی برای رسیدن به فصل مشترک پوشش و زمینه را ندارند. این ترک‌ها که احتمالاً به‌دلیل شوک حرارتی اعمال‌شده، از رشد میکروتورک‌های موجود در پوشش فوقانی به‌وجود آمده‌اند، به‌وسیله ترک‌ها و عیوب دیگر پوشش متوقف می‌شوند. زمانی که بار مکانیکی علاوه بر بارگذاری خستگی حرارتی اعمال می‌شود، تنش کششی ایجادشده در سطح پوشش انرژی مورد نیاز برای رشد ترک‌های موجود در پوشش را در جهت عمود و موازی فصل مشترک تأمین می‌کند. توجه به این نکته ضروری است که لایه میانی و بالایی پوشش به‌دلیل اختلاف در ضریب انبساط حرارتی، در حین تغییرات درجه حرارت، تغییرات ابعادی متفاوتی از خود نشان می‌دهند که این امر منجر به ایجاد یک تنش در فصل مشترک این دو لایه می‌شود که به آن تنش عدم انطباق می‌گویند. این تنش عدم انطباق می‌تواند دلیل اصلی ایجاد جدایش در فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی باشد. تشکیل لایه اکسید رشدکننده حرارتی از اکسید آلومینیوم در فصل مشترک میان لایه‌ها نیز یکی از عوامل اصلی تخریب پوشش‌های سد حرارتی به‌حساب می‌آید، به این‌صورت که اختلاف بسیار زیاد ضریب انبساط حرارتی لایه اکسیدی با دو لایه پوشش پیوندی و پوشش فوقانی، تنش حرارتی بسیار زیادی در این ناحیه ایجاد می‌کند که تخریب و جدایش پوشش را تسریع می‌نماید. در نمونه‌هایی که بار مکانیکی اعمال شده است، این‌گونه به‌نظر می‌رسد که سهم تنش حرارتی ایجادشده در فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی در تخریب و واماندگی پوشش سد حرارتی کاهش یافته و سازوکار غالب تخریب پوشش افزایش انرژی ترک‌ها و میکروتورک‌های موجود در پوشش فوقانی و رسیدن آنها به فصل مشترک است. همچنین به‌علت نسبتاً کوتاه‌بودن مدت زمان سیکل‌های حرارتی و به‌خصوص بازه قرارگیری در دمای بیشینه، لایه اکسید یکنواخت و با ضخامت قابل توجهی ایجاد نشده است. می‌توان چنین دریافت که در صورت افزایش طول سیکل‌های حرارتی ضخامت لایه اکسید افزایش یافته و تنش ناشی از جانشانی این لایه در سطح مشترک، تأثیر بیشتری در تخریب اعمال خواهد کرد و می‌تواند به عامل

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ اعمال بار مکانیکی در دو دمای مختلف تأثیر تقریباً یکنواختی بر کاهش عمر نمونه‌ها دارد. به‌عبارت دیگر، چنانچه بار ۴۰۰ نیوتن، عمر نمونه را در ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۵۷ درصد کاهش می‌دهد، در دمای ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد این کاهش عمر تقریباً ۶۰ درصد است. البته دلائل این موضوع در بخش بعد به‌همراه بررسی سطح مشترک نمونه‌ها بیشتر توضیح داده خواهد شد.

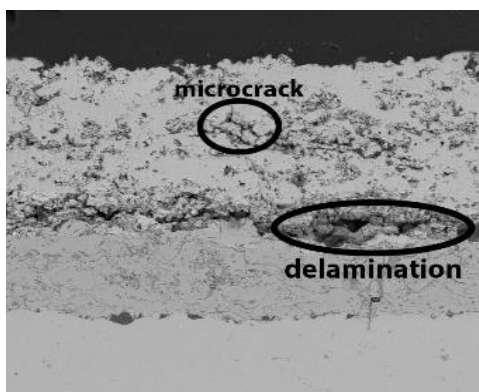
براساس جدول ۱، منحنی شکل که نشان‌دهنده عمر نمونه تحت بارگذاری حرارتی سیکلی با بیشینه دمای ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، برحسب بار مکانیکی خمشی اعمالی بر نمونه رسم شده است. بین عمر نمونه و بار مکانیکی خمشی رابطه‌ای غیرخطی برقرار است که با افزایش بار، عمر نمونه در حال کاهش است. به‌طور تقریبی می‌توان برون‌یابی کرد که در بار خمشی اعمالی ۷۵۰ نیوتن، عمر نمونه کمتر از یک سیکل خواهد بود و در این بار خمشی، نمونه در طی اولین سیکل حرارتی با دمای بیشینه ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد دچار واماندگی خواهد شد. باید توجه داشت که نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به‌علت کم‌بودن تعداد آزمایش‌ها به‌صورت کیفی نشان‌دهنده عمر نمونه‌ها بوده، اما در عین حال دارای اهمیت زیادی است؛ زیرا نشان‌دهنده روند تغییرات تعداد سیکل‌هایی است که قطعات با بارگذاری‌های حرارتی سیکلی و خمشی متفاوت، تا قبل از واماندگی تحمل می‌کنند. در صورت زیادبودن تعداد آزمایش‌ها می‌توان منحنی تنش - عمر مناسب‌تری رسم نمود.

۳-۲. بررسی سطح مقطع نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی

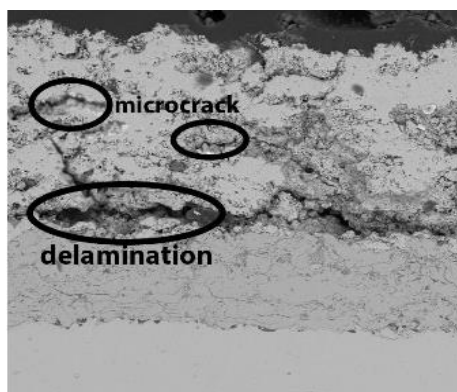
پس از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها از مقاطع مختلفی برش خورده و سطح مقطع برش‌خورده توسط میکروسکوپ الکترونی بررسی شده است. شکل سطح مقطع وسط نمونه‌ها را که بیشینه دما را تجربه می‌کند، نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل با شکل ۳ که سطح مقطع نمونه‌ها را در حالت اولیه نشان می‌دهد، به‌وجود آمدن ترک‌ها به‌وضوح دیده می‌شود. در شکل ۱۳ (الف و ب) نمونه‌ها بدون بار مکانیکی بوده‌اند و شکل ۱۳ (ج و د) به نمونه‌ها بار مکانیکی اعمال شده است. با مقایسه این شکل‌ها مشخص است که پس از اعمال بار مکانیکی ترک‌های قبلی که در شکل (الف و ب) وجود داشته‌اند و عمدتاً در راستای طول لایه سطح مشترک

این صورت یک ترک افقی در امتداد فصل مشترک شکل خواهد گرفت. الگوی دوم زمانی رخ می‌دهد که یک ترک سطحی به یک حفره می‌رسد. حال اگر ترک انرژی کافی داشته باشد (شیب دمایی بالایی در آن ناحیه واقع باشد)، از میان حفره عبور می‌کند و به انتشار خود ادامه می‌دهد و در نهایت به فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی رسیده و یک ترک افقی در امتداد فصل مشترک شکل خواهد گرفت. اما زمانی که ترک انرژی کافی نداشته باشد (مثلاً در زمانی که شیب حرارتی به اندازه کافی زیاد نباشد یا انرژی فعال‌سازی انتشار ترک پایین باشد)، رشد آن در درون پوشش متوقف می‌شود و نمی‌تواند به فصل مشترک برسد که این همان الگوی سوم است [۲].

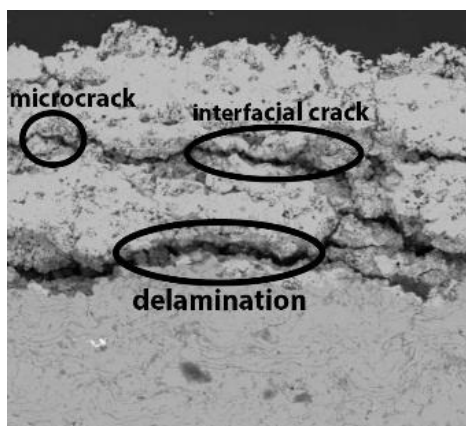
اصلی واماندگی تبدیل شود. در انتها می‌توان در مورد نحوه تشکیل ترک ناشی از خستگی حرارتی در پوشش‌های سد حرارتی چنین بیان کرد که ترک خستگی در پوشش سد حرارتی به دو شکل می‌تواند ایجاد شود: ترک خوردگی سطحی و دیگری جدایش یا بازشدگی ترک در فصل مشترک لایه پوشش پیوندی و پوشش فوقانی سرامیکی. شکل ۱۴ الگوهای انتشار ترک را در پوشش‌های سد حرارتی در حین خستگی حرارتی نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای انتشار ترک سه الگو وجود دارد: در الگوی اول وقتی ترک سطحی در حین خستگی حرارتی به یک ترک که از قبل وجود داشته می‌رسد، اگر انرژی کافی داشته باشد، می‌تواند از میان ترک اولیه عبور کند و به انتشار خود ادامه دهد و در نهایت به فصل مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی برسد. در



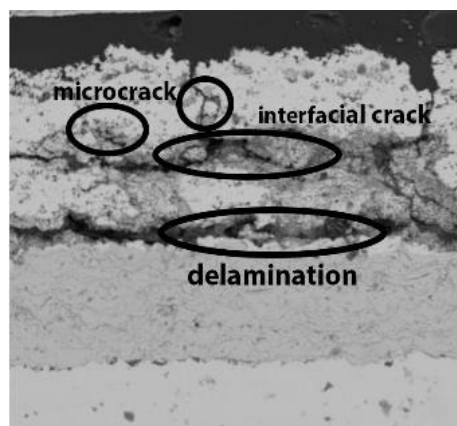
(ب)



(الف)

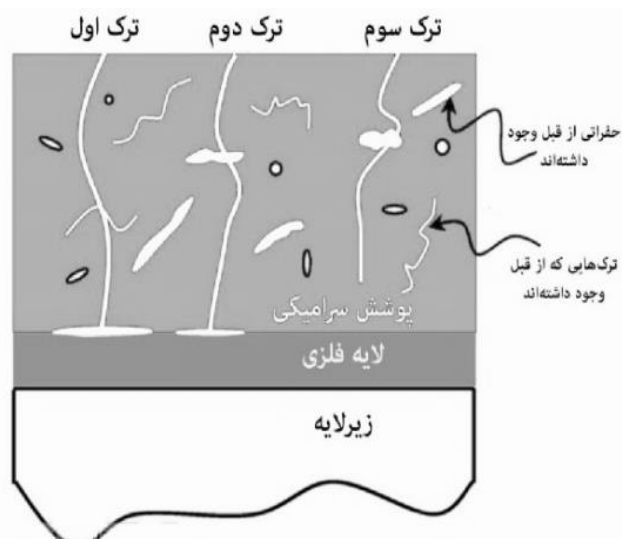


(د)



(ج)

شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح مقاطع مرکز نمونه‌ها؛ (الف) نمونه ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون اعمال بار مکانیکی (ب) نمونه ۱۱۷۰ درجه بدون اعمال بار مکانیکی، (ج) نمونه ۱۱۰۰ درجه همراه با اعمال بار ۴۰۰ نیوتن، (د) نمونه ۱۱۷۰ درجه همراه با اعمال بار ۴۰۰ نیوتن



شکل ۱۴. نمایی از الگوی انتشار ترک در پوشش‌های سد حرارتی در شرایط بارگذاری خستگی حرارتی [۲]

۴. جمع‌بندی

می‌توان به اجمال موارد زیر را به‌عنوان نتیجه‌گیری این پژوهش آزمایشگاهی مطرح نمود:

۱. اعمال بار مکانیکی خمشی به‌طور قابل توجهی طول عمر خستگی حرارتی پوشش را کاهش می‌دهد.
۲. سازوکار رشد ترک در پوشش با اعمال بار مکانیکی تغییر می‌کند. رشد ترک در حالاتی که بار مکانیکی اعمال می‌شود، هم در جهت عمود و هم در جهت موازی با فصل

۵. مأخذ

- [1] Roger, R. C. *The Superalloy Fundamentals and Applications*, Cambridge University, 2006.
- [۲] عطایی، م، س. پهلوان یلی. "آسیب‌های وارده بر پوشش‌های سپر حرارتی در محفظه‌های احتراق توربین‌های گازی با توان بالا"، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۷۸.
- [3] Wang, L., Y. Wang, X. G. Sun, J. Q. He, Z. Y. Pan, C. H. Wang. "Thermal shock behavior of 8YSZ & double-ceramic-layer La2Zr2O7/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying." *Journal of Ceramics International* 3595, no. 38, 2012.
- [4] Jamali, H., R. Mozafarinia, R. Shoja Razavi, R. Ahmadi-Pidani. "Comparison of thermal shock resistances of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings." *Journal of Ceramics International* 6705, no. 38, 2012.
- [5] Ito, Y. "Heat-Resistant Coating Technology for Gas Turbines, Chapter 10.2", *Handbook of Advanced Ceramics*, 789. Elsevier, 2013.
- [6] John Wiley and Sons. *Progress in Thermal Barrier Coatings*, The American Ceramic Society, 2009.
- [۷] احمدی پیدانی، ر، ر. شجاع رضوی، ر. مظفری‌نیا، ح. جمالی. "اعمال و مشخصه‌یابی پوشش‌های سد حرارتی زیرکینیای پایدارشده با سریا و ایتریا روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸"، علوم و مهندسی سطح، ج ۱۶، ص ۴۴-۳۳، ۱۳۹۱.
- [8] Xu, H., H. Guo. *Thermal Barrier Coatings*, Woodhead Publishing Limited, 2011.

- [۹] ابراهیمی، ح، س. نخودچی. "اثر تغییرات دما بر تورق بین صفحاتی در پوشش‌های سد حرارتی"، بیست و سومین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۴.
- [10] Kucuk, A., C. Berndt, U. Senturk, R. Lima, C. Lima. "Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four points bend test." *Journal of Materials Science and Engineering* 29, No. 284, 2000.
- [11] Evan, A., D. Mumm, J. Hutchinson, G. Meier, F. Pettit. "Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings." *Journal of Program in Material Science* 505, No. 46, 2001.
- [12] Yamazaki, Y., A. Schmid, A. Scholz. "The determination of the delamination resistance in thermal barrier coating system by four-point bending tests." *Journal of Surface & Coatings Technology* 744, No. 201, 2006.
- [13] Mao, W., C. Dai, Y. Zhou, Q. Liu. "An experimental investigation on thermo-mechanical buckling delamination failure characteristic of air plasma sprayed thermal barrier coatings." *Journal of Surface & Coatings Technology* 6217, No. 201, 2007.
- [14] Kim, D., I. Shin, J. Koo, C. Seok, T. Lee. "Failure mechanisms of coin-type plasma-sprayed thermal barrier coatings." *Journal of Surface & Coatings Technology* 451, No. 205, 2010.
- [15] Slámecka, K., L. Celko, P. Skalka, J. Pokluda, K. Nemeč, M. Juliš, L. Klakurková, J. Švejcar. "Bending fatigue failure of atmospheric-plasma-sprayed CoNiCrAlY+YSZ thermal barrier coatings." *International Journal of Fatigue* 186, No. 70, 2015.
- [16] Chen, X., L. Gu, B. Zou, Y. Wang, X. Ca. "New functionally graded thermal barrier coating system based on LaMgAl11O19/YSZ prepared by air plasma spraying." *Journal of Surface and Coatings Technology* 2265, No. 206, 2012.
- [17] Ogawa, A. C. K. "Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines." *Progress in Gas Turbine Performance*, NITECH, 2013.

پی‌نوشت

-
1. Inconel 617
 2. ZrO₂.8wt% Y₂O₃
 3. splats
 4. bond coat
 5. morphology
 6. thermal grown oxide (TGO)
 7. top coat
 8. Ni₂₂Cr₁₀Al₁₁Y