



پژوهش نامه ریخته‌گری

تأثیر کار سرد بر ریزساختار و خواص مکانیکی دما محیط

سوپر آلیاژ Nimonic 263

هادی نوری، سید مهدی عباسی*، مریم مرکباتی، ادلی آخوندزاده
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت
*نویسنده مسول: sma_abbasi@mut.ac.ir

چکیده:

در پژوهش حاضر، تأثیر میزان کارسرد بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی دمای محیط سوپرآلیاژ Nimonic 263 پس از نورد سرد و عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، روی نمونه‌های نورد گرم‌شده، کارسرد به میزان ۳۳، ۶۰ و ۷۰ درصد اعمال گردید. پس از آن، کلیه نمونه‌های کارسرد شده تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و عملیات حرارتی پیرسازی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. تحولات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی و همچنین آنالیز فازی با کمک پراش پرتو X بررسی شد. خواص مکانیکی دمای محیط نیز با انجام آزمایش‌های سختی‌سنجی و کشش سرد ارزیابی گردید. در بررسی‌های ریزساختاری، با افزایش میزان کارسرد تا ۶۰ درصد، اندازه دانه کاهش و سختی افزایش یافت. نتایج آزمایش کشش دمای محیط نشان داد که با انجام کارسرد، استحکام کششی سوپرآلیاژ Nimonic 263 از ۹۵۷ مگاپاسکال در حالت نورد گرم‌شده به ۱۰۷۴ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین، با افزایش میزان کارسرد تا ۶۰ درصد، استحکام کششی روند افزایشی داشت و پس از آن، روند کاهش را نشان داد.

کلید واژه: سوپرآلیاژ Nimonic 263، کارسرد، خواص مکانیکی، ریزساختار.

مقدمه

سوپرآلیاژ Nimonic 263 با توجه به کاربرد در محفظه احتراق توربین‌های گازی از طریق حضور فازهای استحکام بخش رسوبی، محلول جامد و کارسرد تقویت می‌شوند [1-3]. در این آلیاژ فازهای استحکام بخش براساس شرایط مختلف عملیات حرارتی در ساختار تشکیل می‌شود که شامل فاز رسوبی γ' ، کاربیده‌های MC و $M_{23}C_6$ می‌باشند [4-6].

محققان [7,8] در پژوهش‌های خود به بررسی تاثیر شرایط عملیات حرارتی بر مورفولوژی مرزدانه و خواص استحکامی آلیاژ Nimonic 263 پرداخته‌اند، که نشان داده شده با تغییر شرایط نرخ سرمایش و انجام عملیات حرارتی چند مرحله‌ای مورفولوژی مرزهای دانه را از مسطح به مضرس تغییر داد که می‌تواند منجر به افزایش خواص مکانیکی آلیاژ گردد.

تغییر شکل پلاستیک در دماهای بالا برای جلوگیری از کرنش سخت شدن انجام می‌شود و هدف اصلی از کارگرم از بین بردن ساختار ریختگی و دستیابی به دانه‌های ریزتر و بهبود ویژگی‌های ریزساختاری برای خواص مکانیکی بهتر بدون ایجاد مشکل برای سایر خواص است. همچنین تغییر شکل سرد روشی برای تولید مقاطع نازک آلیاژ مورد نظراست و با انجام کار سرد دانسیته نابعایی‌ها افزایش یافته و از این رو منجر به تغییر خواص مکانیکی آلیاژ و بهبود استحکام آلیاژ می‌شود [9,10].

آنیل انحلالی برای انحلال فازهای ثانویه، آماده سازی برای پیرسختی و همگن کردن ریزساختار قبل از پیرسختی به کار می‌رود. با توجه به مطالعات، عملیات حرارتی انحلال سوپرآلیاژ Nimonic 263 در محدوده دمایی $1050-1150^{\circ}C$ به مدت ۳۰ دقیقه تا ۲ ساعت انجام می‌شود. تحت این شرایط عملیات حرارتی، ریزساختار سوپرآلیاژ Nimonic 263 دارای دانه‌های هم محور، کاربیده‌های پراکنده درون دانه‌ای و کاربیده‌های $M_{23}C_6$ مرزدانه‌ای است. عملیات حرارتی پیرسازی نیز در دمای ثابت $800^{\circ}C$ به مدت ۸ ساعت انجام می‌گردد که منجر به بهبود استحکام کششی سوپرآلیاژ Nimonic 263 از طریق ایجاد رسوبات γ' و محلول جامد می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر مقادیر مختلف کارسرد بر ریزساختار و خواص مکانیکی دما محیط سوپرآلیاژ Nimonic 263 می‌باشد [1-3,6]. در پژوهش حاضر مقایسه‌ای از اثر مقادیر مختلف کارسرد (۳۳، ۶۰ و ۷۰ درصد) و سیستماتیک بر فرآیندهای تبلور مجدد، شکل‌گیری و استحاله رسوباتی مانند γ' و $M_{23}C_6$ و ارتباط آن با خواص مکانیکی نهایی در دمای محیط و همچنین زمان عملیات حرارتی انحلال نیز نسبت سایر مطالعات از نظر زمانی و دمایی کاهش یافته است.

روش تحقیق

در این پژوهش، از تسمه آلیاژ Nimonic 263 با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ و ضخامت ۳ میلی‌متر

استفاده شد، در ابتدا شمش اولیه آلیاژ Nimonic 263 در کوره ذوب القایی تحت خلاء^۱ (VIM) ریخته شد و سپس با استفاده از کوره ذوب مجدد الکتروود سرباره^۲ (ESR) عملیات تصفیه انجام گردید. شمش حاصل از فرآیند ریخته‌گری دومرحله‌ای VIM+ESR تحت فرآیند نورد گرم قرار گرفت. سپس این تسمه‌ها با ۳۳، ۶۰ و ۷۰ درصد نورد سرد به ضخامت‌های ۲، ۱/۲ و ۰/۹ میلی‌متر تبدیل شدند. پس از برشکاری تسمه‌های نورد گرم و سرد شده، نمونه‌ها در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفته و سپس در آب سرد شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند و در نهایت در هوا سرد شدند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ Nimonic 263 تولیدی برحسب (%wt)

عناصر	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	Mn	Fe	C
ترکیب (%wt)	پایه	۱۹/۸۸	۱۹/۳۷	۵/۴۷	۱/۸۹	۰/۴	۰/۱۴	۰/۷۷۹	۰/۰۳

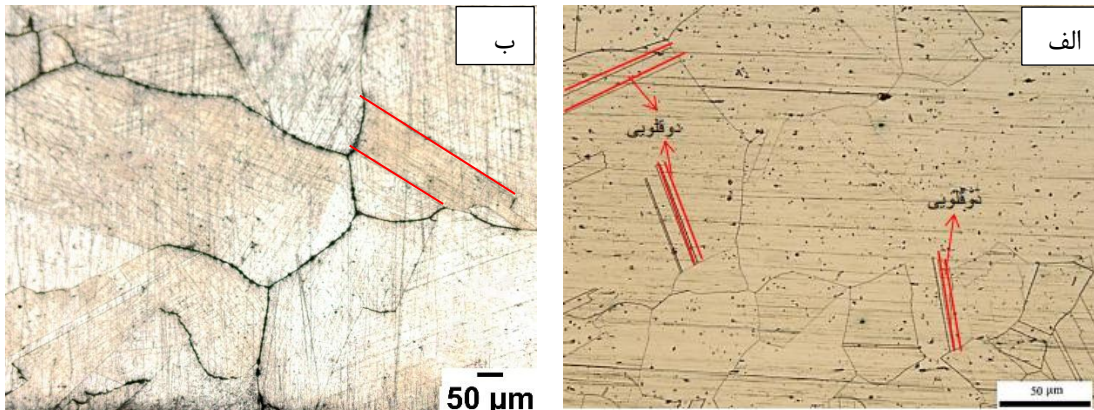
نمونه‌های کشش دمای محیط طبق استاندارد ASTM E8 در جهت نورد سرد تهیه شدند. برای آشکارسازی ریزساختار و مطالعه آن با میکروسکوپ نوری، از محلول حک‌کاری شامل HCl و HNO₃ با نسبت ۱:۱ و همچنین محلول Kalling مطابق با استاندارد ASTM E407 به مدت ۳ دقیقه غوطه‌وری استفاده شد. در سختی سنجی از دستگاه و روش سختی سنجی ویکرز ۳۰ کیلوگرم انجام شده مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

شکل ۱ الف، ریزساختار سوپرآلیاژ Nimonic 263 را در حالت نورد گرم‌شده پس از عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه و سرمایش در آب نشان می‌دهد. این ساختار شامل دانه‌های فاز زمینه آستنیت γ به همراه کاربیدهای درون دانه‌ای است که به صورت تصادفی در داخل دانه‌ها رسوب کرده‌اند، همچنین دوقلوبی‌های حرارتی و مکانیکی نیز مشاهده می‌شود. قطر متوسط دانه‌ها در این شرایط برابر با ۱۸۹ میکرومتر است. شکل ۱ ب نیز ریزساختار آلیاژ پس از عملیات حرارتی پیرسازی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با انجام پیرسازی و تأمین زمان کافی برای لغزش و حرکت نابجایی‌ها، مرزهای دوقلوبی موجود در ساختار حذف شده و کاربیدهای درون دانه‌ای MC به کاربیدهای M₂₃C₆ مرزدانه‌ای تبدیل شده‌اند که این تغییرات در سایر مطالعات نیز گزارش شده است [3,8,11].

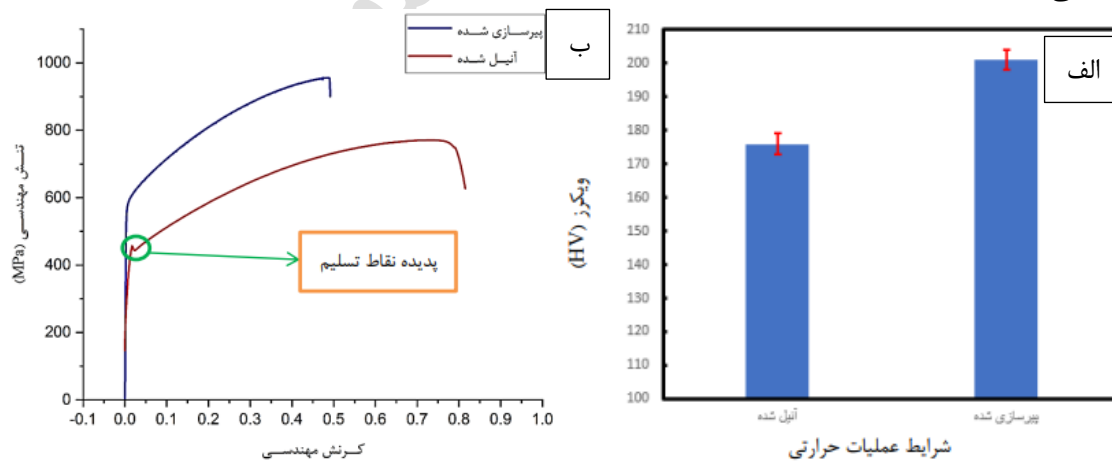
¹ - Vacuum induction melting

² - Electroslag remelting



شکل ۱: ریزساختار سوپرآلیاژ Nimonic 263 پس از نورد گرم در شرایط مختلف عملیات حرارتی: الف) آنیل و ب) پیرسازی.

در شکل ۲، خواص مکانیکی سوپرآلیاژ Nimonic 263 پس از عملیات حرارتی آنیل و پیرسازی نشان داده شده است. مطابق با شکل ۲ الف، سختی آلیاژ پس از انجام عملیات حرارتی پیرسازی افزایش یافته است، که این تغییر به دلیل تشکیل رسوبات γ' و کاربیدهای مرزدانه‌ای $M_{23}C_6$ در ساختار است، موضوعی که در مطالعات گذشتگان [3,8,11] نیز به آن اشاره شده است. شکل ۲ ب نیز خواص کششی دمای محیط در حالت انحلال و پیرسازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، انجام پیرسازی موجب افزایش استحکام آلیاژ و کاهش ازدیاد طول شده است که این تغییرات ناشی از تشکیل رسوبات در شرایط پیرسازی است. همچنین، در شکل ۲ ب، تحت شرایط عملیات حرارتی آنیل، پدیده نقطه تسلیم قابل مشاهده است که به دلیل وجود عناصر محلول جامد و برهم‌کنش عناصر جانشین و بین‌نشین نابجایی‌ها ایجاد شده است.

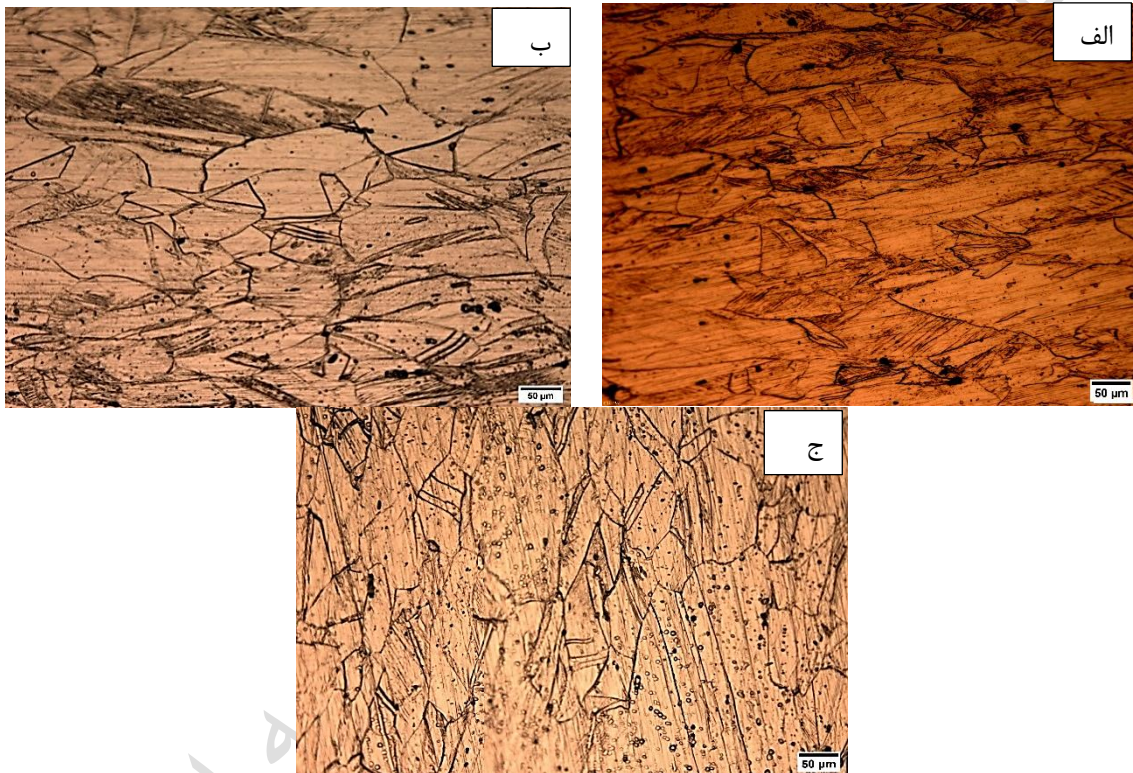


شکل ۲: نمودار خواص مکانیکی دما محیط سوپرآلیاژ Nimonic 263 در حالت نورد گرم شده بر حسب شرایط عملیات حرارتی: الف) سختی و ب) نمودار کشش دما محیط

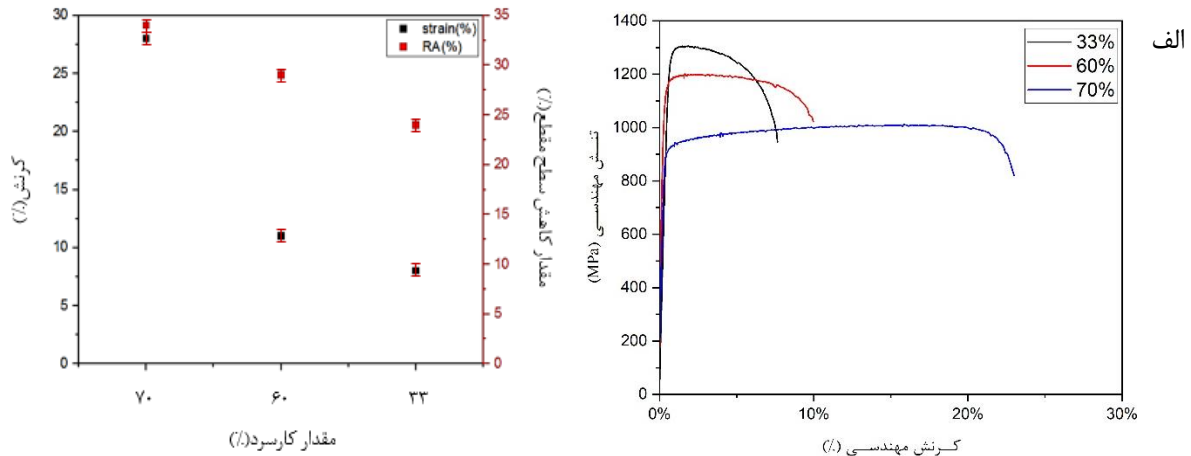
شکل ۳ ریزساختار آلیاژ پس از نورد سرد با کاهش ضخامت به میزان ۳۳، ۶۰ و ۷۰ درصد را نشان

می‌دهد. در این مرحله، تسمه‌ها تحت عملیات آنیل میانی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. طبق شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان کارسرد، درهم‌رفتگی مرزدانه‌ها افزایش یافته و کشیدگی دانه‌ها بیشتر شده است. همچنین، در ساختار، دوقلوبی‌های مکانیکی حاصل از نورد سرد و باندهای لغزش نیز قابل مشاهده هستند.

در شکل ۴، نمودارهای کشش سرد در حالت پس از نورد سرد بدون انجام عملیات حرارتی ارائه شده است. این نمودارها نشان‌دهنده افزایش میزان ازدیاد طول و کاهش استحکام کششی و تسلیم با بالا رفتن مقدار کارسرد نشان‌دهنده وقوع پدیده نرم‌شوندگی بوده و به تبع آن، استحکام تسلیم و کششی کاهش می‌یابد.

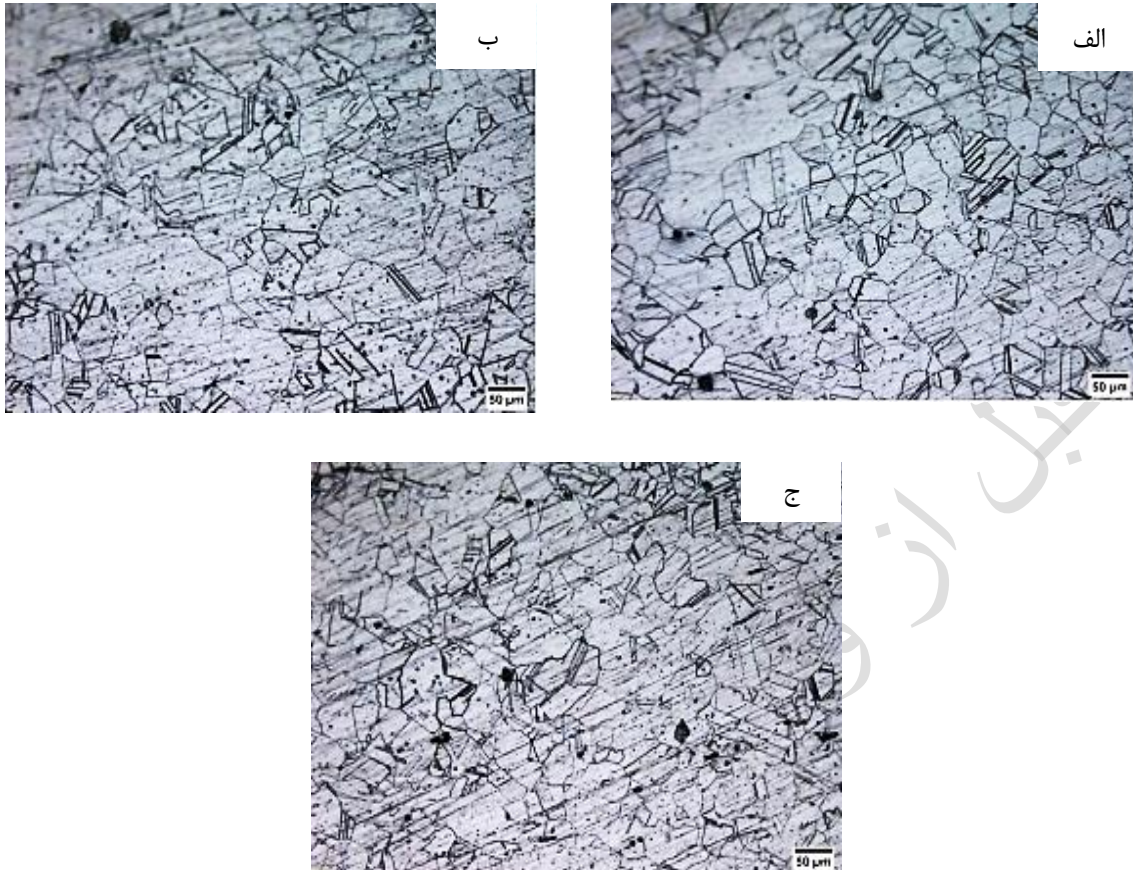


شکل ۳: ریزساختار پس از نورد سرد سوپراآلیاژ Nimonic 263 به میزان: الف) ۳۰٪، ب) ۶۰٪ و ج) ۷۰٪.

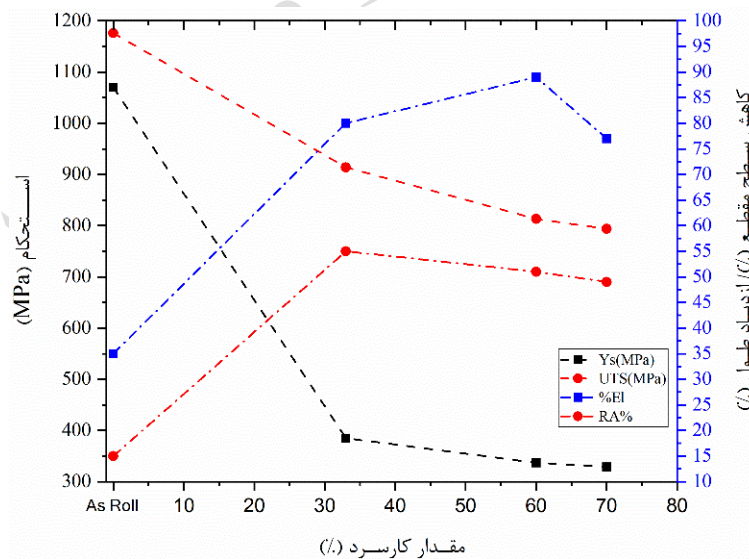


شکل ۴: نمودار خواص کششی دما محیط آلیاژ Nimonic 263 با مقدار کار سرد متفاوت تحت حالت نورد سرد شده.

شکل ۵، ریزساختار آلیاژ Nimonic 263 پس از انجام عملیات حرارتی انحلال (در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه) را نشان می‌دهد. با افزایش درصد کار سرد، هم‌محوری دانه‌بندی زمینه آستنیتی ۷ پس از عملیات حرارتی انحلالی افزایش یافته است. همچنین، دوقلویی‌های حرارتی و مکانیکی در ریزساختار مشاهده می‌شوند [۱۲، ۱۳]. در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، تبلور مجدد استاتیکی رخ داده است و با افزایش مقدار کار سرد، اندازه دانه‌ها تغییر محسوسی نکرده‌اند [۲، ۱۴، ۱۵]. در شکل ۶، خواص کششی دمای محیط سوپرآلیاژ Nimonic 263 آورده شده است. مطابق با نمودار، با انجام عملیات انحلالی، استحکام تسلیم و کششی آلیاژ کاهش یافته است. همچنین، درصد کاهش سطح مقطع و ازدیاد طول نیز افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری آلیاژ است. کاهش استحکام در مقدار کار سرد ۷۰ درصد ممکن است به دلیل افزایش اندازه دانه‌ها باشد. با انجام عملیات انحلالی، چگالی بالای نابجایی‌ها به تبلور مجدد استاتیکی سرعت بخشیده و در نهایت موجب درشت شدن دانه‌ها در مقدار کار سرد بالاتر تحت شرایط عملیات حرارتی انحلالی می‌شود [۱۶].



شکل ۵: ریزساختار آلیاژ Nimonic 263 عملیات حرارتی انحلالی شده در دمای 1050°C و مقدار کارسردهای (الف) ۳۳٪، (ب) ۶۰٪ و (ج) ۷۰٪.

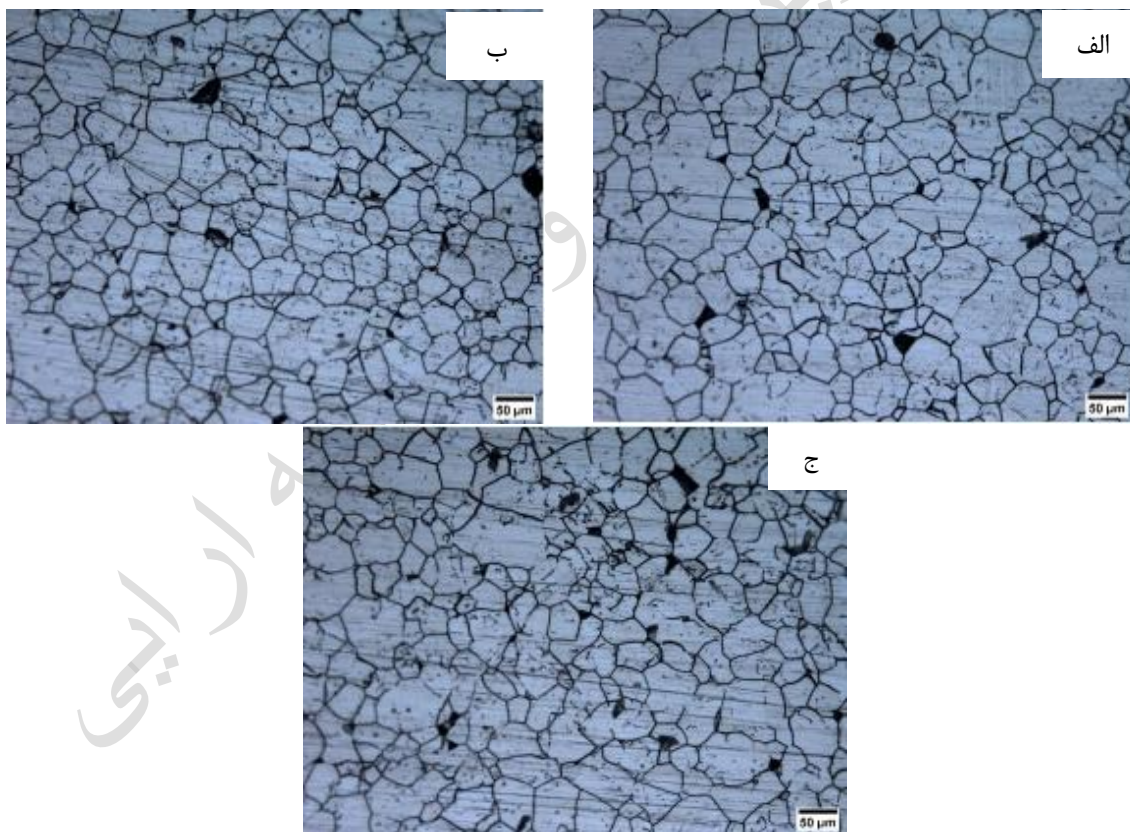


شکل ۶: نمودار کشش سرد سوپرآلیاژ Nimonic 263 در شرایط عملیات حرارتی انحلالی در دمای 1050°C و 10°C دقیقه.

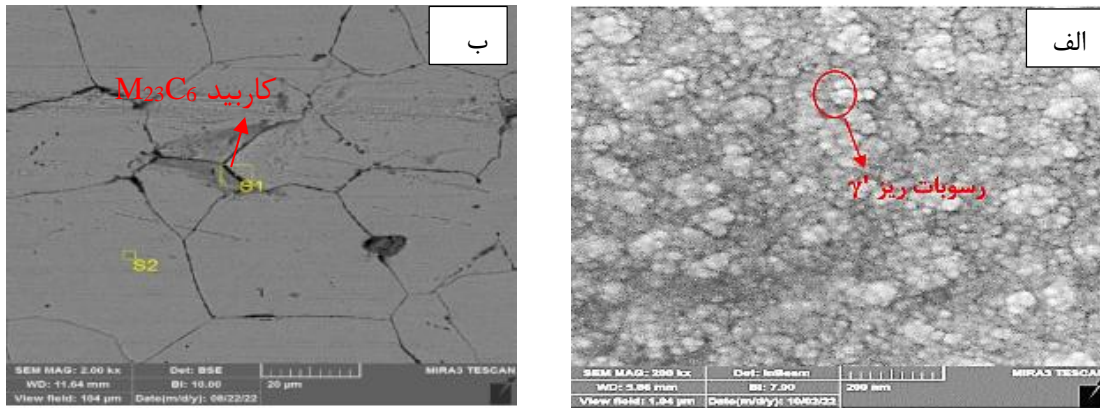
شکل ۷، ریزساختار آلیاژ Nimonic 263 پس از انجام عملیات پیرسازی (در دمای 800°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت) را نشان می‌دهد. در این شکل، دوقلوبی‌های موجود در ساختار پس از عملیات حرارتی

انحلالی، با انجام عملیات حرارتی پیرسازی به دلیل فراهم شدن زمان کافی برای نفوذ نابعجایی‌های تشکیل‌دهنده دوقلوبی‌ها از ساختار حذف شده‌اند. همچنین، کاربیدهای درون دانه‌ای به کاربیدهای مرزدانه‌ای $M_{23}C_6$ تبدیل می‌شوند. عملیات حرارتی پیرسازی برای افزایش استحکام آلیاژ از طریق رسوب فازهای استحکام‌بخش γ' انجام شد.

در شکل ۸، ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده وجود رسوب فاز استحکام‌بخش γ' به شکل کروی و کاربیدهای $M_{23}C_6$ در زمینه γ آلیاژ Nimonic 263 است. مطابق با مطالعات Detrois و همکاران [۶]، رسوب فاز γ' به دلیل حضور عناصر Al و Ti تا دمای 840°C درجه سانتی‌گراد محتمل است. از سوی دیگر، بر اساس مطالعات Zhao و همکاران [۴] و Pohja و همکاران [۱۲]، کاربیدهای $M_{23}C_6$ و فاز رسوبی γ' در دماهای پیرسازی کمتر از 900°C درجه سانتی‌گراد و زمان‌های پیرسازی کوتاه‌تر تشکیل می‌شوند. اگر زمان یا دمای پیرسازی افزایش یابد، فازهای نامطلوب η در آلیاژ شکل می‌گیرند که تاثیر مخربی بر خواص مکانیکی دارند. طبق بررسی‌های Simth و همکاران [۱۷]، رسوبات مرزدانه‌ای $M_{23}C_6$ غنی از کروم هستند.

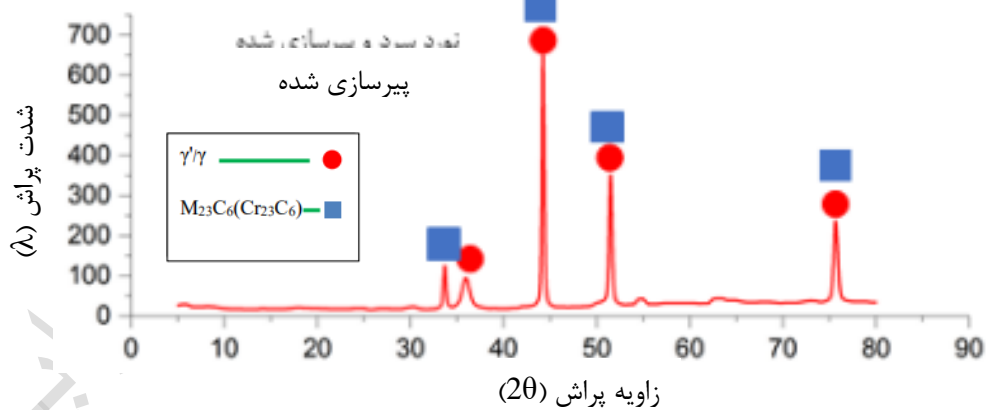


شکل ۷: ریزساختار آلیاژ Nimonic 263 عملیات حرارتی پیرسازی شده در دمای 800°C و مقدار کارسردهای (الف) ۳۳٪، (ب) ۶۰٪ و (ج) ۷۰٪.



شکل ۸: ریزساختار میکروسکوپی الکترونی روبشی آلیاژ Nimonic 263 پیرسازی شده به مدت ۸ ساعت در دمای 800°C (۳۳٪ کارسرد).

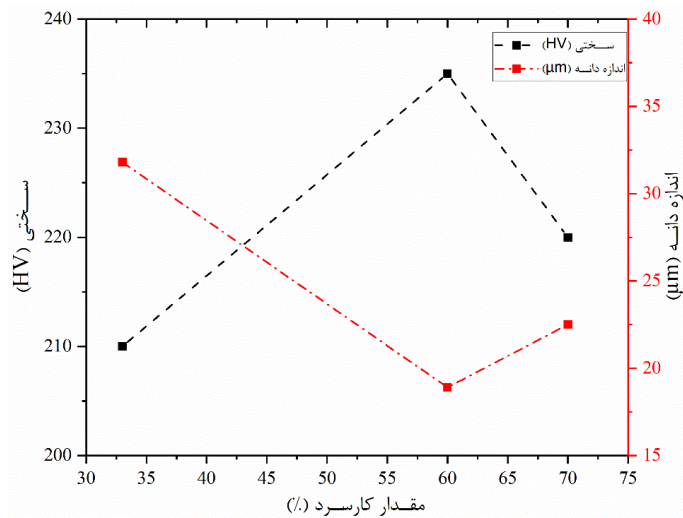
شکل ۹، آنالیز فازی پراش اشعه ایکس را نشان می‌دهد که وجود کاربیدهای مرزدانه‌ای $M_{23}C_6$ پس از انجام پیرسازی به همراه رسوبات γ' را تأیید می‌کند. حضور کاربیدهای مرزدانه‌ای باعث کاهش نرخ لغزش و جلوگیری از رشد دانه‌ها در طول پیرسازی شده و همچنین به دلیل تشکیل رسوبات γ' در حین پیرسازی، استحکام کششی افزایش می‌یابد.



شکل ۹: آنالیز فازی پراش اشعه ایکس آلیاژ Nimonic 263 پیرسازی شده (۳۳٪ کارسرد).

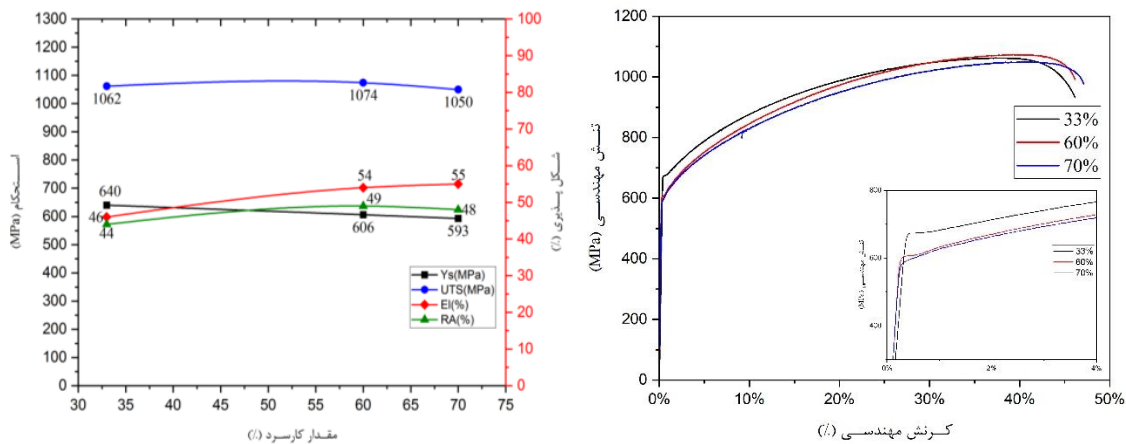
شکل ۱۰، تغییرات سختی و اندازه دانه بر اساس مقدار کارسرد پس از انجام پیرسازی را نشان می‌دهد. مشهود است که با افزایش مقدار کارسرد، سختی آلیاژ ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد که این تغییرات به دلیل رشد دانه‌ها در مقادیر کارسرد بالاتر از ۶۰ درصد است. همچنین، افزایش سختی حاصل از پیرسازی مطابق با مطالعات Simth و همکاران [۱۷] ناشی از تشکیل رسوبات γ' ، کاربیدهای

مرزدانه‌ای $M_{23}C_6$ و تشکیل محلول جامد در ریزساختار است.



شکل ۱۰: سختی و اندازه دانه نمونه‌های پیرسازی شده به مدت ۸ ساعت در دمای $800^{\circ}C$ در مقدار کارسردهای متفاوت.

شکل ۱۱ خواص کششی دما محیط آلیاژ Nimonic 263 در شرایط عملیات حرارتی انحلالی به همراه پیرسازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار کارسرد در شرایط عملیات حرارتی انحلال و پیرسازی ثابت، استحکام کششی آلیاژ ابتدا افزایش و مجدداً به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۱ (ب) با افزایش مقدار کارسرد تغییرات ازدیاد طول ابتدا افزایشی بوده و پس از کارسرد به مقدار ۶۰ درصد این تغییرات تقریباً ثابت باقی مانده است.



شکل ۱۱: نمودار خواص کششی دما محیط آلیاژ Nimonic 263 با مقدار کار سرد متفاوت تحت شرایط عملیات حرارتی انحلالی 1050°C و 10°C و پیرسازی شده در شرایط دمایی 800°C و 8 ساعت.

نتیجه‌گیری

- ۱- با انجام نورد سرد و سپس عملیات حرارتی انحلال در دمای 1050°C درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه، اندازه دانه‌ها به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است.
- ۲- با انجام عملیات حرارتی انحلال، به دلیل تشکیل دوقلوبی‌های حرارتی و حذف درهم‌رفتگی دانه‌ها، شکل‌پذیری آلیاژ نسبت به حالت نورد سرد شده به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.
- ۳- عملیات حرارتی آنیل میانی در دمای 1100°C درجه سانتی‌گراد منجر به تسریع عملیات تبلور مجدد استاتیکی می‌شود.
- ۴- عملیات حرارتی پیرسازی باعث تشکیل رسوبات γ' و تبدیل کاربیدهای درون دانه‌های MC به کاربیدهای مرزدانه‌های $M_{23}C_6$ می‌شود که در نتیجه آن، سختی و استحکام آلیاژ افزایش می‌یابد.
- ۵- با افزایش مقدار کار سرد تا 60 درصد، سختی و استحکام افزایش می‌یابد، اما در مقادیر بالاتر کار سرد به دلیل رشد دانه‌ها، سختی و استحکام کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] X. Song, M. Xie, F. Hofmann, T. Illston, T. Connolly, C. Reinhard, R.C. Atwood, L. Connor, M. Drakopoulos, L. Frampton, A.M. Korsunsky, Residual stresses and microstructure in Powder Bed Direct Laser Deposition (PB DLD) samples, *Int. J. Mater. Form.* 8 (2015) 245–254.
- [2] A. Di Gianfrancesco, Alloy 263, *Mater. Ultra-Supercritical Adv. Ultra-Supercritical Power Plants* (2017) 571–599.
- [3] C. Crozet, A. Devaux, D. Béchet, Microstructure stability: Optimisation of 263 Ni-based superalloy, *MATEC Web Conf.* 14 (2014) 17006.
- [4] J.C. Zhao, V. Ravikumar, A.M. Beltran, Phase precipitation and phase stability in Nimonic 263, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 32 (2001) 1271–1282.

- [5] G. Angella, R. Donnini, D. Ripamonti, M. Maldini, The role of particle ripening on the creep acceleration of Nimonic 263 superalloy, MATEC Web Conf. 14 (2014).
- [6] M. Detrois, P.D. Jablonski, J.A. Hawk, The effect of η phase precipitates on the creep behavior of alloy 263 and variants, Mater. Sci. Eng. A 799 (2021) 140337.
- [7] H.U. Hong, I.S. Kim, B.G. Choi, M.Y. Kim, C.Y. Jo, The effect of grain boundary serration on creep resistance in a wrought nickel-based superalloy, Mater. Sci. Eng. A 517 (2009) 125–131.
- [8] H.U. Hong, H.W. Jeong, I.S. Kim, B.G. Choi, Y.S. Yoo, C.Y. Jo, A study on the formation of serrated grain boundaries and its applications in Nimonic 263, Mater. Sci. Forum 638–642 (2010) 2245–2250.
- [9] M.J. Donachie, S.J. Donachie, SUPERALLOYS Second Edition, 2002.
- [10] J.R. Davis, ASM Specialty Handbook: Nickel, 2000.
- [11] S. Zhang, D. Zhao, Aerospace materials handbook, Aerosp. Mater. Handb. (2016) 1–743.
- [12] R. Pohja, A. Nurmela, S. Holmström, P. Moilanen, Creep-fatigue properties of nickel-base superalloy 263, IX - Int. Conf. Life Manag. Maint. Power Plants (2013).
- [13] N.E. Prasad, Effect of aging on work hardening behaviour of cold rolled Nimonic C-263 alloy, 27 (2011) 1333–1340.
- [14] Y. Xu, C. Yang, X. Xiao, X. Cao, G. Jia, Z. Shen, Strengthening behavior of Al and Ti elements at room temperature and high temperature in modified Nimonic 80A, Mater. Chem. Phys. 134 (2012) 706–715.
- [15] R.C. Reed, The Superalloys as High-Temperature Materials, 2006.
- [16] S. Xie, T. Wang, J. Lu, H. Yang, G. Zhao, Effects of Zr on microstructure and short-term strength in GH586, J. Mater. Sci. Technol. 15 (1999) 415–418.
- [17] S.A. Smith, G.D. West, K. Chi, W. Gamble, R.C. Thomson, Microstructural evolution in Nimonic 263 for high temperature power plant, Adv. Mater. Technol. Foss. Power Plants - Proc. from 6th Int. Conf. (2011) 110–126.