



مقاله پژوهشی:

تأثیر عملیات پیرسازی بر خواص مکانیکی دما بالای سوپر آلیاژ نسل جدید Co-7Al-7W-4Ti-2Ta

مصطفی اطمینان^۱، مریم مرکباتی^{۲*}، سید مهدی قاضی میرسعید^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

۳- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: m_morakabati@mut.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی تأثیر عملیات پیرسازی بر خواص گسیختگی تنش و فشار گرم سوپر آلیاژ پایه کبالت نسل جدید با ترکیب Co-7Al-7W-4Ti-2Ta است. پس از ذوب سوپر آلیاژ نامبرده به روش VIM و ذوب مجدد به روش VAR، شمش به دست آمده تحت همگن سازی در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۱۰ ساعت قرار گرفت. سپس عملیات پیرسازی روی نمونه‌های همگن سازی شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد طی زمان‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام شد. پس از بررسی‌های ریزساختاری و آنالیز فازی بوسیله میکروسکوپ الکترونی و آزمایش الگوی تفرق اشعه ایکس، خواص مکانیکی دما بالا شامل آزمایش‌های فشار گرم و گسیختگی تنش انجام یافت. نتایج نشان داد که آلیاژ مذکور در حالت ریختگی حاوی فازهای گاما، گاما پرایم، بتا و آلفا است که با انجام عملیات همگن سازی فازهای گاما پرایم، بتا و آلفا در داخل فاز گاما انحلال می‌یابند. با پیرسازی آلیاژ مورد مطالعه رسوب‌های گاما پرایم جوانه زنی و رشد می‌کنند که با افزایش زمان پیرسازی کسر حجمی و اندازه این رسوب‌ها نیز افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش فشار روی نمونه پیرسازی شده به مدت ۱۶ ساعت در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نشان داد که استحکام آلیاژ در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت که نشان دهنده بروز پدیده تسلیم نامتعارف به واسطه رسوب‌دهی فاز گاما پرایم است. همچنین حداکثر مقاومت در برابر گسیختگی تنش در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد تحت تنش ۳۰۰ مگاپاسکال و به مدت ۲۲ ساعت مربوط به نمونه‌ای بود که در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت پیرسازی شده بود.

واژه‌های کلیدی:

سوپر آلیاژ پایه کبالت نسل جدید، پیرسازی، فشار گرم، گسیختگی تنش.

ارجاع به این مقاله:

مصطفی اطمینان، مریم مرکباتی، سید مهدی قاضی میرسعید، تأثیر عملیات پیرسازی بر خواص مکانیکی دما بالای سوپر آلیاژ نسل جدید Co-7Al-7W-4Ti-2Ta، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، زمستان، ۱۳۹۹، جلد ۴، شماره ۴، صفحات ۱۹۳-۲۰۱.
شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2020.245029.1125

۱- مقدمه

مانع از لغزش نابجایی‌ها و در نتیجه تغییر شکل می‌شود. لذا استحکام آلیاژهای پایه نیکل در دماهای بالا افزایش می‌یابد [۱،۲]. در پژوهش‌های اخیر، دانشمندان [۵-۱]، جهت حفظ خواص دما بالا در سوپر آلیاژهای پایه کبالت، با ایده گرفتن از وقوع پدیده تسلیم نامتعارف در سوپر آلیاژهای پایه نیکل؛ فاز γ' منظم با ساختار $L1_2$ را با ترکیب $Co_3(Al,M)$ معرفی و با طراحی ترکیب شیمیایی، سوپر آلیاژهای پایه کبالت نسل جدید را توسعه دادند.

سوپر آلیاژهای پایه نیکل رایج‌ترین آلیاژها برای کاربردهای دما بالا هستند. این دسته از مواد استحکام دما بالای خود را مدیون فاز γ' با نظم $L1_2$ هستند. استحکام این فاز با افزایش دما افزایش می‌یابد که به رفتار تسلیم نامتعارف موسوم است. در حین اعمال کرنش و لغزش نابجایی‌ها در دماهای بالا، نحوه قرارگیری اتم‌ها در ساختار بلوری موجب ایجاد عیوبی مشابه عیوب نقص چیدمان تحت عنوان عیوب مرز ضد فازی^۱ در شبکه می‌شود. این عیوب

¹ Anti-Phase Boundary

پیرسازی، در پژوهش حاضر تاثیر عملیات پیرسازی بر ریزساختار و خواص مکانیکی دما بالا شامل خواص فشاری و گسیختگی تنش سوپرآلیاژ پایه کبالت نسل جدید بر پایه ترکیب Co-7Al-7W-4Ti-2Ta بررسی شد.

۲- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش، با بهره‌گیری از کوره القایی تحت خلاء VIM^2 ، شمش با ترکیب اسمی (Co-7Al-7W-4Ti-2Ta %wt) به وزن ۲ کیلوگرم تولید شد. عملیات ذوب مجدد به وسیله کوره قوس الکتریکی ذوب مجدد تحت خلاء^۳ انجام پذیرفت تا جدایش عناصر آلیاژی و ساختارهای دندریتی کاهش یابد. با توجه به حضور فازهای ناخواسته و مضر عملیات همگن‌سازی در دمای $1250^{\circ}C$ به مدت ۱۰ ساعت در اتمسفر هوا انجام یافت تا فازهای مضر ساختار ریختگی و جدایش‌ها و ناهمگنی‌های ترکیب شیمیایی کاهش پیدا کنند. سپس شمش همگن‌سازی شده در آب سرد شد. جهت بررسی تاثیر زمان عملیات حرارتی، شمش تحت پیرسازی در دمای $800^{\circ}C$ به مدت زمان‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت قرار گرفت و در هوا سرد شد.

پس از پیرسازی در شرایط متفاوت، سطح نمونه‌ها سنباده‌زنی و پولیش شد. به منظور آماده‌سازی برای بررسی ریزساختار از محلول حکاکی با ترکیب $10\text{ ml HNO}_3 + 100\text{ ml H}_2\text{O}_2$ + 100 ml HCl و به مدت ۲ تا ۲۰ دقیقه استفاده شد. سپس سطح نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، ساخت شرکت Zeiss و مدل DSM-960A مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی و شناسایی فازهای موجود، آزمون تفرق اشعه X روی سه نمونه ریختگی، همگن‌شده و پیرسازی‌شده در $800^{\circ}C$ به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. این آزمایش توسط دستگاه Rigaku SmartLab تحت ولتاژ 40 kV ، شدت جریان 30 mA و اشعه Cu ($\lambda=0.179\text{ nm}$) مورد استفاده قرار گرفت. زاویه آنالیز پرتو از $2\theta=30^{\circ}$ تا $2\theta=100^{\circ}$ تنظیم شد و روبش اشعه در هر 0.5° درجه و با زمان توقف ۴ ثانیه صورت گرفت.

برای انجام آزمایش فشار گرم از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵ و ارتفاع $7/5$ میلی‌متر استفاده شد. ابتدا نمونه‌های همگن‌سازی شده و همچنین نمونه‌های پیرسازی شده در دمای $800^{\circ}C$ به مدت ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت تحت آزمایش فشار گرم در $500^{\circ}C$ قرار گرفتند. نمونه‌ای که استحکام تسلیم بیشتری داشت، برای بررسی در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و $1000^{\circ}C$ نیز انتخاب شد تا رفتار تنش غیرطبیعی ماده مورد بررسی قرار گیرد. آزمایش فشار گرم در نرخ کرنش ثابت 10^{-2} s^{-1} به وسیله دستگاه

با توجه به تنوع و درصد عناصر آلیاژی فازهای متفاوتی در سوپرآلیاژهای پایه کبالت نسل جدید ایجاد می‌شوند. مهم‌ترین این فازها عبارتند از، فاز زمینه γ ، رسوب‌های مکعبی شکل γ' و فازهای بین‌فلزی نرم مانند μ ، β و χ است [۳،۶،۷،۸].

کبالت عنصر غالب فاز زمینه γ است و عناصر آلیاژی به صورت جانشین داخل آن توزیع می‌شوند. در زمان انجام عملیات همگن‌سازی سوپرآلیاژهای پایه کبالت، رسوب‌ها و فازهای موجود در ساختار، داخل این فاز انحلال پیدا می‌کنند. سپس در حین عملیات پیرسازی با کاهش حد اشباع غلظت عناصر آلیاژی فازهای جدید رسوب‌گذاری می‌کنند. فاز α با ساختار بلوری HCP آلوتروپ کبالت است که داخل فاز زمینه ایجاد می‌شود. این فاز حین عملیات حرارتی یا سرمایش پس از آن ایجاد می‌شود [۲،۳،۷]. فاز γ' با ساختار بلوری L_{12} ، مهم‌ترین فاز موجود در سوپرآلیاژهای پایه کبالت نسل جدید است که رفتار تنش برحسب دمای آن غیر طبیعی است. به عبارت دیگر، در محدوده دمایی خاصی، تنش سیلان یا همان استحکام تسلیم این ترکیب بین‌فلزی، با افزایش دما، افزایش پیدا می‌کند. پایداری این فاز وابسته به ترکیب شیمیایی و دمای مورد بررسی است. ترکیب این فاز به صورت $\text{Co}_3(\text{Al},\text{M})$ است و برای تشکیل این فاز وجود عناصر کبالت، آلومینیم و حداقل یک عنصر فلزی دیگر مانند تنگستن، تیتانیم و تانتالیم ضروری است [۲،۸].

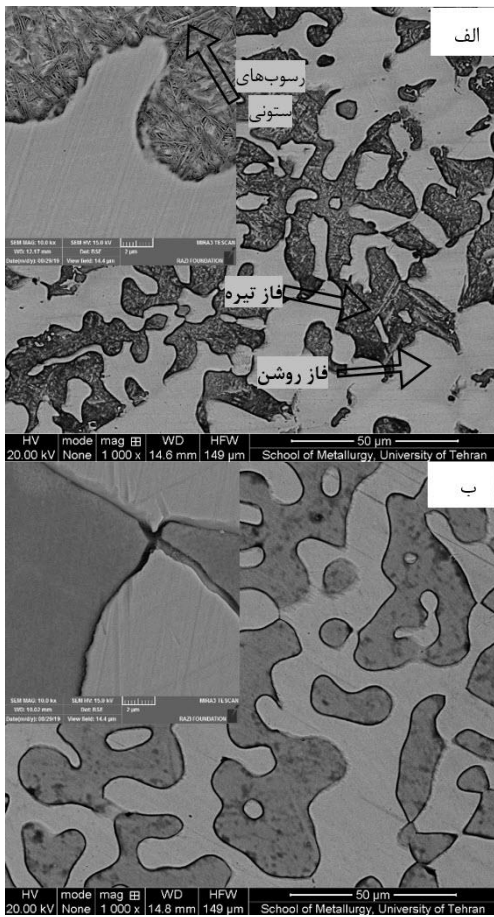
فاز β با ساختار بلوری B2، فازی تیره رنگ در ساختار سوپرآلیاژهای پایه کبالت است که حین سرد شدن پس از عملیات همگن‌سازی و یا در حین عملیات پیرسازی ایجاد می‌شود. این فاز غنی از آلومینیم است (CoAl) و نزدیک به ۵۰ درصد وزن آن را آلومینیم تشکیل می‌دهند. به‌همین دلیل در نواحی مجاور فاز β ، فاز γ تشکیل می‌شود که تهی از آلومینیم و فاز γ' است. همچنین اگر غلظت تیتانیم بیش از حد زیاد باشد این فاز با ترکیب Co_2AlTi نیز تشکیل می‌شود. فاز β در دمای محیط استحکام بالایی دارد اما خواص استحکام دما بالا را شدیداً کاهش می‌دهد [۲،۳،۷].

مطالعات [۲،۴،۵] نشان می‌دهند که با جایگزین کردن مقادیری تیتانیم و تانتالیم به جای تنگستن، کسر حجمی، دمای انحلال و استحکام رسوبات γ' افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر، ترکیب مناسب جهت دستیابی به ساختار و خواص دما بالای مناسب بر پایه Co-7Al-7W-4Ti-2Ta انتخاب شد.

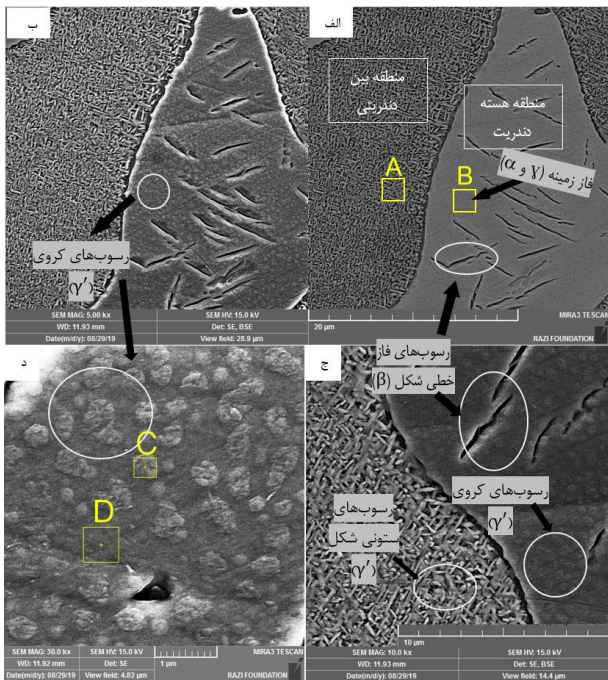
با توجه به پتانسیل بالای سوپرآلیاژهای پایه کبالت نسل جدید برای کاربردهای دما بالا و عدم انجام تحقیقات منسجم و هدفمند در مورد بهینه‌سازی خواص مکانیکی دما بالا از طریق عملیات

³ Vacuum Arc Remelting

² Vacuum Induction Melting



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آلیاژ مورد مطالعه در حالت: الف- ریختگی پس از ذوب مجدد در کوره VAR و ب- پس از همگن‌سازی در دمای 1250°C به مدت ۱۰ ساعت.



شکل ۲- تصاویر SEM نمونه پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت ۲۴ ساعت در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت: الف: تصویر الکترون برگشتی و ب، ج و د: تصویر الکترون ثانویه. نواحی مربوط به فازهای مختلف داخل شکل با پیکان مشخص شدند و داخل پرانتز نوع هر فاز مشخص شده است که با الگوی تفرق اشعه X اثبات می‌شود- نواحی A، B، C و D مربوط به آنالیز نقطه‌ای هستند.

Instron مدل ۸۵۰۲ انجام پذیرفت. در نهایت، آزمایش گسیختگی تنشی با توجه به نتایج آزمایش فشار گرم، در شرایطی که ماده بیشترین رفتار تنشی غیرطبیعی از خود نشان داد، یعنی دمای 770°C و تنش 300MPa ، انجام شد. این آزمایش با دستگاه M.T مدل ZR 564 روی ۳ نمونه که در دمای 800°C در زمان‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت پیرسازی شدند، انجام شد تا اثر فازهای مختلف بر خواص خزشی بررسی شود.

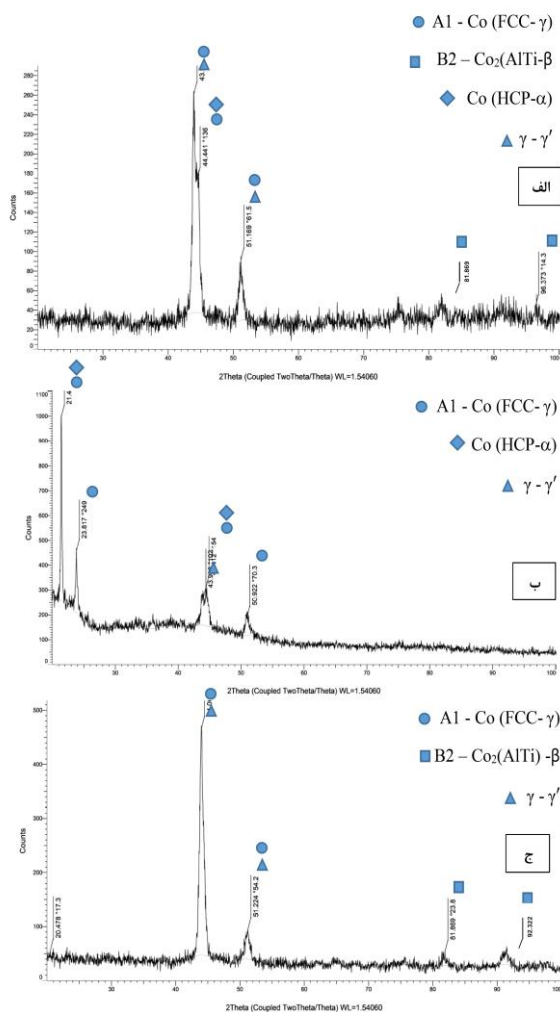
۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ریزساختار آلیاژ مورد مطالعه در حالت ریختگی پس از ذوب مجدد در VAR و سپس همگن‌سازی شده در دمای 1250°C به مدت ۱۰ ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ریزساختار حاوی ۲ ناحیه است که یکی به رنگ روشن و دیگری به رنگ تیره قابل مشاهده هستند. ناحیه روشن هسته‌های دندریت و ناحیه تیره مناطق بین‌دندریتی است. داخل ناحیه بین‌دندریتی، رسوب‌های ستونی شکلی مشاهده می‌شود که با انجام عملیات همگن‌سازی انحلال پیدا کرده‌اند. در ادامه، جهت تعیین فازها از الگوی تفرق اشعه X کمک گرفته شده که به آن پرداخته می‌شود.

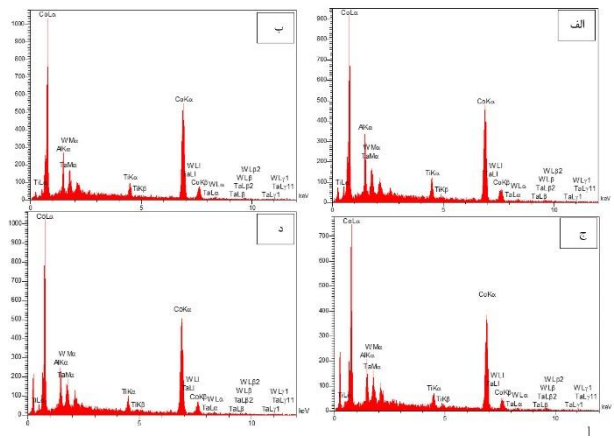
شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مربوط به نمونه پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با پیرسازی در این شرایط دمایی و زمانی، رسوب‌های ستونی ساختار ریختگی که با عملیات همگن‌سازی انحلال پیدا کرده بودند، با انجام پیرسازی با اندازه و مورفولوژی بسیار ظریف‌تری نسبت به ساختار ریختگی رسوب‌گذاری مجدد شدند. اندازه این رسوب‌ها 437nm نانومتر است. همچنین رسوب‌های خطی شکل تیره‌رنگی، داخل هسته‌های دندریتی رسوب‌گذاری کرده‌اند. رسوب‌های کروی شکل دیگری با اندازه 587nm نانومتر نیز رسوب‌گذاری کرده‌اند که مورفولوژی آن‌ها مشابه فاز γ' است. شکل (۳) و جدول (۱) نتایج حاصل از آنالیز EDS نقاط A، B، C و D مربوط به شکل (۲-الف) و (۲-د) را نشان می‌دهد.

تحقیقات [۱،۲] نشان داده است که عناصر تانتالیم، تیتانیوم، آلومینیم و تنگستن میل به جایگیری در فاز γ' دارند و عنصر کبالت میل به جایگیری در فاز زمینه γ دارد. همچنین عناصر تیتانیوم و آلومینیم، میل به تشکیل فاز β نیز دارند. با توجه به این مباحث می‌توان عنوان داشت که احتمال تشکیل رسوب‌های γ' و β در فاز بین دندریتی بیشتر از فاز زمینه است. اما تصاویر میکروسکوپ الکترونی، اثری از رسوب‌های γ' داخل فاز بین دندریتی را نشان نمی‌دهند.

زیادی از فازهای γ و α حاصل شده است. در این فازها کبالت عنصر اصلی تشکیل دهنده است و مابقی عناصر آلیاژی بصورت جانشین، محلول جامد تشکیل می‌دهند. اما مطابق با شکل (۴-ج) با انجام عملیات حرارتی پیرسازی در 800°C شرایط برای جوانه‌زنی و رسوب‌گذاری فازهای γ' و β مساعد شده است. بنابراین پس از عملیات پیرسازی از کسر حجمی فازهای γ و α کاسته شده و به کسر حجمی فازهای γ' و β افزوده شده است. به طوری که شدت پیک مربوط به ساختار دوفازی γ/γ' نمونه همگن شده برابر با ۲۵۰ و در نمونه پیرسازی شده برابر با ۴۸۰ بوده است. این درحالی است که در نمونه همگن‌سازی شده فقط یک پیک مربوط به ساختار دوفازی γ/γ' وجود دارد و بیشترین پیک با شدت ۱۰۰۰ مربوط به فاز γ است. با انجام عملیات حرارتی پیرسازی در این دما، رسوبات γ' با کسر حجمی مناسبی جوانه‌زنی و رشد می‌کنند.



شکل ۴- الگوی تفرق اشعه X نمونه‌های الف- ذوب مجدد شده، ب- همگن شده در 1250°C به مدت ۱۰ ساعت و ج- پیرسازی شده در 800°C به مدت ۲۴ ساعت.



شکل ۳- نتایج حاصل از آنالیز EDS نقاط: الف: A، ب: B، ج: C و د: D مربوط به شکل ۲- الف و د.

جدول ۱- نتیجه آنالیز EDS نقاط A، B، C و D مربوط به شکل‌های (۲-الف) و (۲-د) (درصد اتمی).

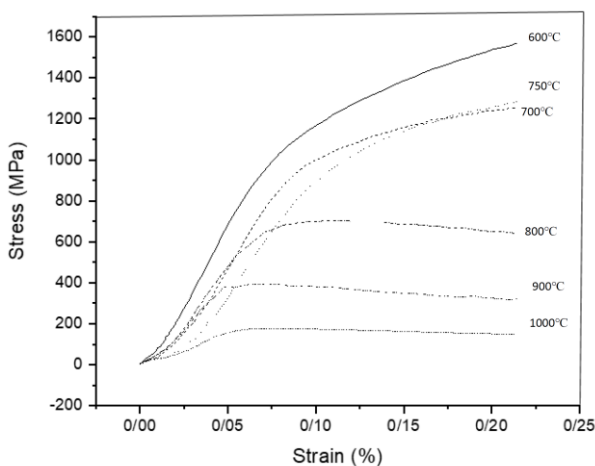
درصد اتمی	کبالت	آلمینیم	تنگستن	تیتانیوم	تانتالیم
A	۷۴/۸	۱۳	۴	۶	۱/۵
B	۸۰	۹	۵/۵	۴/۵	۱
C	۷۹	۱۰	۴/۸	۴/۱	۲/۲
D	۸۱	۹/۸	۳/۷	۴	۱/۵

نکته قابل توجه این است که آنالیز نقطه‌ای در مقیاس‌های نانومتری دقت پائینی دارد. با توجه به ابعاد نانومتری رسوبات γ' ، این امر باعث شده تا ترکیب نقاط با یکدیگر اختلاف محسوسی نداشته باشد. بنابراین برای بررسی بهتر فازها نیاز به آزمایش الگوی تفرق اشعه X است.

برای بررسی فازها، آنالیز پراش اشعه X نمونه‌ها در شرایط پس از ذوب مجدد به وسیله فرآیند VAR، همگن‌سازی در دمای 800°C به مدت ۱۰ ساعت و پیرسازی در دمای 1250°C به مدت ۲۴ ساعت در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-الف) و (۴-ب) در ساختار آلیاژ ذوب مجدد شده در VAR، علاوه بر فازهای γ و γ' ، مقادیر اندکی هم فازهای α و β وجود دارند. اما کسر حجمی بیشتری از ساختار این آلیاژ را فاز γ تشکیل داده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل‌های (۱)، (۲)، (۴-الف) و (۴-ب) می‌توان نتیجه گرفت که ذرات فاز β در ساختار آلیاژ ریختگی داخل فاز بین‌دندریتی و در میان رسوبات γ' و زمینه γ قرار گرفته‌اند. از این رو به نظر می‌رسد که در ساختار ریختگی فاز ستونی شکل همان فاز γ' است؛ مناطق هسته‌های دندریتی مشابه فازهای γ و α و همچنین مناطق تیره رنگ داخل فاز بین‌دندریتی نیز مشابه فازهای α و β هستند. رسوبات γ' و β پس از همگن‌سازی تا حد زیادی انحلال یافته‌اند و ساختار یکنواخت حاوی مقادیر

می‌دهد که تا دمای 900°C رفتار آلیاژ مورد مطالعه پس از تسلیم همراه با کارسختی است. اما با رسیدن به دمای 900°C رفتار کارسختی ماده شدیداً کاهش پیدا کرده است، به طوری که در دماهای بیش از 900°C استحکام نهایی و استحکام تسلیم اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

همچنین با توجه به شکل (۶)، مدول یانگ تا دمای تغییر چندانی نداشته است. اما نمودار مربوط به آزمایش فشار گرم در 1000°C مدول یانگ متفاوتی با سایر نمودارها دارد. مدول یانگ نمودار مربوط به آزمایش فشار گرم در دمای 1000°C کمتر از نمودار مربوط به فشار گرم در سایر دماها است. از آنجائی که مدول یانگ با نیروی پیوندهای بین اتمی در ارتباط است، این پدیده بیانگر ضعیف شدن قدرت پیوندهای بین اتمی در این دما است.



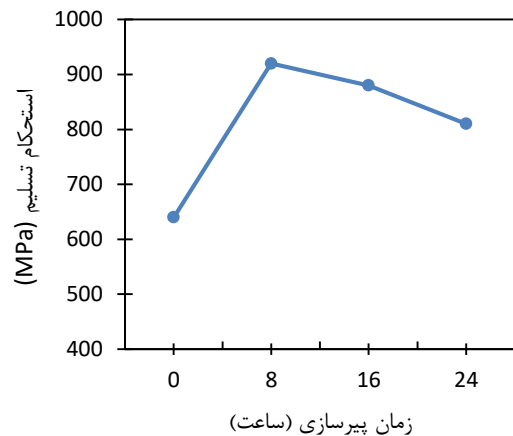
شکل ۶- نمودار تنش- کرنش مهندسی مربوط به نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان ۱۶ ساعت (کد هر نمودار، دمای آزمایش فشار گرم مربوط به آن نمودار را نشان می‌دهد).

شکل (۷) تغییرات استحکام تسلیم نمونه پیرسازی شده در دمای 800°C و به مدت زمان ۱۶ ساعت را در دماهای 500°C تا 1000°C نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، با افزایش دمای تغییر شکل از 500°C تا 600°C ، روند تغییر استحکام آلیاژ نزولی است. به طور کلی، با افزایش دمای آزمایش، انتظار می‌رود که اثر استحکام بخشی به واسطه افزایش دما، کاهش یابد. اما با افزایش دما از 600°C تا 700°C ، استحکام آلیاژ، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش دما از 700°C تا 1000°C روند افت استحکام دوباره مشاهده می‌شود.

علت مشاهده پدیده تسلیم نامتعارف و افزایش در تنش تسلیم با افزایش دما، اثر استحکام بخشی رسوبات منظم γ' با ساختار کریستالوگرافی L12 است. این رسوبات با افزایش دما دستخوش افزایش استحکام می‌شوند.

با توجه به نتایج آزمایش الگوی تفرق اشعه X در شکل (۴) و شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان نتیجه گرفت که فازهای کروی شکل که داخل زمینه توزیع شده‌اند فاز γ' و فازهای خطی شکل تیره رنگ که پس از پیرسازی در دمای 800°C رسوب گذاری کردند، فاز غنی از آلومینیوم β است.

شکل (۵) تغییرات استحکام تسلیم فشاری نمونه‌های همگن سازی شده و همچنین پیرسازی شده در 800°C و زمان‌های متفاوت را در دمای 500°C نشان می‌دهد.



شکل ۵- استحکام تسلیم فشاری در دمای 500°C مربوط به نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C و نمونه همگن سازی شده در 1250°C به مدت ۱۰ ساعت.

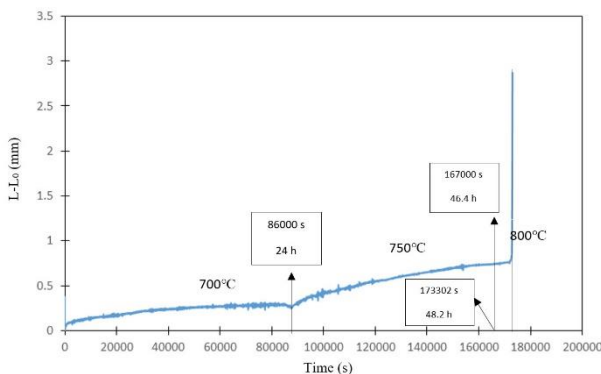
همان‌طور که انتظار می‌رود با انجام پیرسازی استحکام افزایش پیدا کرده است. استحکام تسلیم نمونه همگن سازی شده 620MPa بوده است که پس از پیرسازی در 800°C و به مدت ۸ ساعت استحکام تسلیم به 930 مگاپاسکال افزایش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل‌های (۱) تا (۳) و الگوی تفرق اشعه X در شکل (۴-ج) که پیش‌تر مورد بررسی قرار گرفت، این افزایش استحکام مدیون رسوب گذاری ذرات فاز γ' است.

اما مشابه با مطالعات [۲ و ۱۷] با افزایش بیشتر زمان پیرسازی، استحکام به تدریج کاهش پیدا می‌کند. این رفتار نیز با توجه به رسوب گذاری فاز مضر β قابل توجیه است. با این که با گذشت زمان، رسوبات γ' کسر حجمی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند، اما اثر مخرب رسوبات فاز β مانع از افزایش استحکام می‌شود و استحکام تسلیم را کاهش می‌دهد.

در شکل (۶) منحنی سیلان نمونه پیرسازی شده در شرایط ثابت 800°C و زمان ۱۶ ساعت پس از آزمایش فشار در محدوده دمایی 600°C تا 1000°C نشان داده شده است. این شکل نشان

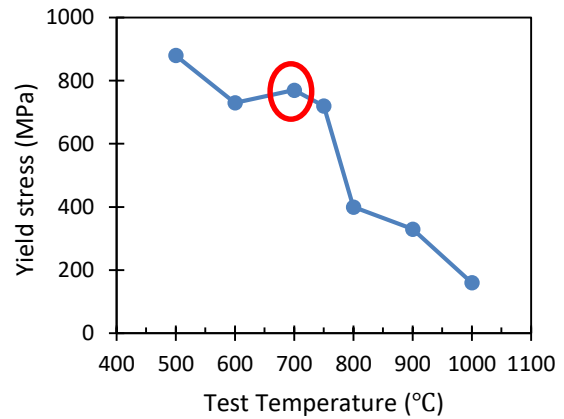
که بیشترین رفتار تنش غیر طبیعی در دمای 700°C ایجاد شده بود، به این ترتیب، آزمایش گسیختگی تنشی در این دما انجام شد تا شرایط مناسبی جهت بررسی حاصل شود. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج آزمایش‌های پیشین احتمال می‌رود که نمونه‌ای که به مدت ۲۴ ساعت در دمای 800°C پیرسازی شده است کمترین خواص مقاومت خزشی را داشته باشد. بنابراین ابتدا آزمایش گسیختگی تنشی روی این نمونه انجام شد تا رفتار خزشی آلیاژ مورد مطالعه معیارسنجی شود.

شکل (۸)، نتایج آزمایش گسیختگی تنشی نمونه مذکور را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، با قرار دادن نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت ۲۴ ساعت در دماهای 700°C و 750°C تحت تنش 300 MPa و پس از ۴۶ ساعت، تغییری در رفتار نمونه مشاهده نشد. اما با افزایش دمای آزمایش استحکام گسیختگی تا 800°C ، نرخ خزش این نمونه بسیار افزایش پیدا کرد تا جایی که پس از ۲/۲ ساعت این نمونه شکست. بنابراین برای آزمایش استحکام گسیختگی دیگر نمونه‌ها و بررسی مناسب خواص خزشی، دمای 770°C (که بین دماهای 750°C و 800°C است) و تنش 300 MPa انتخاب شد.



شکل ۸- نتایج حاصل از آزمایش گسیختگی تنشی در دماهای 750°C و 700°C و تنش 300 MPa مربوط به نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان ۲۴ ساعت.

شکل (۹) نتایج حاصل از آزمایش گسیختگی تنشی در دمای 770°C و تنش 300 MPa مربوط به نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان ۸ و ۱۶ ساعت را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش گسیختگی تنشی نشان داد که نمونه‌ای که به مدت ۱۶ ساعت در دمای 800°C پیرسازی شده است، مقاومت بیشتری در برابر خزش از خود نشان داده است. این نمونه ۲۲/۳ ساعت تحت شرایط آزمایش گسیختگی تنشی مقاومت کرده است در حالی که نمونه‌ای که به مدت ۸ ساعت در دمای 800°C پیرسازی شده، ۱۵/۸۳ ساعت تحت شرایط مشابه عمر خزشی داشته است.



شکل ۷- استحکام تسلیم فشاری نمونه پیرسازی شده در 800°C به مدت ۱۶ ساعت در دماهای 500°C – 1000°C . (ناحیه مربوط به رفتار تنشی غیر طبیعی با دایره قرمز رنگ مشخص شده است.)

بنا بر گزارش [۱۱، ۱۰، ۱۲، ۱۴]، عدم انطباق کم رسوب‌های γ' باعث می‌شود که نابجایی‌های متحرک برای ادامه حرکت خود با فصل مشترک γ/γ' درگیر شوند. پس از این که نابجایی متحرک از فصل مشترک γ/γ' عبور کرد، باید رسوب γ' را برش دهد. ساختار رسوب‌های γ' باعث می‌شود که نابجایی متحرک به دو نابجایی جزئی غیرمتحرک تجزیه شود. در این شرایط منطقه‌ای شبیه به عیب نقص چیدمان بین این دو نابجایی جزئی غیر متحرک ایجاد می‌شود که عیب مرز ضدفازی نام دارد. با افزایش دما میل ساختار $L1_2$ به تشکیل این نابجایی‌های جزئی افزایش می‌یابد. به این ترتیب، استحکام ساختار افزایش پیدا می‌کند. بنابراین کسر حجمی بیشتر رسوب‌های γ' ، استحکام بیشتری را به همراه خواهد داشت. البته چنان که مشاهده می‌شود، در آلیاژ Co-7Al-7W-4Ti-2Ta رفتار تنش غیرطبیعی در محدوده دمایی 600°C تا 700°C رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که تحقیقاتی [۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷] روی سوپرآلیاژهای پایه کبالت نسل جدید با ترکیب مشابه تحقیق حاضر نیز رفتار تنشی غیرطبیعی مشابهی را در محدوده دمایی 750°C گزارش داده‌اند.

می‌توان نتیجه گرفت که با روند نزولی استحکام در دماهای بالاتر از 700°C میل رسوب‌های γ' به تشکیل عیوب مرز ضدفازی کاهش پیدا کرده و در واقع بخشی از استحکام آلیاژ در این دما ناشی از محلول جامد است. روند نزولی تغییرات استحکام آلیاژ با دما، مشابه موارد اشاره شده در رابطه با آلیاژ Co-Al-W و Co-Ti است [۱].

به منظور نتیجه‌گیری نهایی، آزمایش گسیختگی تنشی روی نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام شد. شرایط آزمایش گسیختگی تنشی مطابق با نتایج حاصل از آزمایش فشار گرم تعیین شد. از آنجائی

با توجه به شکل‌های (۲)، (۴)، (۵) و (۶) و نتایج آزمایش گسیختگی تنشی شکل‌های (۸) و (۹)، انجام عملیات پیرسازی به مدت ۱۶ ساعت در دمای 800°C موجب ایجاد ساختاری متشکل از فازهای γ/γ' و حداقل فاز β می‌شود. پیرسازی در این شرایط دمایی و زمانی منجر به ایجاد کسر حجمی بهینه‌ای از رسوب‌های γ' می‌شود که اثر مخرب فازهای β نیز به‌وسیله رسوب‌های γ' جبران می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج بررسی‌های ریزساختاری و آنالیز پراش اشعه X نشان داد که آلیاژ Co-7Al-7W-4Ti-2Ta پس از ریخته‌گری و ذوب مجدد حاوی فازهای γ' ، β ، α و γ است که با همگن‌سازی همه فازها داخل فاز γ انحلال یافتند. همچنین با پیرسازی آلیاژ همگن‌سازی شده، رسوب‌های کروی و ستونی γ' به همراه رسوب‌های خطی β جوانه‌زنی و رشد کردند.

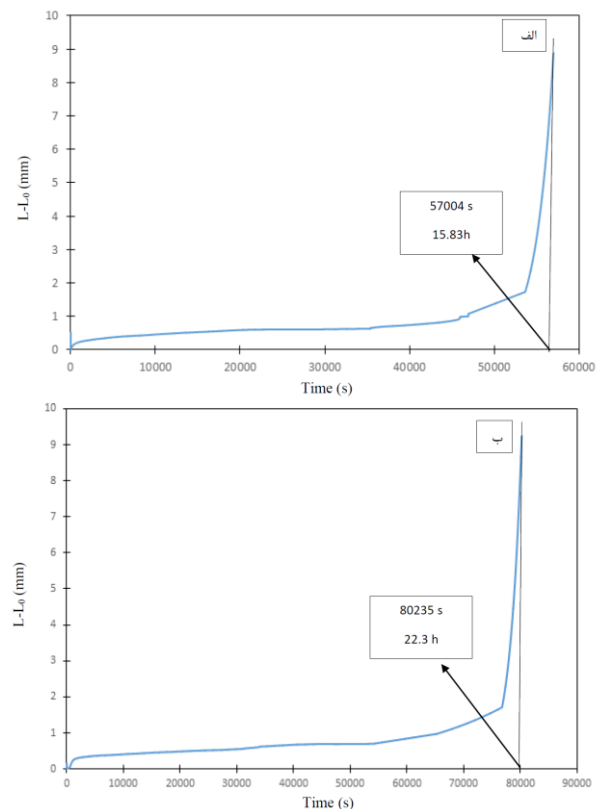
۲- آزمایش فشار گرم نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت زمان‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت نشان داد که بیشترین استحکام تسلیم در دمای 500°C مربوط به نمونه پیرسازی شده به مدت ۸ ساعت است و با افزایش زمان پیرسازی استحکام کاهش یافت.

۳- نمونه پیرسازی شده در دمای 800°C به مدت ۱۶ ساعت، بیشترین استحکام و رفتار تنشی غیرطبیعی در دمای 700°C را از خود نشان داد. استحکام تسلیم فشاری این نمونه با افزایش دما از 600°C تا 700°C به میزان 80MPa افزایش یافت.

۴- آزمایش گسیختگی تنشی نمونه‌های پیرسازی شده به مدت زمان‌های مختلف در دمای 800°C نشان داد که نمونه‌ای که به مدت ۱۶ ساعت پیرسازی شده بیشترین مقاومت به خزش را دارد. کمترین مقاومت به خزش نیز مربوط به نمونه‌ای است که به مدت ۲۴ ساعت در دمای 800°C پیرسازی شده است که با نتایج SEM و XRD تطابق دارد.

مراجع

- [1] Gu Y., Harada H., Cui C., Ping D., Sato A., Fujioka J., New Ni-Co-base disk superalloys with higher strength and creep resistance, Scripta Materialia, 2006, 9, 815-818.
- [2] Bocchini P.J., Microstructure and mechanical properties in gamma (face-centered cubic)+gamma prime (L12) precipitation-strengthened cobalt-based superalloys, Ph.D. Thesis., Northwestern University, 2015.
- [3] Yan H.Y., Vorontsov V.A., Dye D., Alloying effects in polycrystalline γ' strengthened Co-Al-W base alloys, Intermetallics, 2014, 48, 44-53.



شکل ۹- نتایج حاصل از آزمایش گسیختگی تنشی در دمای 770°C و تنش 300MPa مربوط به نمونه‌های پیرسازی شده در دمای 800°C و زمان‌های: الف- ۸ ساعت و ب- ۱۶ ساعت.

با توجه به نتایج آزمایش‌های الگوی تفرق اشعه X شکل (۴)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل‌های (۲) و (۳)، علی‌رغم این که در نمونه‌ای که به مدت ۱۶ ساعت پیرسازی شده است، فاز مخرب β نیز ایجاد شده است، این نمونه حاوی کسر حجمی بیشتری از γ' است. بنابراین مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل خزشی از خود نشان داده است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که در نمونه‌ای که به مدت ۱۶ ساعت پیرسازی شده است، برآیند اثر تقویت کننده رسوب γ' و اثر مخرب رسوب β در جهت افزایش استحکام خزشی بوده است. اما در مورد نمونه‌هایی که به مدت ۸ و ۲۴ ساعت در دمای 800°C پیرسازی شده‌اند شرایط اینگونه نیست. با توجه به شکل‌های (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۸) و (۹)، در نمونه‌ای که به مدت ۸ ساعت پیرسازی شده با این که کسر حجمی رسوب‌های مخرب β بسیار کمتر است، اما کسر حجمی رسوب γ' نیز نسبت به نمونه پیرسازی شده به مدت ۱۶ ساعت کمتر است. بنابراین مقاومت خزشی کاهش یافته است. در نمونه‌ای که به مدت ۲۴ ساعت پیرسازی شده، کسر حجمی رسوب‌های مخرب β به اندازه‌ای افزایش پیدا کرده که اثر استحکام بخشی رسوب γ' از بین رفته است. بنابراین مقاومت خزشی به شدت کاهش یافت و به حدود ۲ ساعت رسید.

- mechanical properties of Ti-and Ta-containing Co–Al–W-base superalloys studied by atom probe tomography and nanoindentation, *Acta Materialia*, 2014, 78, 78-85.
- [12] Casas R., Gálvez F., Campos M., Microstructural development of powder metallurgy Cobalt-based superalloys processed by field assisted sintering techniques (FAST), *Materials Science and Engineering*, 2018, 724, 461-468.
- [13] Zhou X., Fu H., Zhang Y., Xu H., Xie J., Effect of Ta and Ti on the solidification characteristics of novel γ' -strengthened Co-base superalloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 768, 464-475.
- [14] Coujou A., Coulomb P., Suzuki effect: some observations of in situ electron microscopy, *Scripta Metallurgica*, 1988, 22(12) 1841-1846.
- [15] Longquan S., Northwood D.O., Cao Z., The properties of a wrought biomedical cobalt-chromium alloy, *Journal of Materials Science*, 1994, 29(5) 1233-1238.
- [16] Suzuki A., Denolf G., Pollock T. M., Flow stress anomalies in γ/γ' two-phase Co–Al–W-base alloys, *Scripta Materialia* 2007, 56 (5) 385-388.
- [17] Makineni S., Samanta A., Rojhirunsakool T., Alam T., N. B, Singh A., Banerjee R., Chattopadhyay K., A new class of high strength high temperature Cobalt based $\gamma-\gamma'$ Co-Mo-Al alloys stabilized with Ta addition, *Acta Materialia*, 2015, 97(15) 2-40.
- [4] Bauer A., Neumeier S., Pyczak F., Göken M., Microstructure and creep strength of different γ/γ' -strengthened Co-base superalloy variants, *Scripta Materialia*, 2010, 12, 1197-1200.
- [5] Bauer A., Neumeier S., Pyczak F., Singer R.F., Göken M., Creep properties of different γ' -strengthened Co-base superalloys, *Materials Science and Engineering*, 2012, 550, 333-341.
- [6] Zhu L., Wei C., Qi H., Jiang L., Jin Z., Zhao J.C., Experimental investigation of phase equilibria in the Co-rich part of the Co-Al-X (X= W, Mo, Nb, Ni, Ta) ternary systems using diffusion multiples, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 691, 110-118.
- [7] Ding X.F., Mi T., Xue F., Zhou H.J. Wang M.L., Microstructure formation in $\gamma-\gamma'$ Co–Al–W–Ti alloys during directional solidification, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 599, 159-163.
- [8] McDevitt E.T., Feasibility of cast and wrought Co-Al-WX gamma-prime superalloys, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, 2014, 783, 1159-1164.
- [9] Mughrabi H., The importance of sign and magnitude of γ/γ' lattice misfit in superalloys with special reference to the new γ' -hardened Cobalt-base superalloys, *Acta Materialia*, 2014, 81, 21-29.
- [10] Xue, F., Zhou, H., Chen, X., Shi, Q., Chang, H., Wang, M., Ding, X. and Feng, Q., Creep behavior of a novel Co-Al-W-base single crystal alloy containing Ta and Ti at 982 °C, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2014, 14, 15002.
- [11] Povstugar I., Choi P-Pa., Neumeier S., Bauer A., Zenk C.H., Göken M., Raabe D., Elemental Partitioning and



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Effect of Aging on the High Temperature Mechanical Properties of a Novel Co-7Al-7W-4Ti-2Ta Superalloy

Mostafa Etminan¹, Maryam Morakabati^{*2}, Sayed Mahdi Qazi Mirsaeid³

1. M.Sc. Student, Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
 2. Assistant professor, Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
 3. M.Sc., Researcher, Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
- * Corresponding author: m_morakabati@mut.ac.ir

Paper history:

Received: 23 August 2020
Accepted: 01 December 2020

Abstract:

The aim of this study was to evaluate the effect of aging on the stress rupture and hot pressure of a novel cobalt base superalloy of Co-7Al-7W-4Ti-2Ta composition. After melting the superalloy by VIM method and remelting by VAR method, the ingot was homogenized at 1250 °C for 10 hours. Then, aging treatment was performed on homogenized samples at 800 °C for 8, 16 and 24 hours. After microstructural and phase analysis by SEM and X-ray diffraction pattern testing, the high temperature mechanical properties including hot pressure and stress rupture tests were performed. The results showed that the alloy in the cast condition contains γ , γ' , α and β phases in which the γ' , α and β phases are dissolved in γ phase by homogenization treatment. By aging of the studied alloy, γ' precipitates nucleate and grow, where in by increasing aging time the volume fraction and size of these precipitates increases. The results of pressure tests in the temperature range of 500 °C to 1000 °C showed that the strength of the alloy increased at a temperature of 700 °C, which indicates the occurrence of the stress anomaly phenomenon as a consequence of γ' precipitation. Besides, the highest resistance to stress rupture at 770 °C under 300 MPa for 22 hours was achieved for the specimen aged at 800 °C for 16 hours.

Keywords:

Novel Co-base superalloy,
Aging,
Hot compression,
Stress rupture

Please cite this article using:

Mostafa Etminan, Maryam Morakabati, Sayed Mahdi Qazi Mirsaeid, Effect of Aging on the High Temperature Mechanical Properties of a Novel Co-7Al-7W-4Ti-2Ta Superalloy, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 4(4) 193-201.

DOI: 10.22034/FRJ.2020.245029.1125

Journal homepage: www.foundingjournal.ir