

## تحلیل تجربی استحکام سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 پوشش دار

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد صلاحیت‌های پروازی، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۲- استادیار، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۳- دانشیار، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰)

### چکیده

در این مقاله، تحلیل استحکام استاتیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در دو حالت بدون پوشش و پوشش دار بصورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 به طور گسترده‌ای در ساخت پره‌های توربین هواپیما استفاده می‌شود. دمای کاری این سوپرآلیاژ در محدوده ۷۶۰-۹۸۲ درجه سانتی‌گراد است. اگرچه این سوپرآلیاژ از خواص مکانیکی خوب و حفاظت قابل قبول در برابر اکسیداسیون و خوردگی داغ برخوردار است، به منظور افزایش مقاومت آن در برابر عواملی تخریب سطحی چون اکسیداسیون، خوردگی داغ و فرسایش در دمای بالا، پوشش داده می‌شود. در این مقاله پوشش‌های آلومینیدی نفوذی با دو روش جداگانه نفوذی-پودری و نفوذی-دوغابی به ترتیب با نام تجاری Codep-B و دوغابی IP1041 بر این سوپرآلیاژ اعمال می‌شود و تأثیر این پوشش‌ها بر خواص کششی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 در محدوده دمای ۲۵-۹۸۲ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، نمونه‌های مطابق با استاندارد ASTM-E8 تولید و بعد از پوشش‌دهی (با دو روش ذکر شده) به همراه نمونه‌های بدون پوشش تحت آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-E21 قرار می‌گیرند. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در دماهای کاری پایین، نمونه‌های بدون پوشش دارای استحکام کششی بهتری نسبت به نمونه‌های پوشش دار است، ولی این رفتار در دماهای کاری بالا برعکس می‌شود که این رفتار اهمیت استفاده از پوشش‌دهی سوپرآلیاژ پایه نیکل را برای کاربردهای دما بالا مشخص می‌سازد. هم‌چنین مدل با پوشش نفوذی-دوغابی در دمای کاری بالا دارای استحکام تسلیم و نهایی بهتری نسبت به پوشش نفوذی-پودری است.

واژه‌های کلیدی: پره توربین، سوپرآلیاژ، پوشش نفوذی دوغابی، پوشش نفوذی پودری، کشش.

## Experimental analysis of strength of coated nickel base superalloy Rene-80

Mehrdad Karimi, Mostafa Livani and Hamid Reza Zarei

### Abstract

In this paper, static strength analysis of superalloy Rene-80 is studied experimentally in both of the coated and uncoated cases. Superalloy Rene-80 is widely used in manufacturing aircraft turbine blades. The service temperature of this alloy is in the range of 760–982 °C. Although this superalloy has good mechanical properties and acceptable protection against oxidation and hot corrosion, it is coated to improve its resistance to surface degradation factors such as oxidation, hot corrosion and erosion at high temperatures. In this paper, penetrating aluminide coatings were applied to this superalloy with two separate methods of penetration-powder and penetration-slurry, respectively, under the brand names Codep-B and IP1041slurry, respectively and the effect of these coatings on the tensile properties of Rene-80 under the temperature range of 25-982 °C was investigated. For this purpose, the samples according to ASTM-E8 standard are produced and after coating (the two methods mentioned above) along with uncoated samples are carried out a tensile testing in accordance with the ASTM-E21 standard.

The results of the present study showed that at low operating temperatures, uncoated samples have better tensile strength than coated samples, but this behavior is reversed at high operating temperatures, which indicates the importance of using nickel-based superalloy coatings for extreme heat environments. Also, the model with IP1041slurry coating at high operating temperature has better yield and ultimate strengths than powder penetration coating.

**Key words:** Turbine blades, superalloy, slurry penetration coating, powder penetration coating, tensile.

## مقدمه

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.

دمای کارکردی سوپرآلیاژ Rene-80 ۷۶۰ تا ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱]. حداکثر دمای لبه حمله در پره‌های توربین‌های گازی در حدود ۸۷۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در مورد خصوصیات مکانیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در شرایط مختلف محیطی انجام شده است [۲ و ۳]. مورفولوژی پوشش‌های آلومینایزینگ وابسته به اکتیویته آلومینیوم در ترکیب جعبه سمانتاسیون یا دوغاب و سیکل عملیات حرارتی اعمالی بر آن است و همین دلیل با توجه به اینکه پوشش در اثر نفوذ آلومینیوم به درون سطح و یا نفوذ نیکل به بیرون از سطح صورت می‌پذیرد، باعث تشکیل لایه‌های مختلفی می‌گردد، که می‌توان آنها را در دو گروه تقسیم‌بندی نمود:

۱. گروه اول ایجاد لایه آلومینایدی (NiAl) در یک سیکل عملیات حرارتی که در این شرایط، نفوذ بیشتر نیکل به طرف خارج سطح امکان‌پذیر می‌شود، دمای پوشش دادن در این گروه بین ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۲. گروه دوم ایجاد لایه آلومینایدی با ترکیب  $Ni_2Al_3$  و سپس تغییر آن به لایه NiAl توسط عملیات نفوذ آنیلینگ است، در این فرآیند در سیکل اول نفوذ آلومینیوم به طرف داخل سطح انجام گرفته و در مرحله بعدی نفوذ نیکل به سمت خارج صورت می‌پذیرد و عملیات حرارتی دو مرحله‌ای می‌باشد و محدوده دمایی مرحله نخست بین ۷۰۰ تا ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و مرحله ثانویه که نفوذ آنیلینگ در حضور گاز آرگون است، در محدوده دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۴].

در روش پوشش‌دهی پودری-نفوذی با پودر Codep-B قطعه‌ای که باید پوشش داده شود در یک محفظه قرار داده

می‌شود و به همین دلیل است که سمانتاسیون جعبه‌ای نامیده می‌شود.

در زمینه تأثیر پوشش نفوذی آلومیناید بر 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. برخلاف 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 این پوشش‌ها بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است [۵ و ۶].

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 [۷]. DBTT این پوشش‌ها با افزایش زمان سرویس‌دهی به دلیل اکسیداسیون آلومینیوم به شکل  $\alpha-Al_2O_3$  و همچنین نفوذ آلومینیوم به زیرلایه، کاهش می‌یابد که در حقیقت باعث کاهش مقدار آلومینیوم در پوشش می‌شود [۸].

محمدی و همکاران در سال ۱۳۹۶، به بررسی اثر دما بر تحولات ساختاری و رفتار کشش گرم سوپرآلیاژ Inc718plus پرداختند. آنها رفتار کشش گرم آلیاژ را از طریق آزمایش کشش در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بررسی کردند [۹]. برجسته و همکاران در سال ۱۳۹۷، تأثیر لایه پلاتین و روش آلومینایزینگ بر زبری سطح سوپرآلیاژ پوشش داده شده توسط پلاتین-آلومیناید را بررسی کرده‌اند [۱۰]. احمدی و آقاجانی در سال ۱۳۹۷ ایجاد پوشش کامپوزیتی زیرکونیا پایدار شده با ایتریوم و آلومینیوم بر روی سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۲۵ به روش رسوب‌دهی الکتروفوریتیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که رسوب تشکیل شده در ولتاژ شش و زمان رسوب‌دهی سه دقیقه دارای سطح یکنواخت و عاری از ترک است [۱۱].

<sup>۱</sup> Morphology

نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار در محیط نمک مذاب در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط سیکلی صورت گرفت [۱۶]. جینگ<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰، کرنش فشار بحرانی و آسیب‌های سطحی پوشش سدحرارتی EB-PVD را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند [۱۷].

پژوهش‌های صورت گرفته بر روی سوپرآلیاژ Rene-80 و پوشش‌ها فقط مربوط به پوشش پودری بوده و شامل پوشش دوغابی نمی‌شود و وضعیت پوشش‌دهی با پارامترهای مختلف بررسی شده و تنها آزمون کشش بر روی آلیاژ Rene-80 با پوشش پودری صورت گرفته است. استحکام کششی، پارامتری تعیین کننده برای بررسی رفتار مواد تحت تنش‌های زیاد در شرایط محیطی دما بالا می‌باشد. این رفتار می‌بایست قبل از به کارگیری قطعه بررسی شود.

در این مقاله، به بررسی تجربی استحکام سوپرآلیاژ Rene-80 در سه حالت پوشش‌دار آلومینایدی ساده، سلیسیم آلومینایدی و بدون پوشش پرداخته می‌شود. روش انجام پوشش آلومینایدی ساده به صورت سمانتاسیون پودری جعبه‌ای و روش انجام پوشش سلیسیم آلومینایدی به صورت اسپری دوغاب می‌باشد. روش اعمال پوشش‌ها در روش سمانتاسیون جعبه‌ای با دفن در پودر Codep-B و در روش دوغابی با اسپری دوغاب IP1041 بر روی نمونه‌ها می‌باشد. نتایج تست کشش نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش در این پژوهش برای محدوده دمایی ۲۵ الی ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد انجام و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

### ساخت نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمایش

جهت انجام تست‌های کشش، نیاز به نمونه‌هایی است که شرایط ریخته‌گری و پارامترهای ساختاری آنها با پره‌های توربین‌های گازی یکسان باشند. به همین خاطر، نمونه‌ها مطابق با استاندارد در شرایط یکسان با پره‌ها به روش ریخته‌گری دقیق تحت خلأ در کوره ذوب القایی تولید شده و بعد از آماده‌سازی مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. نمونه‌های مورد بررسی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 می‌باشند که ابعاد و شکل هندسی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-E8 می‌باشند. جزئیات ابعادی و شکل نمونه‌های تحت آزمون بترتیب در شکل ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است.

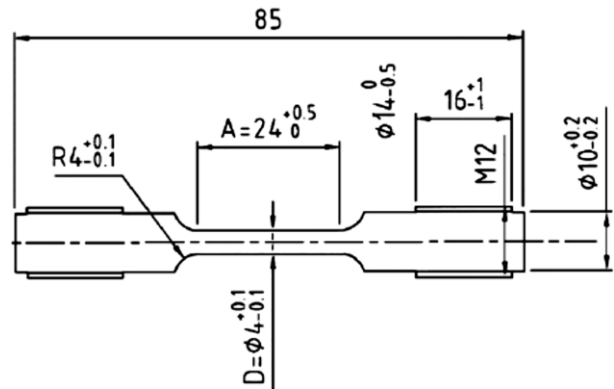
همکاران در سال ۱۳۹۷، سنتز پودر هگزا آلومینات لانتانیم به منظور پوشش‌دهی به روش پلاسما اسپری بر روی سوپرآلیاژ پایه نیکل به عنوان پوشش سدحرارتی را مورد بررسی قرار دادند. آنها ابتدا به سنتز پودر به روش حالت جامد و سپس به بررسی و فرآوری آن جهت انجام پوشش‌دهی پلاسما اسپری پرداختند [۱۲]. سمیعی و عباسی در سال ۱۳۹۸، رفتار تغییرشکل گرم سوپرآلیاژ پایه کبالت Haynes 25 در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق آزمایش کشش گرم با نرخ کرنش ۰/۰۱ را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش دما از ۹۵۰ به ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، کرنش شکست کاهش و با افزایش مجدد دما افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه شد که در محدوده دمای حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش کسر حجمی کاربیدهای  $M_6C$  غنی از تنگستن، سبب کاهش میزان انعطاف‌پذیری آلیاژ می‌شود. وقوع تبلور مجدد دینامیکی سبب بهبود انعطاف‌پذیری از طریق مکانیزم ریزدانه‌سازی می‌شود. بنابراین دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین میزان انعطاف‌پذیری را نسبت به دیگر دماها از خود نشان داد [۱۳]. صاحبی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸، توسعه و تحلیل پوشش‌های سدحرارتی بر روی پره‌های توربین گازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که متداول‌ترین ماده مورد استفاده به عنوان ماده بستر، سوپرآلیاژهای پایه نیکل و برای تاپ‌کت زیرکونیا پایدار شده با ایتیریم می‌باشد و همچنین متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای اعمال باندکت، اسپری پلاسما با فشار کم، اسپری سرد و روش شعله اکسیژن با سرعت زیاد است، اما برای تاپ‌کت، رسوب بخار فیزیکی پرتوالکترونی و تکنیک‌های پاشش پلاسما اتمسفر است [۱۴]. مائور<sup>۲</sup> و وبن در سال ۲۰۲۰، پوشش‌هایی با ریزساختار ستونی برای کاربردهای سدحرارتی را بررسی نمودند. آنها تولید پوشش سدحرارتی ساختاری ستونی توسط SPS و PS PVD بررسی کردند [۱۵]. جیسش و آریواراسو<sup>۳</sup> در سال ۲۰۲۰، مطالعات مقایسه‌ای در مورد رفتار خوردگی داغ اسپری پلاسما هوا و پوشش سوخت اکسیژن با سرعت بالا بر روی سوپرآلیاژ L605 پایه کبالت در محیط توربین گازی انجام دادند. مطالعات آنها روی خوردگی داغ

<sup>۱</sup> Sahith<sup>۲</sup> Georg & Vaben<sup>۳</sup> Jithesh & Arivarasu<sup>۴</sup> Jing

ریخته‌گری قالب‌ها در شرایط خلأ با فشار  $2 \times 10^5$  بار و پیش‌گرم قالب‌ها در دمای  $1150$  درجه سانتی‌گراد به مدت  $24$  ساعت و با ذوب‌ریزی در دمای  $1450$  تا  $1470$  درجه سانتی-گراد صورت می‌گیرد. نمونه بعد از ریخته‌گری، ماشین‌کاری و باربرداری می‌شوند تا سطح صافی داشته و به پارامترهای ابعادی مورد نظر در استاندارد ASTM-E8 برسند.

قسمت پیچی و محل نصب اکستنسیومتری به روش ماشین‌کاری و قسمت طول‌سنج به روش سنگ‌زنی خزشی پرداخت کاری می‌شود. میزان براده‌برداری با دور کم و در چندین مرتبه صورت می‌گیرد.

پس از ماشین‌کاری، برای اطمینان از عدم هرگونه تخلخل بیش از اندازه- منظور از تخلخل بیش از اندازه مقداری از تخلخل می‌باشد که با توجه به فوکوس در تصویر گرفته شده توسط دستگاه با چشم قابل رویت نباشد- نمونه‌ها توسط اشعه ایکس به روش میکروفوکوس کنترل کیفی می‌شوند. رادیوگرافی (RT) یک فرآیند کارا در شناسایی عیوب داخلی مواد و ساختارها بدون ایجاد تخریب می‌باشد. هدف اصلی از انجام رادیوگرافی در قطعات ریخته‌گری شده، شناسایی عیوبی است که اثر مخربی بر روی استحکام محصول دارند. قطعات تولید شده با استفاده از تجهیزات استاندارد رادیوگرافی به صورتی که تخریبی صورت نگیرد، بررسی می‌شوند تا اندازه و نوع ناپیوستگی‌های موجود شناسایی گردند. سیستم اشعه ایکس میکروفوکوس با استفاده از یک منبع تقریبی نقطه‌ای می‌تواند در واقع لبه‌های تار ایجاد شده توسط دستگاه‌هایی با فوکوس بزرگتر را از بین ببرد و طرح کلی تصویر را روشن سازد. بعد از آن، تمامی نمونه‌ها به منظور انحلال فازهای رسوبی و همگن‌سازی ریزساختار تحت عملیات حرارتی انحلال و همگن‌سازی قرار گرفتند. عملیات حرارتی کامل سوپرآلیاژ Rene-80 مطابق استاندارد GE انجام شده است.



شکل ۱- ابعاد نمونه آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-E8



شکل ۲- تصویر نمونه آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-E8

جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ، نمونه پولکی در قسمت بالایی راهگاه‌های هر خوشه در نظر گرفته می‌شود. برای آنالیز کوانتومتری دستگاه کوانتومتری قبلاً با نمونه‌های استاندارد کالیبره می‌شود. آنالیز کوانتومتری سوپرآلیاژ ریخته‌گری شده در

جدول ۱ نشان داده شده است [۱۸ و ۱۹].

نمونه‌ها در قالب سرامیکی با چینش هشت‌تایی جهت ذوب‌ریزی آماده می‌شوند. فرآیند آماده‌سازی این قالب‌ها سرامیکی شامل تولید و مونتاژ نمونه مومی و بعد از آن ایجاد قالب سرامیکی می‌باشد. قالب سرامیکی از چند لایه پرایمری و چند لایه بک‌آپ ایجاد شده است.

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

می‌رود. داده‌های بدست آمده در این آزمون، برای تعیین خواص مکانیکی ماده استفاده می‌شود و کمیت‌های تنش تسلیم و تنش نهایی کششی بدست می‌آیند.

یکی از روش‌های تعیین‌کننده محدوده دمای مناسب کارکرد سوپرآلیاژها، استفاده از تغییرات خواص مکانیکی از جمله خواص کششی با دما می‌باشد. در این مقاله، آزمون‌های کشش در دماهای ۲۵، ۷۶۰، ۸۷۱ و ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM-E21 انجام شده است [۲۱]. نرخ بارگذاری ۰/۰۰۷ بر دقیقه و در کوره ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با دقت  $\pm 2$  درجه سانتی‌گراد، توسط دستگاه کشش مدل LLOYD صورت گرفته است. ترموکوپل از نوع R پلاتین-رودیوم در محدوده طول سنج متصل شده است. دمای پایدار شدن ساختار نمونه‌ها در کوره یک ساعت در نظر گرفته شده است. در هر آزمایش تنش تسلیم، تنش نهایی کششی و درصد کاهش سطح مقطع برای هر نمونه تعیین می‌گردد. خواص مکانیکی شامل تنش تسلیم، استحکام نهایی کششی و درصد کاهش سطح مقطع برای سوپرآلیاژ Rene-80، مطابق با استاندارد C50TF28 ارزیابی می‌شود. با توجه به میزان کرنش شکست پوشش و کرنش در نقطه گلوئی شدن در منحنی کشش، نمونه‌های پوشش داده تا میزان ۱ درصد کرنش تحت کشش قرار گرفتند. اعمال پیش‌بار و پیش‌گرم که با هدف تخلیه تنش پسماند می‌باشد، با وارد نمودن نیروی ۳۰۰ نیوتن با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه در جهت کشش، به مدت یک ساعت در نظر گرفته شده است.

### نتایج و بحث

یکی از مهمترین روش‌ها برای تعیین دمای مناسب کارکرد سوپرآلیاژها، استفاده از داده‌های آزمون کشش است. در این بخش، در ابتدا نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج موجود در مراجع اعتبارسنجی می‌شود و سپس نتایج تجربی استخراج شده آزمون کشش نمونه‌های بدون پوشش، نمونه پوشش‌دار با پوشش دوغابی و با پوشش پودری-نفوذی اکتیویته پایین ارائه خواهند شد.

### اعتبارسنجی نتایج حاضر

در جدول ۲ نتایج آزمون کشش بدست آمده از پژوهش حاضر با نتایج آزمون کشش مرجع [۲۲] که اثر پوشش نفوذی

نمونه‌های پوشش‌دار بعد از انجام مرحله عملیات حرارتی انحلال و همگن‌سازی، برای پوشش‌دهی آماده‌سازی می‌شوند. آماده‌سازی شامل دو مرحله آماده‌سازی مکانیکی با سندبلاست و آماده‌سازی شیمیایی با شستشو در محلول اسیدی اسید کلریدریک ۳۷ درصد صورت می‌گیرد.

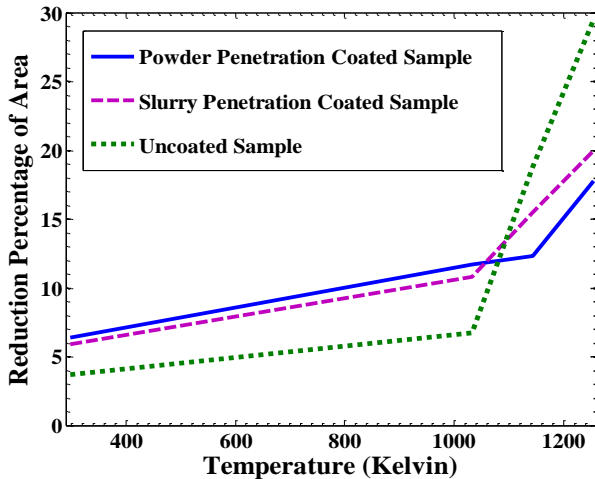
### پوشش‌دهی نمونه‌ها

مراحل پوشش‌دهی نمونه‌ها به دو روش پودری-نفوذی اکتیویته پایین و روش دوغابی در این بخش تشریح می‌شود. نحوه آماده‌سازی پودر در روش پودری-نفوذی اکتیویته پایین مطابق با استاندارد GE می‌باشد. بعد از هم‌خوردن و آماده شدن پودر، نمونه‌ها درون یک جعبه از جنس IN-600 با پودر پک شده و تحت عملیات حرارتی در دمای ۱۰۵۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت قرار می‌گیرد و بعد از خنک شدن و خارج شدن از پک، دوباره سندبلاست شده تا سطح تمیزی داشته باشند.

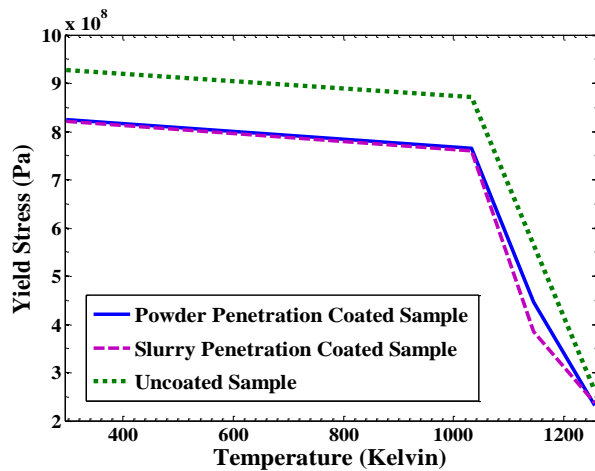
در روش دوغابی با دوغاب IP1041، بعد از هم‌خوردن دوغاب به مدت ۳۰ دقیقه، دو لایه بر روی نمونه اعمال می‌شود. برای اعمال لایه دوم، باید لایه اول خشک شود تا حدی که به رنگ خاکستری روشن تبدیل گردد. بعد از اعمال دو لایه پوشش، نمونه‌ها جهت خشک شدن در کوره‌ای در دو مرحله قرار می‌گیرند، در مرحله اول ابتدا در دمای ۷۵ درجه سانتی-گراد به مدت ۱۵ دقیقه و بعد از آن در دمای ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار می‌گیرند. سپس در مرحله دوم تحت عملیات حرارتی پوشش‌دهی در دمای ۸۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و بعد از آن در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت قرار می‌گیرند. بعد از اتمام پوشش‌دهی، نمونه‌ها از کوره خارج شده و برای تمیزکاری سندبلاست می‌شوند [۲۰].

### نحوه انجام آزمون کشش

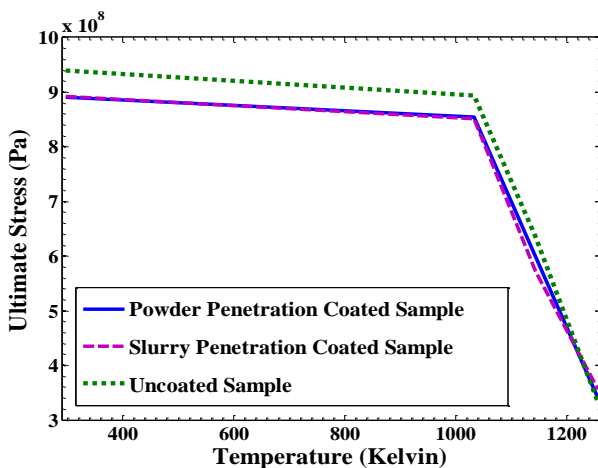
آزمون کشش یکی از آزمون‌های مخرب است که نمونه تحت نیروی کششی تک‌بعدی قرار می‌گیرد؛ این درحالی است که ازدیاد طول نیز به صورت همزمان با نیروی اعمالی ثبت می‌شود. نتایج حاصل از آزمون به طور معمول برای انتخاب یک ماده به منظور کنترل کیفیت و پیش‌بینی اینکه چگونه یک ماده تحت انواع دیگری از نیروها واکنش نشان می‌دهد به کار



شکل ۳- منحنی تغییرات درصد ضریب کاهش سطح مقطع برای نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش با دما



شکل ۴- منحنی تغییرات تنش کششی تسلیم برای نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش با دما



شکل ۵- منحنی تغییرات تنش کششی نهایی برای نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش با دما

آلومینایدی بر خواص کشش سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 را مورد مطالعه قرار دادند، مقایسه شده است. همانطور که جدول ۲ نشان می‌دهد، نتایج پژوهش حاضر دارای انطباق خوبی با نتایج مرجع [۲۲] است.

### نتایج آزمون کشش

خواص کششی شامل تنش تسلیم، تنش نهایی و درصد کاهش سطح مقطع می‌باشد. نتایج این آزمون برای نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار با پوشش دوغابی و با پوشش پودری-نفوذی اکتیویته پایین در دماهای کاری ۲۹۸ تا ۱۲۵۵ کلوین در جدول ۳ و همچنین شکل ۳ الی شکل ۵ نشان داده شده است.

گفتنی است نتایج ارائه شده در

و شکل ۳ الی شکل ۵، با میانگین‌گیری از چند نمونه تست برای هر سه نمونه بدون پوشش و پوشش‌دار استخراج شده است.

در شکل ۳، منحنی تغییرات درصد ضریب کاهش سطح مقطع (RA) برای نمونه‌های بدون پوشش با نمونه‌های پوشش دوغابی و پوشش پودری-نفوذی اکتیویته پایین با دما نشان داده شده است. همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد، با افزایش دما از ۲۹۸ تا ۱۲۵۵ کلوین، تغییرات درصد ضریب کاهش سطح مقطع برای هر سه نمونه بدون پوشش و پوشش‌دار افزایش می‌یابد که این رفتار منطقی بنظر می‌رسد، چرا که با افزایش دما، مدول الاستیک کاهش پیدا کرده و ماده نرم‌تر می‌شود.

از طرفی برای هر سه نمونه، نرخ افزایش درصد ضریب کاهش سطح مقطع از دمای حدود ۱۱۰۰ کلوین افزایش چشمگیری پیدا می‌کند که این رفتار هم ناشی از کاهش ناچیز مقدار مدول الاستیک سوپرآلیاژ پایه نیکل تا این دما و کاهش چشمگیر آن بعد از این دما می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه نتایج نمونه‌های پوشش دار و بدون پوشش روش حاضر با نتایج مرجع [۲۲]

نمونه‌های بدون پوشش			نمونه‌های پوشش دار			دما (سانتی‌گراد)
استحکام نهایی کشش	تنش تسلیم	درصد کاهش سطح مقطع	استحکام نهایی کشش	تنش تسلیم	درصد کاهش سطح مقطع	
حاضر	حاضر [۲۲]	حاضر [۲۲]	حاضر کدپ دوغابی	حاضر کدپ دوغابی	حاضر کدپ دوغابی	[۲۲]
۹۵۰/۲	۹۵۸/۲۹	۹۴۱	۹۴۳/۴۷	۳/۹	۳/۴۴	۲۵
۹۲۹/۲	۹۱۱/۳۳	۹۱۳	۹۰۶/۸۷	۳/۵	۴/۰۴	۲۵
۹۱۵/۸۳	۹۱۳/۸۳	۸۹۰/۸	۸۸۸/۹۸	۴/۸۸	۵/۸۸	۷۶۰
۸۷۰/۸۱	۸۶۸/۸۱	۸۹۸/۷۶	۸۵۱/۷۶	۶/۵	۷/۵۵	۷۶۰
						۱۷/۲۷
				۶۱۵/۴۶		۱۹/۷۱
۶۲۵	۶۳۵/۲۷	۵۵۰	۵۵۲/۳۶	۲۰/۹	۲۱/۸۸	۸۷۱
۶۴۰	۶۴۴/۳۶	۵۶۱	۵۶۳/۰۶	۱۷	۱۶/۹۴	۸۷۱
۶۳۹	۶۴۶/۴۴	۵۸۴	۵۹۴/۳۲	۱۸/۴	۱۹/۶۸	۸۷۱
				۵۸۴/۱۶		۲۷/۶۲
۳۴۵	۳۴۳/۹۳	۲۹۹	۲۹۵/۰۶	۳۱	۳۳/۰۳	۹۸۲
۳۲۰	۲۹۵/۰۶	۲۲۶	۲۱۰/۵۵	۲۸	۲۲/۶۳	۹۸۲

جدول ۳ - نتایج حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دار

نمونه بدون پوشش			نمونه پوشش دار			دما (سانتی‌گراد)
تنش نهایی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	درصد کاهش سطح مقطع	تنش نهایی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	درصد کاهش سطح مقطع	
کدپ دوغابی	کدپ دوغابی	کدپ دوغابی	کدپ دوغابی	کدپ دوغابی	کدپ دوغابی	
۹۳۹/۷	۹۲۷	۳/۷	۸۹۲	۸۹۰/۹	۸۲۰	۲۵
۸۹۳/۳۲	۸۷۰/۳۷	۶/۷۲	۸۵۱/۱	۸۵۴	۷۵۹/۲	۷۶۰
۶۳۴/۶۷	۵۶۵	۱۸/۷۷	۵۷۱/۵	۵۹۹/۵	۳۸۵	۸۷۱
۳۳۲/۵	۲۶۲/۵	۲۹/۵	۳۵۵/۵	۳۴۰/۵	۲۳۶/۵	۹۸۲

دماهای کاری بالا مشخص می‌شود. این رفتار در تنش‌های تسلیم و نهایی نیز مشاهده می‌شود. شکل ۴ و شکل ۵ نشان می‌دهند که تغییرات تنش کششی تسلیم و تنش کششی نهایی با افزایش دما تا دمای حدود ۱۱۰۰ کلوین ناچیز و کاهش است و با افزایش دمای بیشتر، تنش کششی تسلیم و تنش کششی نهایی با سرعت کاهش می‌یابد. هم‌چنین با دقت بر شکل ۴ و شکل ۵ و مشخص می‌شود که در دماهای بیشتر از ۱۱۰۰ کلوین، نرخ کاهش استحکام تسلیم و نهایی مدل بدون پوشش بیشتر از مدل‌های پوشش دار است، بطوری‌که در دمای ۱۲۵۵ کلوین، استحکام نهایی مدل بدون پوشش از دو مدل پوشش دار کمتر

همانطور که در شکل ۳ مشهود است، در دماهای کاری پایین‌تر از حدود ۱۱۰۰ کلوین، درصد کاهش سطح مقطع نمونه بدون پوشش، مقدار خیلی کمتری نسبت به نمونه‌های پوشش دار است، در حالی که برای دماهای کاری بالاتر از ۱۱۰۰ کلوین که شرایط کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 در توربین‌های هوایی است، درصد کاهش سطح مقطع نمونه بدون پوشش با سرعت افزایش پیدا می‌کند؛ هم‌چنین شکل ۳ نشان می‌دهد که نمونه با پوشش پودری، دارای مقدار درصد کاهش سطح مقطع کمتری نسبت به دو نمونه دیگر در دماهای کاری بالاتر از ۱۱۰۰ کلوین است که با توجه به اهمیت تیرانس ابعادی پره‌های توربین، رفتار بهتر نمونه‌های پوشش دار در

شده است که حکایت از رفتار بهتر مدل‌های پوشش‌دار در دماهای کاری بالا است. علاوه بر دقت بر نتایج ارائه شده در مشخص می‌شود مدل با پوشش نفوذی-پودری در دمای کاری بالا (۱۲۵۵ کلوین)، دارای استحکام تسلیم و نهایی بهتری نسبت به پوشش نفوذی دوغابی است. عمده‌ترین علت تغییرات خواص کششی برای نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش، به تفاوت خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی زمینه با پوشش بر می‌گردد. با توجه به اینکه در عملیات پوشش‌دهی نفوذی دوغابی و پودری - اکتیویته پایین، عناصر زمینه به سمت بیرون نفوذ می‌کنند، فازهای ناخواسته در پوشش مخصوصاً در منطقه نفوذ ایجاد می‌شود، که باعث کاهش سطح مقطع می‌گردد. این موضوع دلیلی بر افت خواص کششی نمونه‌های پوشش‌دار در دماهای کاری پایین است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به روش تجربی، تأثیر پوشش‌های آلومینایدی نفوذی-پودری و نفوذی-دوغابی بر رفتار کششی سوپرآلیاژ Rene-80 در دماهای کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج گردید:

۱. تغییرات خواص کششی شامل تنش کششی تسلیم و تنش کششی نهایی، و درصد کاهش سطح مقطع برای نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار تا دمایی حدود ۱۱۰۰ کلوین تقریباً ثابت و بعد از آن خواص کششی با نرخ زیاد کاهش می‌یابد.
۲. میزان کاهش خواص استحکامی نمونه بدون پوشش نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار در دماهای کاری بالا بیشتر است، بطوری‌که استحکام نهایی نمونه بدون پوشش که در دمای ۲۹۸ کلوین نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار بیشترین مقدار را داشت و برابر با ۹۳۹/۷ مگاپاسکال بود با افزایش دمای کاری تا ۱۲۵۵ کلوین، بیشترین نرخ کاهش استحکام نهایی برابر با ۶۴/۶ درصدی را تجربه کرد و به کمتر از ۳۳۲/۵ مگاپاسکال رسید که این رفتار نشان از اهمیت پوشش در استحکام استاتیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در شرایط کاری با دمای بالا است.
۳. در دماهای کاری پایین، نمونه‌های بدون پوشش دارای استحکام کششی بهتری نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار

- است، ولی این رفتار در دماهای کاری بالا برعکس می‌شود که این رفتار اهمیت استفاده از پوشش‌دهی سوپرآلیاژ پایه نیکل را برای کاربردهای دما بالا مشخص می‌سازد.
۴. مدل با پوشش نفوذی-دوغابی در دمای کاری بالا دارای استحکام تسلیم و نهایی بهتری نسبت به پوشش نفوذی-پودری است.
  ۵. در دماهای کاری پایین‌تر از ۱۱۰۰ کلوین، درصد کاهش سطح مقطع نمونه بدون پوشش نسبت به نمونه‌های با پوشش نفوذی-دوغابی (۷۳ درصد کمتر) و پوشش نفوذی - پودری (۶۰ درصد کمتر) مقدار خیلی کمتری دارد، در حالی که برای دماهای کاری بالاتر از ۱۱۰۰ کلوین که شرایط کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 در توربین‌های هوایی است، درصد کاهش سطح مقطع نمونه بدون پوشش سرعت افزایش پیدا می‌کند؛ بطوریکه برای دما کاری ۱۲۵۵ کلوین، درصد کاهش سطح مقطع نمونه بدون پوشش نسبت به نمونه‌های با پوشش نفوذی-دوغابی (۳۲ درصد بیشتر) و پوشش نفوذی - پودری (۴۰ درصد بیشتر) افزایش چشمگیری پیدا می‌کند که با توجه به اهمیت تolerانس ابعادی پره‌های توربین، رفتار بهتر نمونه‌های پوشش‌دار در دماهای کاری بالا مشخص می‌شود.

### منابع و مراجع

- [1]. Domas, P.A., Antolovich, S.D., "A mechanistically based model for high temperature notched LCF of René 80", Engineering Fracture Mechanics, Volume 21, Issues 1, pp. 203-214, 1985.
- [2]. Goswami, T., Hanninen, H., "Dwell effects on high temperature fatigue damage mechanisms: Part II", Materials and Design, Volume 22, Issue 3, pp. 217-236, 2001.
- [3]. Antolovich, S.D., Liu, S., Baur, R., "Low cycle fatigue behavior of Rene 80 at elevated temperature", Metallurgical and Materials Transactions, Volume 12, pp. 473-481, 1981.



- Engineering, Volume 12, Issue 4, 2018. (in Persian)
- [12]. Khorramirad, M.M., Rahimpour, M.R., Hadavi, M., Shirvani Jozdani, K., "Synthesis of the lanthanum magnesium hexaaluminate powder in order to plasma spray coating on the nickel super alloy as a thermal barrier coating", *Advanced Processes in Materials*, Volume 12, Issue 3, pp. 173-183, 2018. (in Persian)
- [13]. Samiei, Z.G., Abbasi S.M., "Investigation of hot deformation behavior of Haynes 25 superalloy through hot tensile testing", *Journal of Advanced Materials in Engineering*, Research Institute of Metal Materials, Malek Ashtar University, Tehran, 2009 (in Persian).
- [14]. Sahith, M.S., Giridhara, G., Kumar, R.S., "Development and analysis of thermal barrier coatings on gas turbine blades – A Review", *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, Issue 1, pp. 2746-2751, 2018.
- [15]. Mauer, G., Vaßen, R., "Coatings with Columnar Microstructures for Thermal Barrier Applications", *Advanced Engineering Materials*, Volume 22, Issue 6, pp. 1-9, 2020.
- [16]. Jithesh, K., Arivarasu, M., "Comparative studies on the hot corrosion behavior of air plasma spray and high velocity oxygen fuel coated Co-based L605 superalloys in a gas turbine environment", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 27, Issue 5, pp. 649-659, 2020.
- [17]. Jing, F., Yang, J., Yang, Z., Zeng, W., "Critical compressive strain and interfacial damage evolution of EB-PVD thermal barrier coating", *Materials Science and Engineering: A*, Volume 776, 2020.
- [18]. IR Air Force Technical Publication.
- [4]. Bianco, R., A. Rap, R., "Pack cementation Aluminide coatings on superalloys: codeposition of Cr and reactive Element", *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 140, Issue 4, pp. 1181-1189, 1993.
- [5]. Chang, W.H., "Tensile embitterment of turbine blade alloys after high-temperature exposure", *Superalloy*, 1972.
- [6]. Kameda, J., Bloomer, T.E., Sugita, Y., Ito, A., Sakurai, S., "High temperature environmental attack and mechanical degradation of coatings in gas turbine blades", *Materials Science and Engineering: A*, Volume 229, Issues 1-2, pp. 42-54, 1997.
- [7]. Goward, G.W., "Current research on the surface protection of superalloys for gas turbine engines", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Volume 22, Issue 10, pp. 31-39, 1970.
- [8]. Eskner, M., "Mechanical behavior of gas turbine coatings", Phd Thesis, Royal Institute of Technology, ISBN 91, pp. 7283-7861, 2004.
- [9]. Sultan Mohammadi, Z., Citrus, M., Abbasi, S.M., Badri, H., "The effect of temperature on structural changes and hot tensile behavior of Inc 718 plus superalloy", 6th International Conference and Exhibition of Metallurgical and Materials Engineering, Tehran, 2017. (in Persian)
- [10]. Barjesteh, M., Abbasi, S.M., Shirvani, K., Zangeneh, K., "The effect of platinum layer and aluminizing process on surface roughness of coated superalloy by Pt-Al", *Journal of Advanced Materials in Engineering*, Volume 38, Issue 2, pp. 35-53, 2019. (in Persian)
- [11]. Ahmadi, M., Aghajani, H., "Creation of YSZ / Al composite coating on 825 Incoloy superalloy by electrophoretic deposition method", *New Processes in Materials*

- [21]. ASTM Standard, "Elevated Temperature Tension Testing Of Metallic Material", E21, pp. 191, 1998.
- [22]. Rahmani, K., Nategh, S., "Influence of aluminide diffusion coating on the tensile properties of the Ni-base superalloy René 80", Surface and Coatings Technology, Volume 202, Issue 8, pp. 1385–1391, 2008.
- [19]. ASTM Standard, "Test Method For Tension Testing Of Metallic Material", E8, pp. 62, 1998.
- [20]. Technical data sheet, IPAL Diffusion Coating, IP041.