



## تأثیر پوشش آلومینایدی روی عمر خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80

مهرداد کریمی<sup>۱</sup>، مصطفی لیوانی<sup>۲\*</sup> و حمیدرضا زارعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سوانح هوایی و صلاحیت‌های پروازی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### چکیده

در این مقاله، عمر خزشی سوپرآلیاژ Rene-80 در دو حالت بدون پوشش و پوشش‌دار بصورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. محدوده دمای کاری این سوپرآلیاژ در حدود ۷۶۰-۹۸۲ درجه سانتی‌گراد است، به منظور افزایش مقاومت آن در برابر عواملی تخریب سطحی چون اکسیداسیون، خوردگی داغ و فرسایش در دمای بالا، پوشش روی آن اعمال می‌شود و کاربرد آن بدون پوشش توصیه نمی‌گردد. در این مقاله پوشش‌های آلومینایدی نفوذی با دو روش جداگانه نفوذی-پودری و نفوذی-دوغابی به ترتیب با نام تجاری Codep-B و IP1041 روی این سوپرآلیاژ اعمال شد و تأثیر این پوشش‌ها روی عمر خزشی این سوپرآلیاژ در دمای ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد به همراه متالوگرافی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور، نمونه‌های مطابق با استاندارد ASTM-E8 تولید و بعد از پوشش‌دهی به همراه نمونه‌های بدون پوشش تحت آزمون خزش مطابق با استاندارد ASTM-E139 قرار گرفتند. پارامترهای کنترلی شامل دما، تنش و عمر خزشی نمونه‌های بدون پوشش مطابق با استاندارد C50TF28 ارزیابی می‌شود. نمونه‌های خزشی بدون پوشش به طور میانگین پس از ۳۳ ساعت استحکام خود را از دست داده و گسیخته شده‌اند. نتایج نشان داد که پوشش‌ها باعث افزایش عمر خزشی نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پوشش حداقل در حدود ۱۲ ساعت می‌شود.

**کلمات کلیدی:** خزش؛ سوپرآلیاژ؛ پوشش نفوذی؛ آلومینایزینگ.

## The Effect of Aluminide Coating on the Creep Behavior of Rene 80 Nickel Base Superalloy

M. Karimi<sup>1</sup>, M. Livani<sup>2,\*</sup>, H.R. Zarei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.S. Student, Aeros. Eng., Shahid Sattari Aeron. Univ. Sci. Tech., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Aeros. Eng., Shahid Sattari Aeron. Univ. Sci. Tech., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Aeros. Eng., Shahid Sattari Aeron. Univ. Sci. Tech., Tehran, Iran.

### Abstract

In this paper, the creep strength of Rene 80 superalloy in both uncoated and coated states is studied experimentally. The operation temperature range of this superalloy is 760–982 °C, in order to increase its resistance to surface degradation factors such as oxidation, hot corrosion and erosion at high temperatures, a coating is applied on it and its use without coating is not recommended. In this paper, diffusion aluminide coatings were applied to this superalloy by two separate methods of pack cementation and slurry under the brand names of Codep B and IP1041, respectively, and the effect of these coatings on the creep life of this superalloy at 982 °C and metallography is examined by SEM was investigated. For this purpose, samples according to ASTM-E8 standard were produced and after coating along with uncoated samples were subjected to creep test according to ASTM-E139 standard. Control parameters including temperature, stress and service life of uncoated samples are evaluated according to C50TF28 standard. The results showed that the coatings increased the creep life of the coated samples compared to the uncoated samples by at least 12 hours.

**Keywords:** Creep; Superalloy; Slurry Penetration Coating; Aluminizing.

## ۱- مقدمه

سوپرآلیاژ Rene-80، برای اولین بار توسط شرکت جنرال الکتریک در حدود سال ۱۹۶۵ میلادی جهت پره‌های توربین‌های موتور جت مورد استفاده قرار گرفت. از خصوصیات مهم این آلیاژ، مقاومت در دمای بالا نسبت به اکسیداسیون است. شکل فاز  $\gamma'$  در شرایط بعد از ریخته‌گری در این سوپرآلیاژ بصورت توزیع دوتایی است [۱]. کاربرد این سوپرآلیاژ در پره‌های توربین‌های گازی و موتورهای هواپیماهای است؛ به گونه‌ای که امروزه ۵۰ درصد از وزن موتور هواپیماها را سوپرآلیاژها پایه نیکل تشکیل می‌دهند. برای بهبود راندمان حرارتی نیاز است تا دمای محصولات احتراق تا حد ممکن افزایش یابد؛ در نتیجه در سال‌های اخیر برای افزایش مقاومت حرارتی اجزای توربین و افزایش عمر پره، استفاده از سوپرآلیاژهای تک کریستالی همراه با پوشش‌های نوین افزایش یافته است. وجود عناصری مانند کروم و آلومینیوم در سوپرآلیاژها نقش مهمی در انتخاب نوع پوشش و پارامترهای مربوط به آن را دارند. عنصر کروم نقش دوگانه‌ای در خواص سطحی و زمینه ایفا می‌کند. استفاده از سوپرآلیاژهای پایه نیکل با مقدار مجاز عنصر کروم (حداکثر تا ۱۰ درصد) در پره‌های توربین خصوصاً ردیف اول، تا حد زیادی می‌تواند خواص مورد انتظار مثل خزش، خستگی، گسیختگی و تنش آنها را برآورده سازد، ولی جهت دستیابی به مقاومت خوردگی، اکسیداسیون، سایش و همچنین جلوگیری از کاهش خواص مکانیکی در طی کارکرد پره، مقادیر بیشتری از کروم و آلومینیوم ضروری خواهد بود. جدای از افزایش استحکام مکانیکی سوپرآلیاژ، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون آن به سبب کاهش درصد عناصری چون کروم کاهش می‌یابد که این امر باعث محدودیت در استفاده از سوپرآلیاژها در محیط خورنده در دمای بالا می‌شود. ایجاد پوشش روی این سوپرآلیاژها، باعث رفع این محدودیت‌ها می‌شود. سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80، به عنوان آلیاژی برای تولید پره‌های توربین جت‌های هوایی با روش ریخته‌گری دقیق استفاده می‌شود. اگرچه در اوایل تولید، این سوپرآلیاژ بدون انجام عملیات حرارتی مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما برای عملکرد بهتر در دمای‌های بالا، عملیات حرارتی برای آن تعریف گردید. جهت ایجاد فازهای مطلوب و حذف فازها و رسوب‌های ناخواسته، عملیات

حرارتی این سوپرآلیاژ را می‌توان به موارد زیر خلاصه کرد:  
 ۱. همگن‌سازی، ۲. عملیات حرارتی انحلال.  
 دمای کارکردی سوپرآلیاژ Rene-80 ۷۶۰ تا ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد است [۲]. حداکثر دمای لبه حمله در پره‌های توربین‌های گازی در حدود ۸۷۱ درجه سانتی‌گراد است. تحقیقات گسترده‌ای در مورد خصوصیات مکانیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در مقابل شرایط مختلف محیطی انجام شده است [۳ و ۴].

با ایجاد پوشش می‌توان مقاومت سطح را در برابر عواملی تخریب سطحی افزایش داد. اهداف اصلی استفاده از پوشش در توربین‌های گازی، افزایش عمر قطعات با جلوگیری از عوامل تخریب‌های سطحی شامل خوردگی داغ، اکسیداسیون، سایش، جلوگیری از عدم تعادل دینامیکی توربین و بالا بردن دمای گاز ورودی به توربین، جهت افزایش قدرت و راندمان موتور است. پوشش‌های نفوذی آلومینایدی به عنوان پوشش مناسب و کم‌هزینه در بیشتر توربین‌های گازی هوایی استفاده می‌شود، بویژه در موتورهای هواپیماهای نظامی، این پوشش در پره‌های ردیف‌های مختلف به کار برده می‌شوند.

معمولاً افت خواص خزشی بیشتر از ناحیه سطح در مجاورت کاربیدهای مرزخانه اتفاق می‌افتد که با اعمال پوشش این عیب تا حدودی برطرف می‌شود. علت این امر به این خاطر است که کاربیدها به جای سطح، در لایه‌ی نفوذی پوشش تشکیل گشته و پوشش از تخریب‌های مرزخانه در امان می‌ماند [۵].

خزش نوعی تغییرشکل وابسته به زمان است که با گذشت زمان منجر به ایجاد تغییرشکل و یا شکست خزشی در ماده می‌شود. آزمون خزش برای تشخیص آسیب و یا عمر ماده تحت بارگذاری‌های استاتیکی و طولانی مدت انجام می‌شود و یکی از ساده‌ترین راه‌کار تجربی برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک مواد در دما و تنش ثابت با گذشت زمان است.

مکانیزم ایجاد پوشش‌های نفوذی بر اساس رسوب عناصر روی سطح فلز و نفوذ آنها به داخل زمینه و با نفوذ خارجی برخی از عناصر زمینه به سمت فصل مشترک است که در نهایت به تشکیل پوشش می‌انجامد.

بررسی‌های انجام شده روی پوشش‌های آلومینایدی نفوذی نشان می‌دهد که این نوع از پوشش‌ها، دارای دو نوع

این پوشش‌ها بین ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است [۷ و ۸].

پوشش آلومینایدی با مکانیزم اکتیویته پایین آلومینیوم دارای DBTT کمتری در مقایسه با آلومیناید با مکانیزم اکتیویته بالای آلومینیوم است. به همین دلیل از پوشش‌هایی با مکانیزم اکتیویته پایین آلومینیوم بیشتر از سایر پوشش‌های آلومینایدی برای پره‌های توربین موتور هواپیما استفاده می‌شود [۹]. قابل توجه است که DBTT این پوشش‌ها با افزایش زمان سرویس‌دهی به دلیل اکسیداسیون آلومینیوم به شکل  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  و همچنین نفوذ آلومینیوم به زیر لایه، کاهش می‌یابد که در حقیقت باعث کاهش مقدار آلومینیوم در پوشش می‌شود [۱۰]. در بدترین حالت کرنش-تنش برای تیغه توربین در دمای کاری، طراحی تیغه توربین ساخته شده از سوپرآلیاژ باید به گونه‌ای باشد که حداکثر کرنش عملی اعمال شده در لبه جلوی تیغه توربین (در خستگی چرخه کم) از شکستگی پوشش اعمال شده کمتر باشد [۱۱]. به طور کلی، شکست داکتیل در پوشش از ترک‌ها و نقص‌های درون بستر شروع می‌شود، در حالی که شکست‌های ترد از ترک‌های و نقص‌های سطح شروع و منتشر می‌شوند.

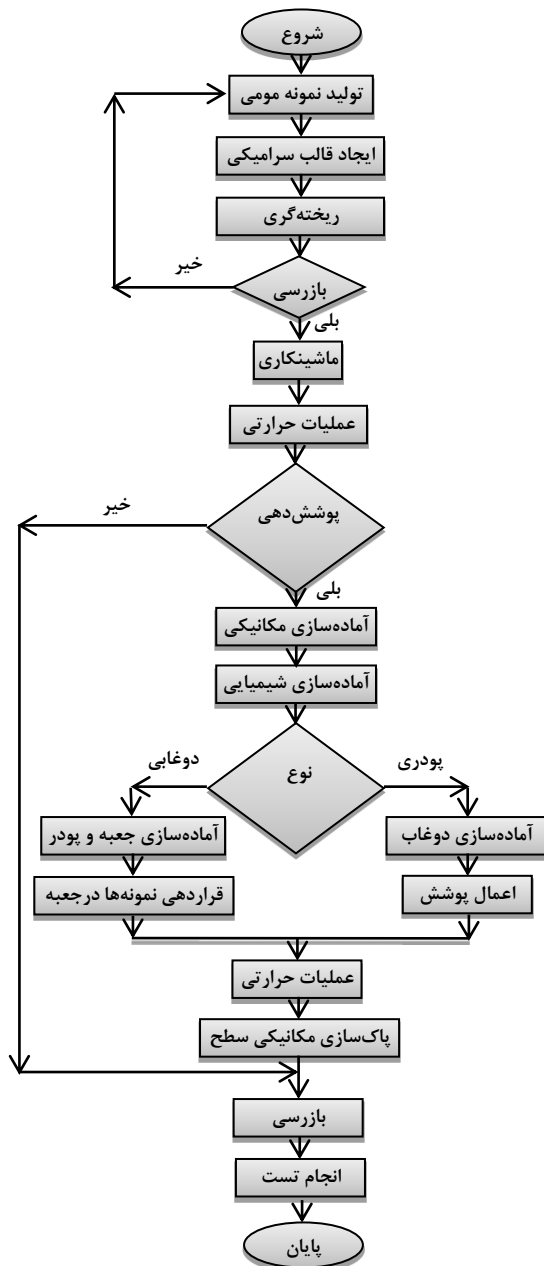
با توجه به این واقعیت که پره‌های توربین هواپیماها حتی در بدترین حالت کرنش-تنش (برخاستن)، هرگز کرنش‌های بالاتر از ۱٪ را تجربه نمی‌کنند، نمونه‌های پوشش داده شده تا حداکثر ۱٪ کرنش پلاستیکی در ۸۷۱ درجه سانتی‌گراد و ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد بارگذاری می‌شوند [۱۲]. در ادامه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

ماتسودا و همکاران در مقاله‌ای تأثیر پوشش مقاوم به خوردگی بر عمر برهم کنش خستگی-خزش سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene 80 را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این مقاله، به اثرات دو نوع پوشش مقاوم در برابر خوردگی،  $\text{CoNiCrAlY}$  و پوشش رسوب بخار شیمیایی  $\text{Al (CVD)}$ ، بر عمر برهم کنش خزش-خستگی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene80 پرداختند. نرخ رشد ترک سطح هر دو نمونه پوشش داده شده و بدون پوشش مقدار ثابت یا یکسانی بود. مشخص شد که عمر خستگی نمونه‌های پوشش داده شده تحت تأثیر اکسیداسیون سطح نمونه و خصوصیات مواد پوشش قرار

مکانیزم تشکیل با توجه به نفوذ عناصر می‌باشند که در مکانیزم نوع اول شامل نفوذ آلومینیوم از پوشش به داخل بستر و نفوذ نیکل از بستر به سمت پوشش است که این نوع پوشش دارای عملیات حرارتی دو مرحله‌ای با تشکیل سه لایه پوششی با نام پوشش نفوذی اکتیویته بالا است، مکانیزم نوع دوم تنها با نفوذ نیکل از درون بستر به داخل پوشش انجام می‌پذیرد که دارای یک مرحله عملیات حرارتی با تشکیل دو لایه پوششی با نام پوشش نفوذی اکتیویته پایین است. بر همین اساس پوشش‌های آلومینایدی بر اساس ریخت‌شناسی به دو دسته فرآیند آلومینایزینگ اکتیویته پایین آلومینیوم در دمای بالا و فرآیند آلومینایزینگ اکتیویته بالا آلومینیوم در دمای پایین تقسیم می‌شوند [۶]. یکی از مهم‌ترین ضعف‌های پوشش‌های آلومینایدی، مقاومت اندک آنان در برابر خوردگی‌های ناشی از ترکیبات سولفیدی در نوع خوردگی داغ است. پوشش‌ها با از دست دادن عناصر سازنده پوسته محافظ در اثر نفوذ به زیرلایه و اکسیداسیون به تدریج از بین می‌رود؛ بنابراین اصلاح پوشش‌های آلومینایدی با افزودن عناصری مثل کروم، پلاتین و سیلیسیوم و عناصر نجیب دیگر، پژوهش‌هایی را در این زمینه به خود اختصاص داده است. پوشش‌های دوغابی IP1041 از نوع پوشش‌هایی آلومیناید اصلاح شده با سیلیسیوم است که مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ بیشتری نسبت به پوشش پودری آلومیناید ساده Codep-B دارد. البته باید این نکته را نیز مورد توجه قرار داد که چسبندگی لایه پوشش در روش پودری نفوذی بیشتر از چسبندگی لایه پوشش در روش دوغابی است که علت آن به خاطر ضخامت لایه نفوذی تشکیل شده در این دو نوع پوشش است. در زمینه تأثیر پوشش نفوذی آلومیناید روی خواص مکانیکی سوپرآلیاژ Rene-80، منابع کمی وجود دارد. اساساً در دمای پایین‌تر از DBTT (دمای انتقال حالت ترد به نرم) پوشش آلومینایدی، تفاوت زیادی در خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی پوشش و لایه وجود دارد؛ ولی در دمای بالاتر از DBTT، می‌توان شباهت بین خواص مکانیکی پوشش و بستر را مشاهده کرد و از این رو می‌توان انتظار داشت که وجود پوشش در چنین شرایطی اثر محافظتی خوبی ایجاد می‌کند. بسته به ترکیب شیمیایی، زبری، اندازه دانه، میزان کرنش اعمال شده و ضخامت پوشش‌های نفوذی آلومینایدی، DBTT

ریزساختار و رفتار خزش فرو روندگی سوپرآلیاژ ریختگی Al-Ni-Mn-Mg در دماها و تنش‌های مختلف پرداختند. نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری و SEM آنها نشان داد که در حالت کلی، حضور آهن تا مقدار ۰/۳ درصد وزنی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی رفتار خزشی این آلیاژ ندارد. از طرفی با افزایش درصد آهن تا ۰/۰۷ درصد وزنی، مقاومت خزش آلیاژ به دلیل درشت شدن ترکیبات بین فلزی کاهش قابل ملاحظه یافته است [۱۸]. طاهری و همکاران در مقاله‌ای به بررسی تأثیر پوشش آلومینایدی بر رفتار خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکلی GTD-111 پرداختند. آنها نمونه‌هایی از GTD-111 به روش سمنتاسیون پودری پوشش دادند و تحت آزمون خزشی قرار دادند و بمنظور تأثیر پوشش، با نمونه‌های بدون پوشش مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که وجود پوشش باعث افزایش آلومینیوم در سطح شده و به پایداری ۷۲ که مهم‌ترین عامل استحکام بخش این سوپرآلیاژ است، کمک کرده و باعث مدت عمر بیش‌تر این سوپرآلیاژ در حدود ۸ دقیقه نسبت به نمونه‌های مشابه بدون پوشش شد [۱۹]. آزادی و رضایور در مقاله‌ای به آرایه مدل تخمین عمر خزش برای سوپرآلیاژ مورد استفاده در پره توربین قطعه توربوشارژر پرداختند. آنها در این مقاله، دقت مدل‌های مختلف تخمین عمر خزشی برای سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۳ که بر اساس رابطه‌های بین تنش، دما و عمر خزش هستند را بررسی کردند [۲۰]. کلاگر و همکاران به تأثیر شرایط کاری بر ریزساختار و مکانیزم‌های تغییر فرم خزشی پره‌های توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN-738LC پرداختند [۲۱]. سلیمانی شیشوان تغییر شکل خزشی سوپرآلیاژهای تک‌کریستالی پایه نیکل با استفاده از پلاستیسیته‌ی نابجایی‌های گسسته را مورد بررسی قرار داد. او یک مدل سلول واحد دو بعدی از میکرو ساختار سوپرآلیاژ تحت تنش تک محوری ثابت استفاده کرد که متشکل از فاز گاما به صورت ماتریس و فاز گاما پریم به صورت ذره است [۲۲]. آرو و آزادی آزمون خزش روی نمونه‌های استاندارد ریخته‌گری شده تحت نیروی کشش ثابت و دمای ثابت انجام دادند. دما در آزمون خزش برابر با ۲۷۵، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و سطوح تنش نیز برابر با ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ در نظر گرفته شد. تحلیل داده‌های تجربی آنها نشان داد که در یک سطح تنش ثابت، با افزایش دما کمینه نرخ کرنش خزشی افزایش یافته و کرنش

می‌گیرد. عمربرهم کنش خزش-خستگی به جای اکسیداسیون و خواص مواد پوشش، تحت تأثیر مکانیسم شکست (ترک بین دانه‌ای) فلز پایه Rene80 قرار گرفت [۱۳]. هان سوونگ و همکاران در مقاله‌ای به رفتار خزشی سوپرآلیاژ Rene 80 در دو شرایط محیطی مختلف دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۶۵۷ مگاپاسکال و همچنین دمای ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد و تنش ۱۵۷ مگاپاسکال تحت شرایط اتمسفر و گاز آرگون پرداختند [۱۴]. ناطق و رحمانی در مقاله‌ای به بررسی تأثیر پوشش آلومینایدی نفوذی بر خواص کششی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene 80 پرداختند. آنها تأثیر استفاده از پوشش نفوذی Codep-B بر خواص کششی Rene 80 در محدوده‌ی دمایی ۲۲-۹۸۲ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که خواص کششی نمونه‌های پوشش داده شده نسبتاً کمتر از نمونه‌های بدون پوشش در دمای کمتر از ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است، اما در شرایط سرویس‌دهی، پوشش می‌تواند عملاً دارای اثرات مفید و مثبتی باشد [۱۵]. ناطق و رحمانی در مقاله دیگری به بررسی تأثیر پوشش نفوذی آلومینایدی بر خواص خستگی کم چرخه Rene 80 پرداختند. آنها در این مقاله، اثر پوشش نفوذی آلومینایدی Codep-B بر خواص خستگی کم چرخه Rene 80 در دمای ۸۷۱ درجه سانتی‌گراد،  $R = 0$  و میزان کرنش حدود ۰/۰۳ بررسی کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که کرنش سیکل اعمال شده کمتر از ۰/۸ درصد است و وجود پوشش باعث افزایش طول عمر خستگی شد. در نمونه‌های پوشش داده شده، در حالی که کرنش کلی چرخه کمتر از ۰/۸ درصد است، هسته ترک‌ها فقط در بستر رخ می‌دهد، اما در کرنش چرخه بیش از ۱ درصد، همزمان ترک‌ها در سطح پوشش، لایه نفوذ و بستر ایجاد می‌شوند، طول عمر خستگی نمونه‌های پوشش داده شده، کمتر از نمونه‌های بدون پوشش است [۱۶]. آقایی و خفیری در مقاله‌ای عمر خزشی سوپرآلیاژ Rene 80 در معرض حرارت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثرات در معرض حرارت قرار گرفتن در زمان طولانی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی سوپرآلیاژ Rene 80 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمایشات خزش شتابدار در ۱۹۰ مگاپاسکال و ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند [۱۷]. رضایی‌زاده و میراسماعیلی در مقاله‌ای به بررسی تأثیر ناخالصی آهن بر



شکل ۱- فلوجارت انجام آزمایش

نمونه‌ها در یک قالب سرامیکی با چینش هشت‌تایی جهت ذوب‌ریزی آماده می‌شوند. فرآیند آماده‌سازی این قالب‌های سرامیکی شامل مونتاژ قالب مومی و بعد از آن ایجاد قالب سرامیکی است که شامل چند لایه پرایمری و چند لایه بک‌آپ سرامیکی می‌باشند.

شکست خزشی کاهش می‌یابد؛ ولی در یک دمای ثابت با افزایش سطوح تنشی هر دو مقدار فوق افزایش می‌یابند [۲۳].

پژوهش‌های صورت گرفته روی سوپرالیاژ Rene-80 و پوشش‌ها، فقط مربوط به پوشش پودری بوده و شامل پوشش دوغابی نمی‌شود و تنها آزمون کشش توسط آقای رحمانی و ناطق روی آلیاژ Rene-80 با پوشش پودری صورت گرفته و بررسی شده است. استحکام خزشی، پارامتری تعیین‌کننده برای بررسی رفتار مواد تحت تنش‌های زیاد در شرایط محیطی دما بالا است. این رفتار می‌بایست قبل از به کارگیری قطعه بررسی شود.

در این مقاله، به بررسی تجربی عمر خزشی سوپرالیاژ Rene-80 در سه حالت پوشش‌دار آلومینایدی ساده و سلیسیم آلومینایدی و بدون پوشش پرداخته شده است. نوآوری در پژوهش حاضر مطالعه عمر خزش سوپرالیاژ با دو نوع پوشش پودری و دوغابی در دمای کاری ۹۸۲ درجه سلسیوس، یعنی حداکثر دمای کارکردی سوپرالیاژ Rene-80 بر اساس مراجع بررسی شده است. در پژوهش حاضر، روش انجام پوشش آلومینایدی ساده به صورت سمانتاسیون پودری جعبه‌ای و روش انجام پوشش سلیسیم آلومینایدی به صورت اسپری دوغاب است. مقدار افزایش عمر نمونه پوشش‌دار نسبت به هم و نسبت به نمونه بدون پوشش مورد سنجش قرار گرفت.

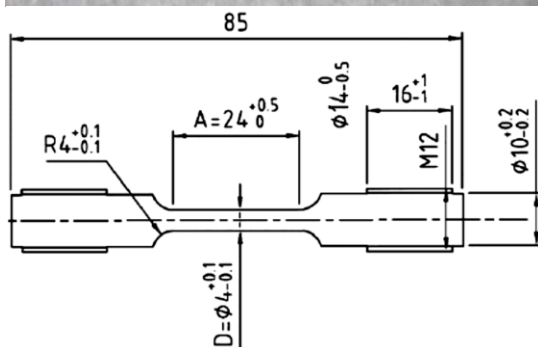
## ۲- روش انجام پژوهش

در این بخش، در ابتدا مدل مورد مطالعه ارائه می‌شود و در ادامه، نحوه انجام آزمایش خزش تشریح خواهد شد.

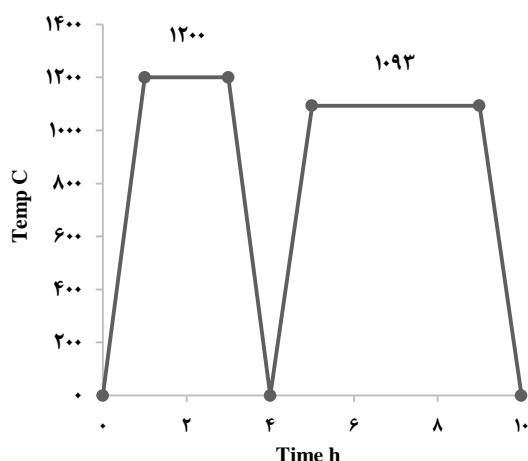
### ۲-۱- ساخت نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمایش

جهت انجام آزمون‌های خزش، نیاز به نمونه‌هایی است که شرایط ریخته‌گری و پارامترهای ساختاری آنها با پرها یکسان باشند. به همین دلیل، نمونه‌ها در شرایط یکسان با پرها به روش ریخته‌گری دقیق تحت خلأ در کوره ذوب القایی تولید شده و بعد از آماده‌سازی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. تمامی مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش طبق استانداردها صورت گرفته است [۲۴]. در شکل ۱ فلوجارت نحوه ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش نشان داده شده است.

دومین مرحله آماده‌سازی، آماده‌سازی شیمیایی یا اسیدشویی است؛ بعد از مرحله ماسه‌زنی به سطح، قطعات باید از لحاظ آلودگی‌هایی مانند چربی پاک شوند. در این مرحله، نمونه‌ها در محلولی با درصد ترکیب خاصی از اسید کلریدریک ۳۷ درصد با آب اکسیژن اسیدشویی می‌شوند. سپس بعد از اسیدشویی برای پاک‌سازی سطح نمونه‌ها از اسید باقی‌مانده، نمونه‌ها در یک مسیر که جریان آب در آن حرکت دارد، قرار داده شده و شسته می‌شوند.



شکل ۲- شماتیک نمونه آزمایش خزش طبق استاندارد ASTM-E8 نمونه آزمایش خزش بعد از ماشین‌کاری [۲۴]



شکل ۳- سیکل عملیات حرارتی سوپرآلیاژ Rene-80 همگن‌سازی و انحلال برای نمونه بدون پوشش [۴]

ریخته‌گری قالب‌ها در شرایط خلأ با فشار  $10^{-5}$  بار و با پیش‌گرم قالب‌ها در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت و با ذوب‌ریزی در دمای ۱۴۵۰ تا ۱۴۷۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. نتایج کوانتوکتری نمونه‌های ریخته‌گری شده در جدول ۱ آمده است.

نمونه‌های آزمون طبق استاندارد ASTM-E8 که جزئیات آن در شکل ۲ آمده است، ابتدا طراحی شده و سپس قالب آن ساخته می‌شود. نمونه‌ها بعد از ریخته‌گری، ماشین‌کاری و باربرداری می‌گردند تا سطح صافی داشته و به پارامترهای ابعادی مورد نظر در استاندارد ASTM-E8 برسند.

سپس تمامی نمونه‌ها، به منظور انحلال فازهای رسوبی و همگن‌سازی ریزساختار، تحت عملیات حرارتی انحلال و همگن‌سازی قرار گرفتند. عملیات حرارتی کامل سوپرآلیاژ Rene-80 در شکل ۳ آورده شده است. عملیات حرارتی همگن‌سازی و انحلال طبق استاندارد GE صورت می‌گیرد که ۲ ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس و ۴ ساعت در دمای ۱۰۹۳ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد که جزئیات آن در شکل ۳ نمایش داده شده است [۴]. بعد از انجام این مرحله، نمونه‌ها به دو دسته بدون پوشش و پوشش‌دار تقسیم می‌شوند. نمونه‌های پوشش‌دار بعد از انجام مرحله عملیات حرارتی انحلال و همگن‌سازی، برای پوشش‌دهی آماده‌سازی می‌شوند.

برای انجام مرحله پوشش‌دهی لازم است که در ابتدا فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شود که شامل مراحل زیر است:

اولین مرحله کاری برای ایجاد پوشش روی نمونه‌ها، انجام عملیات ماسه‌زنی است که دانه‌های ماسه با توجه به نوع قطعه، در اندازه خاصی تعریف شده و با فشار خاصی به روی سطح قطعه برخورد داده می‌شوند. برای رفع آلودگی و ایجاد یک سطح صاف، از دستگاه ماسه‌زن استفاده می‌شود؛ هدف اصلی از ماسه‌زنی، آماده‌سازی مکانیکی قطعه برای رفع اکسیدهایی است که بعد از مرحله ریخته‌گری روی پره باقی‌مانده است. ماسه‌زنی قبل از پوشش‌دهی و در مرحله آماده‌سازی مکانیکی با استفاده از مش ۳۰۰ با فشار ۱۰۰ psi و بعد از پوشش‌دهی برای پاک‌کردن سطح پوشش ایجاد شده از ناخالصی‌ها از مش ۱۰۰ با فشار ۳۰ psi اعمال می‌گردد.

جدول ۱- نتایج کوانتومتری نمونه‌های ریخته‌گری شده

نمونه	درصد وزنی عناصر											
	Ni	Fe	P	S	Mn	C	Mo	Ti	W	Al	Co	Cr
نمونه	Bal	۰/۴۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۱۴	۴/۱۲	۴/۴۵	۴/۷۷	۳/۴۴	۹/۲۳	۱۳/۴۴
بیشترین	Bal	۰/۵۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱	۰/۱۹	۴/۳	۵/۲	۴/۳	۳/۲	۱۰	۱۴/۷
کمترین	Bal	-	-	-	-	۰/۱۵	۳/۷	۴/۸	۳/۷	۲/۸	۹	۱۳/۷

تنش وارده که باید در این آزمون برآورده شود، باید بیشتر از ۲۳ ساعت باشد [۲۶]. ماشین آزمون خزش کششی (DMG) طوری طراحی شده است که نمونه به صورت قائم در آن قرار می‌گیرد و معمولاً نیروی محوری به گیره‌های نمونه، توسط یک سیستم اهرم و بار مرده (آویختن وزنه) اعمال می‌شود. دمای نمونه در خلال آزمایش به خوبی تحت کنترل قرار دارد و علاوه بر این، دما در تمام طول نمونه یکنواخت است. دستگاه دارای یک کوره مقاوم‌تری استوانه‌ای است که روی قاب ماشین کشش نصب می‌شود و در فاصله مناسبی از نمونه قرار می‌گیرد، به طوری که گذاشتن و برداشتن نمونه آزمایش امکان‌پذیر باشد. کوره به مقدار قابل ملاحظه‌ای از طول نمونه آزمایش بلندتر است تا اطمینان از برقراری دمای یکنواخت در تمام طول نمونه حاصل شود. کنترل دما در کوره دستگاه توسط سه عدد ترموکوپل که در درون کوره نصب شده‌اند، اندازه‌گیری و چک می‌شود. در این آزمون زمان تا شکست، برای دما و تنش بخصوصی موردنظر است، ولی نمایش تغییرات کرنش خزشی ضروری نیست که به آن آزمون کشش کسپختگی می‌گویند. پیش‌بار ابتدایی برای همگن‌سازی و آزادسازی تنش پسماند قبل از رسیدن به دما بر نمونه وارد می‌شود. پیش‌بار در حدود ۱۰ درصد بار وارده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، در ابتدا نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج موجود در مرجع اعتبارسنجی می‌شود. سپس نتایج تجربی استخراج شده از آزمایش خزش مدل بدون پوشش، مدل با پوشش دوغابی و مدل با پوشش پودری- نفوذی اکتیویته پایین ارائه خواهند شد. بدین منظور در ابتدا متالوگرافی دو پوشش ایجاد شده روی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

سومین مرحله برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای پوشش‌دهی استفاده از دستگاه آلتراسونیک برای شستشوی نمونه‌ها با محلولی از آب مقطر است که با هدف پاک‌کردن سطح پره‌ها یا قطعات از سیاهی‌ها و سوختگی‌های ناشی از مرحله اسید شویی است.

### ۲-۲- پوشش‌دهی نمونه‌ها

در این بخش، مراحل پوشش‌دهی نمونه‌ها به دو روش پودری- نفوذی اکتیویته پایین و روش دوغابی تشریح می‌شود.

در روش پودری- نفوذی اکتیویته پایین، نحوه آماده‌سازی پودر مطابق با استاندارد GE است. بعد از هم خوردن و آماده‌شدن پودر، نمونه‌ها درون یک جعبه از جنس IN-600 با پودر یک شده و تحت عملیات حرارتی در دمای ۱۰۵۴ درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت قرار گرفته و بعد از خنک شدن و خارج شدن از پک، دوباره سند بلاست شده تا سطح تمیزی داشته باشند.

در روش دوغابی با دوغاب IP1041، بعد از هم خوردن دوغاب به مدت ۳۰ دقیقه، دو لایه روی نمونه اعمال می‌شود. برای اعمال لایه دوم، باید لایه اول خشک شود تا حدی که به رنگ خاکستری روشن تبدیل گردد [۴ و ۲۵].

### ۳-۲- آزمایش خزش

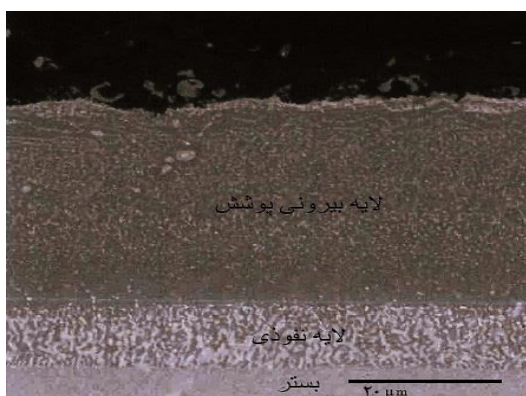
برای مطالعه تأثیر پوشش‌های آلومینایدی بر عمر خزشی سوپرآلیاژ Rene-80، آزمون خزش انجام گرفت. آزمون خزش مطابق استاندارد ASTM-E139 روی سوپرآلیاژ Rene-80 انجام گرفت [۲۴]. طبق استاندارد C50TF28 برای سوپرآلیاژ Rene-80 بدون پوشش، پارامترهای آزمون خزش در دمای ۹۸۲ درجه سلسیوس و تنش ۱۹۱ مگاپاسکال و پارامتر زمان تحمل

جدول ۲- مقایسه نتایج نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش روش حاضر با مرجع [۱۵]

نمونه‌های بدون پوشش						نمونه‌های پوشش‌دار						دما (سلسیوس)			
استحکام نهایی کشش		تنش تسلیم		درصد کاهش سطح مقطع		استحکام نهایی کشش		تنش تسلیم		درصد کاهش سطح مقطع					
نمونه	مرجع	نمونه	مرجع	نمونه	مرجع	نمونه	مرجع	نمونه	مرجع	نمونه	مرجع				
بدون پوشش	[۱۵]	بدون پوشش	[۱۵]	بدون پوشش	[۱۵]	دوغابی	[۱۵]	پودری	دوغابی	[۱۵]	پودری				
۹۵۰/۲	۹۵۸/۲۹	۹۴۱	۹۴۳/۴۷	۳/۹	۳/۴۴	۸۹۲	۸۹۰/۹	۸۹۱/۲۶	۸۲۰	۸۳۲	۸۲۴/۸	۵/۹	۵/۸	۶/۳۳۸	۲۵
۹۲۹/۲	۹۱۱/۳۳	۹۱۳	۹۰۶/۸۷	۳/۵	۴/۰۴										
۹۱۵/۸۳	۹۱۳/۸۳	۸۹۰/۸	۸۸۸/۹۸	۴/۸۸	۵/۸۸	۸۵۱/۱	۸۵۴	۸۵۴/۰۶	۷۵۹/۲	۷۶۵/۲۷	۷۷۵/۲۷	۱۰/۸	۱۱/۶۸	۱۰/۶۸۲	۷۶۰
۸۷۰/۸۱	۸۶۸/۸۱	۸۹۸/۷۶	۸۵۱/۷۶	۶/۵	۷/۵۵										
								۶۱۵/۴۶		۵۳۰				۱۷/۲۷	
۶۲۵	۶۳۵/۲۷	۵۵۰	۵۵۲/۳۶	۲۰/۹	۲۱/۸۸	۵۶۳/۸۱	۵۹۰/۱۶	۶۰۱/۸۴	۳۶۸	۴۷۸	۴۳۶/۹۲	۱۷	۹/۶۸	۱۹/۷۱	
۶۴۰	۶۴۴/۳۶	۵۶۱	۵۶۳/۰۶	۱۷	۱۶/۹۴	۵۷۹/۲	۶۰۸/۸۴	۵۷۱/۴۵	۴۰۲	۴۱۴/۹۲	۴۰۰/۹۷	۱۳/۹۴	۱۵	۱۵/۶	۸۷۱
۶۳۹	۶۴۶/۴۴	۵۸۴	۵۹۴/۳۲	۱۸/۴	۱۹/۶۸			۵۸۴/۱۶			۴۳۷/۰۹			۹/۶۸	
											۴۸۲/۹۳			۲۷/۶۲	
۳۴۵	۳۴۳/۹۳	۲۹۹	۲۹۵/۰۶	۳۱	۳۳/۰۳	۳۵۹	۳۴۴	۳۵۴/۴	۲۴۰	۲۳۵	۲۳۷/۲۶	۲۱	۱۷/۵	۱۸/۴۶	۹۸۲
۳۲۰	۲۹۵/۰۶	۲۲۶	۲۱۰/۵۵	۲۸	۲۲/۶۳	۳۵۲	۳۳۷	۳۲۹/۶۴	۲۳۳	۲۲۹	۲۲۴/۱۹	۱۹	۱۸	۲۴/۲	



شکل ۴- تصویر SEM از پوشش پودری



شکل ۵- تصویر SEM از پوشش دوغابی

### ۳-۱- اعتبارسنجی نتایج حاضر

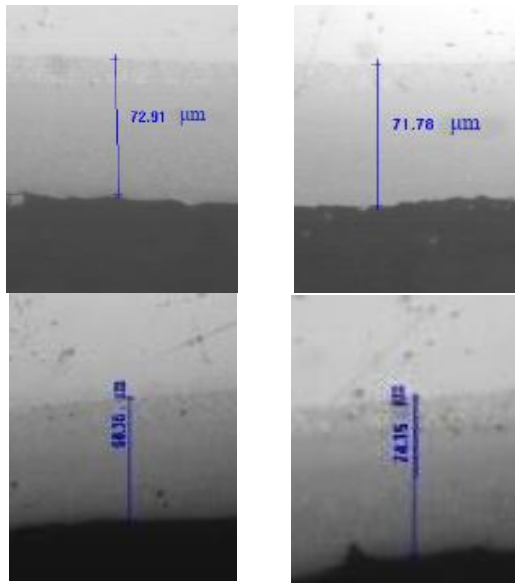
با توجه به در دسترس نبودن نتایج خزش برای مدلی مشابه پژوهش حاضر، در جدول ۲ نتایج آزمون کشش توسط دستگاه (LLOYD) بدست آمده از پژوهش حاضر با نتایج آزمون کشش مرجع [۱۵] مقایسه شده است که اثر پوشش نفوذی آلومینایدی بر خواص کشش سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 را مورد مطالعه قرار دادند. همانطور که جدول ۲ نشان می‌دهد، نتایج پژوهش حاضر دارای انطباق خوبی با نتایج مرجع [۱۵] است.

### ۳-۲- متالوگرافی پوشش‌های ایجاد شده بر روی نمونه‌ها

در این بخش جهت بررسی ریزساختار پوشش‌های ایجاد شده روی نمونه‌ها، مطالعه میکروسکوپی روی آنها انجام شده است.

در شکل ۴ و شکل ۵ تصویر SEM بستر، لایه‌های نفوذی و بیرونی پوشش دو نوع پوشش بترتیب پودری- نفوذی اکتیویته پایین و پوشش دوغابی- نفوذی را نشان می‌دهد. هر دو پوشش از نوع پوشش‌های دولایه‌ای می‌باشند.





شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری از پوشش دوغابی

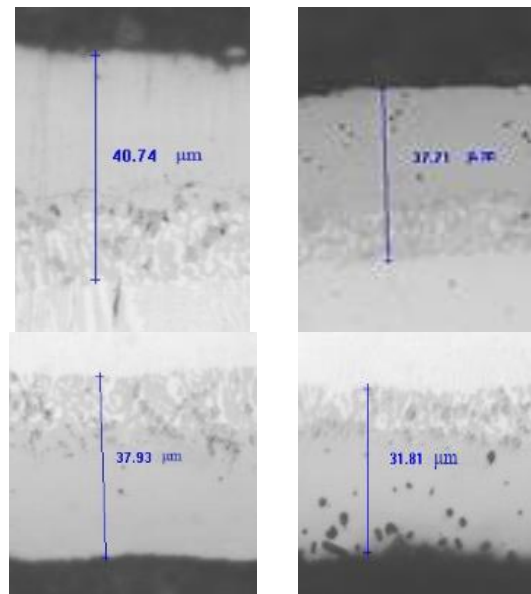
جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری ضخامت دو نوع پوشش پودری و دوغابی

پوشش	متوسط ضخامت (میکرومتر)	
	ضخامت کل لایه	لایه پوشش (±۵) لایه نفوذ (±۱/۵)
پودری	۱۸/۹	۲۱
دوغابی	۴۸/۳۵	۱۶/۱۲

پوشش دوغابی بیشتر است و می‌توان نتیجه گرفت که روش پوشش پودری چسبندگی بهتری نسبت به روش پوشش دوغابی دارد. در صورتی که پودر استفاده شده در روش پودری، پودر آلومیناد سیلیسیم باشد، به مراتب پوشش بهتر و مقاوم‌تری از پوشش پودری آلومیناید ساده بوجود خواهد آورد. سختی در لایه‌های پوشش می‌تواند معیاری از مقاومت به سایش پوشش باشد، به همین دلیل جهت بررسی سختی در لایه‌های مختلف پوشش در طول مقطع پوشش در سه مسیر، سختی اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش از وزنه ۳۰۰ گرمی استفاده گردیده است. نتایج ریزسختی پوشش‌های اعمال شده پودری و دوغابی به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است؛ با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که ریزسختی دو نوع پوشش در یک محدوده است.

در شکل ۶ و شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های بترتیب پوشش پودری- نفوذی و پوشش دوغابی- نفوذی نشان داده شده است. متوسط ضخامت لایه‌های پوشش‌های ایجاد شده در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول ۳ انحراف معیار برای لایه پوشش ۵ میکرومتر و برای لایه نفوذ ۱/۵ میکرومتر است. بر اساس نتایج بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی در جدول ۳، ضخامت متوسط پوشش پودری حدود ۵۴ میکرومتر بدست آمده است که ضخامت متوسط لایه نفوذ حدود ۱۵ میکرومتر و ضخامت متوسط لایه بالایی آن حدود ۳۹ میکرومتر است؛ همچنین ضخامت متوسط پوشش دوغابی حدود ۶۵ میکرومتر است که ضخامت لایه نفوذ آن حدود ۱۷ میکرومتر و ضخامت لایه بالایی آن حدود ۴۸ میکرومتر است. ضخامت بدست آمده برای این پوشش، بر طبق استاندارد [۲۷] مناسب است؛ همچنین هیچ ترک گرمی در پوشش‌ها و منطقه نفوذ آنها مشاهده نشده است. از سوی دیگر، عدم وجود حفره‌های ریز در اطراف فصل مشترک پوشش و سوپرآلیاژ پایه، حاکی از مکانیزم نفوذ به خارج نیکل و نفوذ به داخل آلومینیوم و همچنین چسبندگی مطلوب پوشش با سوپرآلیاژ پایه است که این منطبق بر شرایط دمایی پوشش‌دهی است.

در مقایسه دو نوع روش پوشش اعمالی مشاهده شد که ضخامت لایه نفوذ در پوشش پودری از ضخامت لایه نفوذی در



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ نوری از پوشش پودری

جدول ۶- نتایج آزمون خزش بر روی نمونه‌های پوشش‌دار و

بدون پوشش		
نمونه	نوع پوشش	طول عمر (ساعت)
بدون پوشش	-	۳۶/۸۳
بدون پوشش	-	۳۰/۶۰
پوشش‌دار	دوغابی	۶۱/۷۲
پوشش‌دار	دوغابی	۴۲/۰۶
پوشش‌دار	پودری	۴۳/۴۲
پوشش‌دار	پودری	۴۷/۱۳
پوشش‌دار	پودری	۴۷/۰۵

عامل استحکام این سوپرآلیاژ، وجود فاز  $\gamma'$  در زمینه است، در دماهای بالا حرکت نابجایی‌ها را کند می‌کند و در نتیجه عمر نمونه‌های پوشش‌دار بیشتر می‌شود.

۲- افزایش سطح مقطع تحمل بار بواسطه اعمال پوشش است که در نهایت باعث کاهش حداقل نرخ خزش می‌شود.

۳- مکانیزم وقوع خزش یک مکانیزم داخلی است و شامل تشکیل، رشد و بهم پیوستن حفره‌ها در مرز دانه‌ها است و پوشش به تنهایی نمی‌تواند مانع ایجاد حفره‌ها در مرز دانه‌ها شود، بلکه می‌تواند از راه افزایش مقاومت به اکسیداسیون، عمر خزشی نمونه را افزایش داده و باعث طولانی‌تر شدن مرحله سوم خزش شود. به بیان دیگر، پوشش آلومینایدی قادر به محافظت زیرلایه از راه اکسایش فاز نیکل-آلومیناید و ایجاد اکسید آلومینیوم در سطح سوپرآلیاژ است که سطح سوپرآلیاژ را در مقابل اکسیداسیون و خوردگی داغ محافظت کرده و مقاومت به خزش سوپرآلیاژ را بالا می‌برد.

۴- معمولاً افت خواص خزشی بیشتر از ناحیه سطح در مجاورت کاربیدهای مرزدانه اتفاق می‌افتد که با اعمال پوشش این عیب تا حدودی بر طرف می‌گردد. علت این امر به این خاطر است که کاربیدها به جای سطح در لایه‌ی نفوذی پوشش تشکیل گشته و پوشش از تخریب‌های مرزدانه در امان می‌ماند.

جدول ۴- نتایج سنجش ریزسختی پوشش پودری

لایه	موقعیت		
	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳
لایه پوشش	۸۳۰	۸۷۰	۸۱۰
لایه نفوذ	۱۱۶۴	۱۲۱۰	۱۱۴۲
بستر	۵۲۰	۵۰۸	۵۳۰

جدول ۵- نتایج سنجش ریزسختی پوشش دوغابی

لایه	موقعیت		
	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳
لایه پوشش	۸۲۴	۸۰۳	۸۴۷
لایه نفوذ	۱۲۰۶	۱۱۳۲	۱۱۶۸
بستر	۵۲۰	۴۲۰	۴۸۰

### ۳-۳- نتایج آزمایش خزش

برای بدست آوردن عمر خزشی، نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش مورد آزمون خزش تحت شرایط دمایی  $982 \pm 2$  درجه سلسیوس و تنش ۱۹۱ مگاپاسگال قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. جدول ۶ نشان می‌دهد که نمونه‌های خزشی بدون پوشش به طور میانگین پس از ۳۳ ساعت استحکام خود را از دست داده و منجر به گسیختگی شده‌اند و نمونه‌های پوشش‌دار آلومینایدی ساده پودری به طور میانگین پس از ۴۵ ساعت و نمونه‌های پوشش آلومینایدی سلیسیم دوغابی به طور میانگین پس از ۵۱ ساعت استحکام خود را از دست داده‌اند.

در واقع نمونه‌هایی با پوشش محافظ، عمر خزشی بیشتری حداقل در حدود ۱۲ ساعت نسبت به نمونه‌های مشابه بدون پوشش دارند که این اختلاف عمر نمونه‌ها را می‌توان به دلیل تأثیر بسزای پوشش آلومینایدی دانست. تأثیرات مثبت پوشش برای افزایش عمر نمونه را می‌توان به شرح موارد زیر بیان نمود:

۱- وجود پوشش در سطح سوپرآلیاژ است که باعث افزایش درصد آلومینیوم در سطح سوپرآلیاژ شده و به پایداری فاز  $\gamma'$  کمک فراوانی می‌کند و از آنجا که مهم‌ترین

نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش ۱۲ ساعت بهبود پیدا کرد.

- پوشش‌های نفوذی آلومینایدی باعث افزایش استحکام فاز استحکام بخش ۷ و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در اثر کاهش سرعت نابجایی‌ها می‌شود.

- در پوشش دوغابی با توجه به تأثیر تجربه متخصص در روش اعمال آن خطای انسانی نیز ناگزیر بالا است، به همین دلیل اختلاف زیادی در عمر خزشی دو نمونه دارای پوشش دوغابی مشاهده می‌شود؛ در صورتی که پوشش دوغابی به صورت مکانیزه روی پره اعمال گردد و بهمین اختلاف زیادی بین نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] Erickson, GL (1994) Super alloy development for aero and industrial gas Turbine. ASM Int. Cannon-Muskegon Corporation, Michigan.
- [2] Domas PA, Antolovich SD (1985) A mechanistically based model for high temperature notched LCF of René 80. Eng Fract Mech 21(1): 203-214.
- [3] Goswami T, Hanninen H (2001) Dwell effects on high temperature fatigue damage mechanisms. Mat Des 22(3): 217-236.
- [4] Safari J, Nategh S (2006) On the heat treatment of Rene-80 nickel-base superalloy. J Mat Proc Tech 176(1): 240-250.
- [5] Cappelli PG (1978) Coating processes in high temperature alloy for gas Turbines. Appl Sci Pub, London.
- [6] Pettit FS, Goward GW (1983) Coatings for high temperature applications. Appl Sci Pub, London.
- [7] Chang WH (1987) Tensile embrittlement of turbine blade alloys after high-temperature exposure, Superalloy. Mater Sci Eng 88.
- [8] Kameda J, Bloomer TE, Sugita Y, Ito A, Sakurai S (1997) Mechanical properties of aluminized CoCrAlY coatings in advanced gas turbine blades. Mat Sci Eng A 234-236: 489-492.
- [9] Goward GW (1970) Current research on the surface protection of superalloys for gas turbine engines. J Met 31.
- [10] Eskner M (2004) Mechanical Behavior of gas turbine coatings. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology.

ترک‌های خزشی اساساً در بسیاری از کاربردهای ترک‌خورده ایجاد می‌شوند. پوشش نمی‌تواند شروع این ترک‌ها را به تاخیر بیاورد، اما باعث ایجاد تغییر در سطح مقطع تحمل بار می‌شود، چون تنش قوی به حداقل نرخ خزش و عمر گسیختگی وابسته است. این خصوصیات تأثیر قوی با تغییر کوچک در سطح مقطع تحمل بار ایجاد می‌کنند. در ابتدا پوشش احتمالاً سطح مقطع بار را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش حداقل نرخ خزش می‌شود، در حقیقت حد مجاز نرخ کرنش برای پره‌های توربین یک درصد است، بنابراین فرض این که پوشش پودری تأثیر مطلوبی بر حداقل نرخ خزش دارد، خیلی مهمتر از تأثیرات نامطلوب آن بر عمر گسیختگی است. به هر حال می‌توان گفت که فرض معمول اینکه پوشش باری را تحمل نمی‌کند، درست نمی‌باشد. اگر پوشش تحمل بار نداشته باشد، سطح مقطع کاهش می‌یابد که این می‌تواند حداقل نرخ خزش را افزایش دهد، این تضاد قوی با کاهش نشان داده شده در نتایج بدست آمده دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری نهایی

- پوشش پودری دارای ضخامت کمتر ولی چسبندگی بیشتر نسبت به پوشش دوغابی است و این به دلیل ضخامت بیشتر لایه نفوذی در آن است. پوشش دوغابی از نوع پوشش آلومینایدی اصلاح شده با سلیسیم است که مقاومت بهتری در برابر اکسیداسیون و خوردگی داغ دارد که به دلیل وجود سلیسیم و ضخامت بیشتر آن است، ولی چسبندگی کمتری نسبت به پوشش پودری به دلیل روش اعمالی آن است.

- اعمال پوشش نفوذی آلومینایدی ساده پودری با مکانیزم اکتیویته پایین، باعث افزایش استحکام خزشی و بهبود عمر نمونه حداقل در حدود شش ساعت شد.

- اعمال پوشش آلومینایدی سلیسیم دوغابی JP1041 باعث افزایش استحکام خزشی و بهبود عمر نمونه- حداقل در حدود پنج ساعت- شد.

- عمر خزشی نمونه‌ها پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پوشش با در نظر گرفتن متوسط زمان برای

- [۲۰] آزادی م، رضانژاد س (۱۳۹۴) ارایه مدل تخمین عمر خزش برای سوپرآلیاژ مورد استفاده در پره توربین قطعه توربوشارژ. نهمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز، تهران.
- [۲۱] کلاگر ع، چراغزاده م، تبریزی ن، شهریاری م س (۱۳۹۵) تأثیر شرایط کاری بر ریزساختار و مکانیزم‌های تغییر فرم خزشی پره‌های توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC. مهندسی متالورژی ۱۶۰-۱۴۶: ۱۹(۲).
- [۲۲] سلیمانی س (۱۳۹۶) بررسی تغییر شکل خزشی ابرآلیاژهای تک‌کریستالی پایه نیکل با استفاده از پلاستیسیتی‌های نابجایی‌های گسسته. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۱۷۹-۱۷۱: ۱۷(۷).
- [۲۳] هانیه آرو و محمد آزادی (۱۳۹۸) مدلسازی رفتار خزشی در آلیاژ آلومینیوم، سلیسیوم، مس، نیکل، منیزیم در دماها و سطوح تنش مختلف. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۷۶-۶۱: ۹(۲).
- [24] ASTM standard (1998) Test method for tension testing of metallic material, E8: 62.
- [25] Technical data sheet (2017) IPAL Diffusion Coating, IP1041.
- [26] Test method for conducting creep (2018) Creep-rupture, and stress-rupture test of metallic materials. ASTM-E139 Standard.
- [27] Air Force technical publication, T.O. 2J-J85-66, C50TF28, T.O.2j.zj79-53 5-55.
- [11] Kolkman HJ (1987) Creep, fatigue and their interaction in coated and uncoated René 80. 91Mater. Sci Eng 89: 81-91.
- [12] Webb G, Strangman T, Frani N, Date C, Willson L Rana R (1996) Prediction of oxidation assisted crack growth behaviour within hot section gas turbine components. Superalloys 345-352.
- [13] Matsuda N, Umezawa S, Kojima Y (1991) Effect of corrosion resistance coating on fatigue-creep interaction live of NI base superalloy Rene 80. J Soc Mat Sci 40(449): 165.
- [14] Seong-Ho H, Gi-Ryong L, Chang-Yong J, In-Bae K, Hak-Min K (1993) A study on the creep behavior of Rene 80 superalloy. Kor J Mat Res 3(6): 575-584.
- [15] Rahmani K, Nategh S (2008) Influence of aluminide diffusion coating on the tensile properties of the Ni-base superalloy René 80. Surf Coat Tech 202(8): 1385-1391.
- [16] Rahmani K, Nategh S (2008) Influence of aluminide diffusion coating on low cycle fatigue properties of René 80. Mat Sci Eng A 486: 686-695
- [17] Aghaie-Khafri M, Farahany S (2010) Creep life prediction of thermally exposed Rene 80 superalloy. J Mat Eng Perf 19: 1065-1070.
- [۱۸] میراسماعیلی س، رضایی‌زاده سبینی ظ (۱۳۹۱) بررسی تأثیر ناخالصی آهن بر ریزساختار و رفتار خزش فرو روندگی سوپرآلیاژ ریختگی Al-Ni -Mn -Mg. اولین همایش بین المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، تهران.
- [۱۹] طاهری م، سالمی گلعدانی ع، شیروانی ک (۱۳۹۱) تأثیر پوشش آلومینایدی بر رفتار خزشی سوپرآلیاژ پایه نیکلی GTD-111. مواد نوین ۶۸-۶۱: ۳(۷).