



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

ارزیابی اثر پارامترهای عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si

مریم مرکباتی^{۱*}، سیدمهدی عباسی^۲، یاور منصور

۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 ۲- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 * نویسنده مکاتبه کننده: Email: m_morakabati@mut.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸
 پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر محیط سرمایش پس از نورد ثانویه و دمای عملیات آنیل بر تغییرات ریزساختار و خواص کششی آلیاژ تیتانیوم شبه آلفا Ti-6242S است. سپس شمش تولید شده تحت عملیات همگن‌سازی و نورد داغ اولیه در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از آن دمای استحاله فاز آلفا به بتای آلیاژ با روش‌های عملیات حرارتی و آزمایش پیچش گرم 5 ± 1000 درجه سانتی‌گراد تعیین شد. در ادامه، تسمه‌ها تحت عملیات نورد ثانویه در دمای ۹۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در محیط‌های آب و هوا، سرد شدند. سپس تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی به مدت یک ساعت، در دماهای ۹۴۰ و ۹۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و در آب سرد شدند و در ادامه تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. سپس بررسی‌های ریزساختاری و آزمایش کشش در دماهای ۲۵ و ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد نمونه‌های با محیط سرمایش یکسان پس از نورد ثانویه که تحت عملیات آنیل انحلالی در دمای ۹۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، نسبت به نمونه‌هایی که تحت عملیات آنیل انحلالی در دمای ۹۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند دارای ریزساختاری با فاز آلفای اولیه کروی‌تر و کسر حجمی کمتر و آلفای ثانویه‌ی پهن‌تر هستند. لذا منجر به دستیابی به تلفیق استحکام و انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود. همچنین افزایش استحکام در نمونه‌های با محیط سرمایش هوا در مقایسه با نمونه‌های با محیط سرمایش آب پس از نورد، به دلیل بیشتر بودن کسر حجمی فاز آلفا است. بنابراین متعاقباً افت در انعطاف‌پذیری این نمونه‌ها را در پی داشته است.

واژه‌های کلیدی:
 نورد ثانویه،
 محیط سرمایش،
 عملیات آنیل انحلالی،
 ریزساختار،
 آزمایش کشش.

ارجاع به این مقاله:

مریم مرکباتی، سیدمهدی عباسی، یاور منصور، ارزیابی اثر پارامترهای عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۲، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۴۵-۵۵.
 شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2024.402919.1179

۱- مقدمه

هستند، است. همچنین نظر به ضرورت وجود استحکام کششی بالا همراه با استحکام خستگی و چقرمگی شکست زیاد در ادوات مورد استفاده در صنایع هوایی و موتورهای جت، این آلیاژ، گزینه‌ی مناسبی است [۱-۳]. در این آلیاژ شبه آلفا عنصر مولیبدن با ۲ درصد وزنی، عنصر پایدارساز فاز بتا است و عنصر آلومینیوم پایدارساز آلفا است. با طراحی سیکل‌های مختلف عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی می‌توان به مجموعه‌ای از ریزساختارهای مختلف با خواص کششی، خزشی و خستگی متمایزی دست یافت. با تکیه بر توان نسبتاً مناسب عملیات

آلیاژ Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si یا به اختصار Ti-6242S جزء رده آلیاژهای تیتانیوم شبه آلفا است که توسط یک شرکت آمریکایی در دهه هفتاد میلادی معرفی شده است. این آلیاژ در محدوده دمایی ۲۵ تا ۵۶۵°C یکی از مقاوم‌ترین آلیاژها در برابر خزش به شمار می‌آید. عمده کاربرد این آلیاژ در اجزای توربین‌های گازی همچون پره‌ها، دیسک‌ها و پیش‌رانه‌ها و همچنین در پوسته و جداره‌های قسمت‌های داغ قطعاتی که نیازمند به پایداری حرارتی و سرویس‌دهی در شرایط دمایی و تنش بالا

۲- روش تحقیق

شمش آلیاژ Ti-6Al2Sn4Zr2Mo0.1S طی فرآیند ذوب قوسی تحت خلأ VAR^۱ تحت ذوب اولیه و ذوب مجدد قرار گرفت. سپس با هدف حذف و یا به حداقل رساندن جدایش‌ها تحت عملیات همگن‌سازی در دمای °C ۱۱۵۰ به مدت ۴ ساعت قرار گرفت. عملیات نورد داغ اولیه نیز در همان دما با کاهش سطح مقطع ۷۵٪ روی شمش تولیدی انجام شد. عملیات ترمومکانیکی رایج در تولید آلیاژ Ti-6242S، انجام عملیات نورد گرم ثانویه و آنیل محلولی در منطقه دوفازی آلفا/بتا است که منجر به دستیابی به ریزساختار دوگانه می‌شود. بنابراین جهت انجام عملیات ترمومکانیکی در این منطقه، نیاز است تا دمای استحاله آلیاژ Ti-6242S به دست آید که در این پژوهش از طریق عملیات حرارتی طی دو سیکل گرمایش و سرمایش و همچنین از آزمایش پیچش گرم بهره گرفته شد. معیار تعیین دمای استحاله در سیکل گرمایش، حذف کامل فاز آلفای اولیه از ساختار است. در سیکل گرمایش، عملیات حرارتی نمونه‌ها در دماهای ۹۸۰ تا °C ۱۰۱۰ انجام و سپس ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. در سیکل سرمایش، معیار تعیین دمای استحاله، رسوب فاز آلفا در مرزخانه‌های بتا است. برای این منظور نمونه‌های نورد گرم اولیه شده به منظور حذف فاز آلفا در دمای °C ۱۰۶۰ به مدت ۱۵ دقیقه عملیات حرارتی شده و سپس بلافاصله در آب کوئنچ شدند. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی در دماهای ۹۹۵، ۱۰۰۵ و °C ۱۰۱۵ قرار گرفتند و سپس بلافاصله در آب کوئنچ شدند و در نهایت ریزساختار آنها بررسی شد. همچنین از آزمایش پیچش گرم نیز برای تعیین دمای استحاله استفاده شد. منحنی تغییرات تنش بر حسب معکوس دما ترسیم شد. تغییرات شیب ملاحظه شده در منحنی‌ها حاکی از وقوع استحاله فاز بتا به آلفا و ایجاد فاز آلفا است که امکان تعیین دمای استحاله را فراهم می‌کند. با توجه به دمای استحاله به دست آمده تسمه به دو قسمت مساوی تقسیم شد. در ادامه نورد گرم ثانویه در محدوده دوفازی آلفا/بتا در دمای °C ۹۴۰ و به میزان ۶۰٪ کاهش سطح مقطع انجام و سپس سرمایش آنها در دو محیط سرمایش آب و هوا انجام شد. پس از آن، هر کدام از دو تسمه‌ی فوق، به دو قسمت مساوی تقسیم شدند تا عملیات آنیل انحلالی در دو دمای مختلف روی آنها صورت پذیرد. سپس تسمه‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دو دمای ۹۷۰ و °C ۹۴۰ به مدت ۱ ساعت قرار گرفتند و در آب سرد شدند. در انتها تحت عملیات پیرسازی در دمای °C ۵۹۵ به مدت ۸ ساعت قرار گرفته و در هوا سرد شدند. در جدول ۱، کدگذاری نمونه‌های

حرارتی‌پذیری آلیاژ Ti-6242S و وجود عناصر آلیاژی استحکام-بخش در آن، ایجاد ریزساختار مناسب در این آلیاژ با هدف نیل به خواص مکانیکی مختلف امکان‌پذیر است [۴]. مشخص شده است که در آلیاژهای شبه آلفا و آلفا بتا، ریزساختار دوگانه از فازهای آلفا و بتا منجر به دستیابی به خواص کششی حداکثر می‌شود [۶، ۵]. در آلیاژهایی که فرآیند تولید و ساختارهای تبلورمجدد یافته‌ی آنها به خوبی انجام شده باشد، اندازه‌ی کلونی‌های آلفا تقریباً برابر با اندازه دانه‌های بتا است؛ بیش‌تر بودن انعطاف‌پذیری این نوع از ریزساختار، به دلیل کوچک بودن اندازه‌ی کلونی‌های آلفا (و در نتیجه طول لغزش) در ریزساختار دوگانه است [۷، ۱]. در پژوهشی [۸] نقش فاز آلفا در افزایش و یا کاهش استحکام آلیاژ، بسیار زیاد گزارش شده است. در این آلیاژ، با انجام عملیات ترمومکانیکی در منطقه‌ی فازی آلفا/بتا، فازهای آلفای موجود کروی می‌شوند. تغییر در مورفولوژی فاز آلفا از ساختار لایه‌ای به کروی، به شدت به تغییر شکل و کارگرم پیش از عملیات حرارتی وابسته است. همچنین انرژی کرنشی کافی در فاز آلفا منجر به وقوع تبلورمجدد و یا رسیدن به سطوح پایین انرژی و در نهایت رسیدن به ساختار کروی، می‌شود. در پژوهش دیگری [۹] گزارش شده است که تبدیل آلفای لایه‌ای به کروی، تابع دما و زمان آنیل انحلالی است؛ فاز آلفای لایه‌ای، سبب افزایش چقرمگی شکست (K_{IC}) و فاز آلفای کروی، سبب افزایش انعطاف‌پذیری آلیاژ می‌شود. نقش عملیات حرارتی بر خواص کششی آلیاژهای تیتانیوم شبه آلفا و به خصوص آلیاژ Ti-6242S را، می‌توان در تأثیر آن بر ریزساختارهای این آلیاژ جستجو نمود. به عنوان نمونه در پژوهشی [۸]، گزارش شده است که با تغییر در دمای آنیل انحلالی (در زیر دمای استحاله‌ی بتا) می‌توان به کسر حجمی متفاوتی از فاز آلفا دست یافت. همچنین تغییر محیط‌های سرمایش، بر مورفولوژی فاز آلفا و ریز یا درشت شدن لایه‌های فاز بتای استحاله یافته اثرگذار است.

مطالعات حاکی از آن است که پژوهش‌هایی [۸] در خصوص اثر پارامترهای عملیات تغییر شکل داغ و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6242S منتشر شده است. اما اثر تلفیق فرایندهای ترمومکانیکی و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص کششی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی اثر محیط سرمایش پس از نورد ثانویه و دمای عملیات آنیل، بر تغییرات ریزساختار و خواص کششی دمای محیط و دما بالای آلیاژ Ti-6242S است.

^۱ Vacuum Arc Remelting

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین دمای استحاله بتای آلیاژ

الف- تعیین دمای استحاله با ارزیابی تحولات ساختاری طی عملیات

حرارتی با سیکل گرمایش

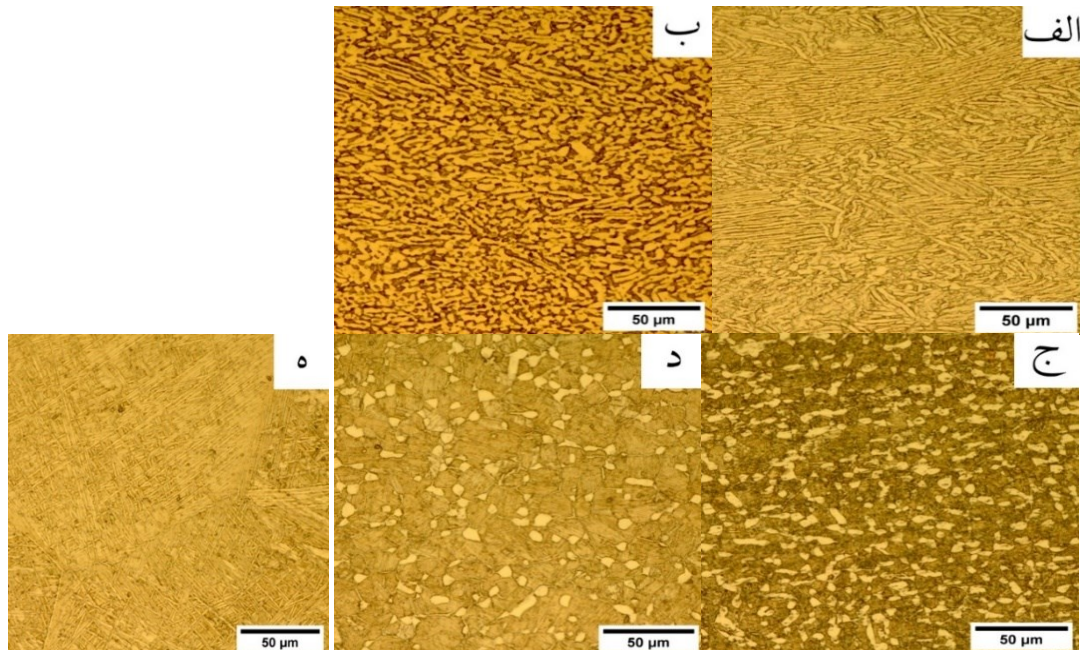
در شکل ۱، تحولات ساختاری به وجود آمده پس از عملیات حرارتی آلیاژ ۹۸۰ تا 1010°C نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱- الف مشاهده می‌شود، به دلیل انجام تغییر شکل ثانویه در محدوده دوفازی، ساختار شامل آلفای اولیه در زمینه‌ای از فاز بتا است. دانه‌های آلفا در راستای نور کشیده شده و حدود ۵۱ درصد از ساختار را به خود اختصاص داده است. در ادامه با انجام عملیات حرارتی در دماهای ۹۸۰ تا 1000°C کسر حجمی فاز آلفای اولیه دچار تغییر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انجام عملیات حرارتی در دمای 980°C کسر فاز آلفای اولیه نسبت به نمونه تغییر شکل یافته کاهش یافته است. این کاهش به علت دادن فرصت کافی برای ایجاد فاز آلفا است. این روند برای دمای 990°C نیز ادامه یافته است. با افزایش دما از 980°C تا 1000°C با نزدیک شدن به دمای استحاله، کسر حجمی فاز آلفای اولیه کاهش یافته و بر مقدار فاز بتا افزوده شده است. تا جایی که در دمای 1010°C فاز آلفای اولیه کاملاً از ساختار حذف شده و بنابراین این دما در منطقه تک‌فاز بتا قرار دارد. از این رو دمای استحاله آلفا به بتا برای این آلیاژ با روش سیکل گرمایش در محدوده 1000 تا 1010°C تعیین شد.

عملیات تغییر شکل و عملیات حرارتی شده ارائه گردیده است. در بخش نتایج و بحث، شرایط نمونه‌ها به صورت کدگذاری ارائه شده است.

جهت بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها با استفاده از پوساب‌هایی با شماره‌ی ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ سنباده‌زنی شدند و در ادامه تحت عملیات حکاکی با محلول ۲ میلی‌لیتر HF، ۳ میلی‌لیتر HNO_3 و ۹۵ میلی‌لیتر H_2O قرار گرفتند. برای ارزیابی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری Olympus BX51 و میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN XMU استفاده گردید. آنالیز کمی تصاویر و تعیین کسر حجمی فاز آلفا نیز به کمک نرم‌افزار ImageJ صورت پذیرفت. خواص کشش سرد و گرم آلیاژ Ti-6242S، با تهیه‌ی نمونه‌های استاندارد مطابق با استانداردهای ASTM E 8 و ATSTM E 21 در دماهای ۲۵ و 480°C با دستگاه Instron 8502 مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- نحوه کدگذاری نمونه‌های آزمایش.

کد نمونه	محیط سرمایش پس از نور	دمای انحلال ($^{\circ}\text{C}$)
W970	آب	۹۷۰
W940	آب	۹۴۰
A970	هوا	۹۷۰
A940	هوا	۹۴۰



شکل ۱- ریزساختارهای ناشی از الف) تغییر شکل ثانویه و سپس عملیات حرارتی در دماهای (ب) ۹۸۰، (ج) ۹۹۰، (د) ۱۰۰۰ و (ه) 1010°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت و سرمایش در هوا.

ب- تعیین دمای استحاله با ارزیابی تحولات ساختاری طی عملیات حرارتی با سیکل سرمایش

نمونه‌های نورد گرم اولیه شده به منظور حذف فاز آلفا در دمای 1060°C به مدت ۱۵ دقیقه عملیات حرارتی شده و سپس بلافاصله در آب کوئنچ شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی در دماهای 995°C ، 1005°C و 1015°C قرار گرفتند. ساختار حاصل از این نوع عملیات حرارتی در شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دانه‌های بتا طی این عملیات حرارتی رشد کرده و اندازه دانه از ۲۷۵ به حدود ۳۵۰ میکرومتر افزایش یافته است. همچنین فاز آلفای مرزدانه‌ای نیز آلفای ثانویه کاملاً حذف و جای خود را به تیغه‌های مارتنزیت داده است. در واقع تیغه‌های مارتنزیت طی سرمایش سریع از منطقه تک‌فاز بتا به دمای محیط و طی یک استحاله غیرنفوذی ایجاد شده است. در اثر سرعت سرمایش بالا، عناصر پایدارکننده فاز آلفا فرصت نفوذ را نیافته و بنابراین فاز آلفا در ساختار ایجاد نشده است. با توجه به این‌که هیچ‌گونه تغییرشکل ثانویه‌ای روی نمونه‌های آنیل شده در دمای 1060°C انجام نشده است. در نتیجه همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعد از عملیات حرارتی در دماهای مختلف، هیچ‌گونه فاز آلفای اولیه‌ای در ساختار وجود ندارد. لذا ریزساختار پس از عملیات حرارتی و کوئنچ در بالای منطقه دوفازی تنها شامل آلفای مرزدانه‌ای است. با ورود به منطقه دوفازی، اولین مکان جوانه‌زنی فاز آلفا، مرزدانه‌های بتا است. علاوه بر این، با کاهش دما در منطقه دوفازی، علاوه بر آلفای مرزدانه‌ای، ریزساختار موجود، شامل آلفای ثانویه به همراه تیغه‌های نازک مارتنزیت و مقداری فاز بتا است. گفتنی است که این مشاهدات، منطبق با تحقیقات صورت گرفته روی دیگر آلیاژهای تیتانیوم نیز است [۱۱، ۱۲]. همان‌گونه که در شکل ب و ۲-ج مشاهده می‌شود، ریزساختار برای آلیاژ در دماهای 995°C و 1005°C ، شامل آلفای مرزدانه‌ای و آلفای ثانویه است. فاز آلفای

مرزدانه‌ای در این ریزساختارها در اثر نفوذ عناصر پایدارکننده فاز آلفا به سمت مرزدانه‌ها ایجاد شده است. به عبارت دیگر در ریزساختار شبه پایدار بتا، پس از آن‌که طی ۴۰ دقیقه در دمای 1005°C قرار گرفت، آلومینیم به عنوان اصلی‌ترین پایدارساز فاز آلفا در این آلیاژ از داخل دانه به مرزدانه‌ی بتا نفوذ کرده است. لذا سبب ایجاد فاز آلفا در مرزدانه شده است. همچنین به دلیل کافی بودن زمان نگهداری در این دما، فاز بتا به فاز آلفا استحاله یافته و لایه‌های آلفا از مرزدانه به سمت داخل دانه بتا رشد کرده و ساختاری با مورفولوژی لایه‌ای تشکیل شده است.

در ادامه با افزایش دمای عملیات حرارتی تا دمای 1015°C ، مقدار آلفای ثانویه و نیز آلفای مرزدانه‌ای در ساختار کاهش یافته است؛ شکل د- نشان می‌دهد که حین کوئنچ از دمای 1015°C ، فاز بتای درون دانه‌ها به مارتنزیت استحاله یافته است و تنها مقدار اندکی فاز آلفا در مرزدانه‌های بتای استحاله یافته ایجاد شده است. لذا با استفاده از این روش، دمای استحاله آلیاژ بین 995°C و 1005°C به دست آمد.

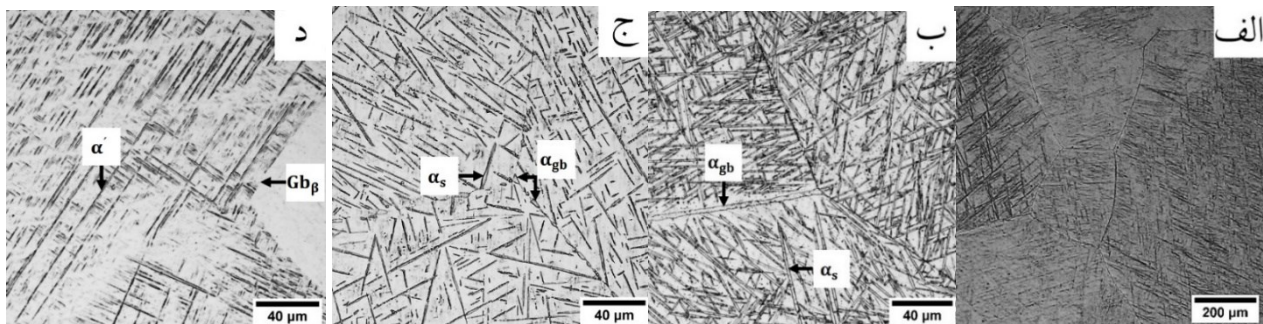
ج- تعیین دمای استحاله با ارزیابی نتایج آزمایش پیچش گرم

نتایج حاصل از آزمایش پیچش گرم را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) و معیار فون مایز به تنش و کرنش نرمال تبدیل نمود [۱۳]:

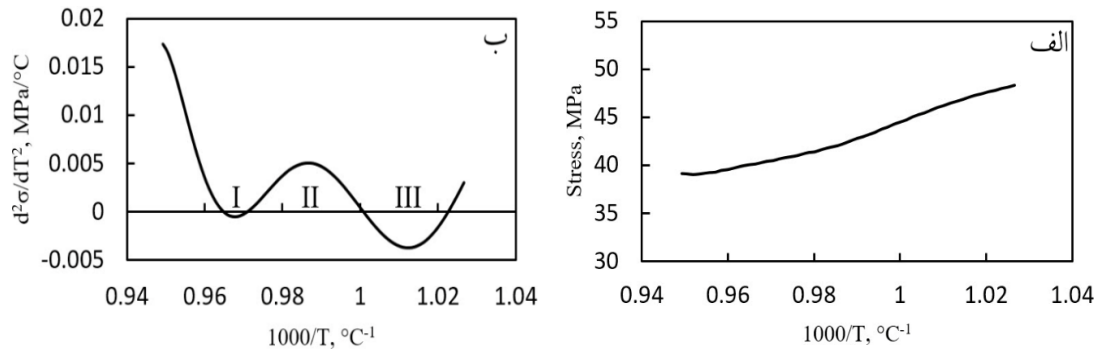
$$\sigma = \sqrt{3}(3+m+n)M / 2\pi R^3$$

$$\varepsilon = \sqrt{3}(R\phi) / L \quad (1)$$

در این رابطه τ تنش برشی، M گشتاور، R شعاع و L طول سنجه، m و n به ترتیب توان نرخ کرنش سختی و توان کرنش سختی و ϕ زاویه پیچش هستند. مقادیر m و n در این آزمایش بر اساس تحقیقات فیلدز و همکارانش [۱۳] به گونه‌ای انتخاب شد که مجموع این دو فاکتور برابر با $0/3$ باشد.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نوری آلیاژ Ti-6242S، الف) عملیات حرارتی شده در دمای 1060°C به مدت ۱۵ دقیقه، ب) 995°C (ج) 1005°C و د) 1015°C به مدت ۴۰ دقیقه.



شکل ۳- الف) منحنی تغییرات تنش سیلان با معکوس دما، ب) منحنی تغییرات مشتق دوم تنش با معکوس دما.

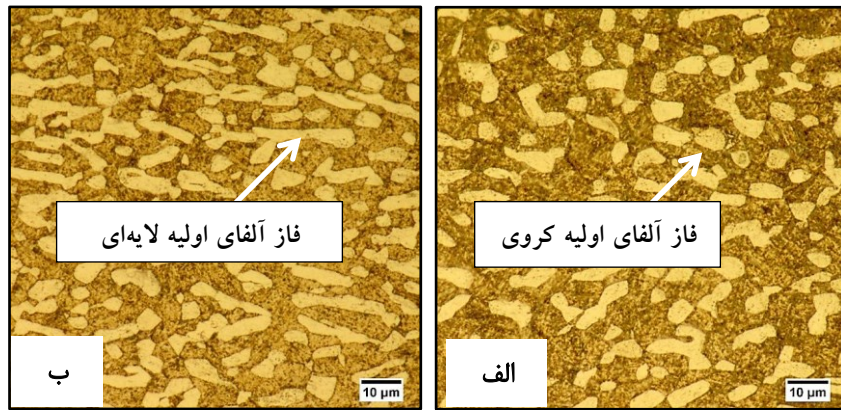
نقص‌های ریزساختاری مانند باندهای تغییرشکل و دیواره نابجایی‌ها و همچنین مرزهای مضرس می‌شود. پژوهش‌گران [۱۶] طی تحقیقاتی که روی آلیاژ Ti-6246 انجام دادند به این نتیجه رسیدند که استحاله فاز بتا به آلفا با اعمال کرنش تسریع شده و در یک دمای ثابت، با افزایش کرنش و همچنین در کرنش ثابت، با کاهش دما، کسر حجمی فاز آلفا افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از تصاویر عملیات حرارتی طی سیکل‌های گرمایش و سرمایش و آزمایش پیچش، دمای استحاله‌ی بتا برای این آلیاژ، 1000 ± 5 °C پیش‌بینی شد.

۳-۲- ارزیابی تحولات ساختاری با تغییر پارامترهای عملیات ترمومکانیکی و حرارتی

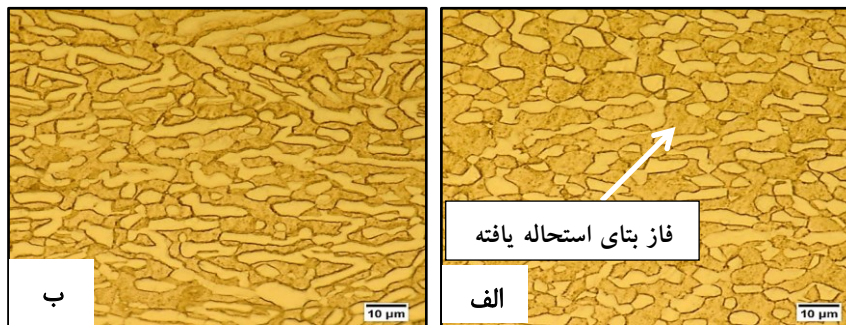
تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌ها پس از نورد گرم ثانویه و سرمایش در آب و هوا و سپس عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دماهای ۹۴۰ و ۹۷۰ °C و انجام عملیات پیرسازی به ترتیب در شکل و ۵ ارائه شده است. همچنین در جدول ۲، کسر حجمی فاز آلفای اولیه، میانگین اندازه‌ی آن‌ها و تعداد فاز آلفای اولیه‌ی کروی در آلیاژ Ti-6242S و پس از سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با محیط سرمایش یکسان، با کاهش دمای آنیل و با فاصله گرفتن از دمای استحاله آلفا به بتا، کسر حجمی فاز آلفا افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که برای نمونه‌های W970 و W940، کسر حجمی فاز آلفا با آنیل از دمای ۹۷۰ تا ۹۴۰ °C از ۱۸ درصد به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین برای نمونه‌های A970 و A940، کسر حجمی فاز آلفا با آنیل از دمای ۹۷۰ تا ۹۴۰ °C از ۲۸ درصد به ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه دو شکل ۴ و ۵ نشان می‌دهد که انجام نورد گرم ثانویه و سپس سرمایش در آب، سبب می‌شود که به واسطه-ی پایین تر بودن نرخ نفوذ، مکان‌های جوانه‌زنی جهت ایجاد فاز بتای استحاله‌یافته نیمه‌پایدار در مقایسه با نمونه‌های سرمایش یافته در هوا افزایش یابد؛ لذا این موضوع سبب افزایش

در شکل، منحنی تغییرات تنش بر حسب معکوس دما نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل - الف مشاهده می‌شود با کاهش دما و افزایش کرنش در اثر پدیده کارسختی تنش سیلان افزایش می‌یابد. از دمای ۱۰۹۰ تا ۱۰۶۰ °C منطقه الاستیک است که با ادامه تغییرشکل و ورود به منطقه پلاستیک شیب منحنی تغییرات تنش سیلان بر حسب دما کاهش یافته و تا دمای ۱۰۲۰ °C این شیب ثابت می‌ماند. از این دما مجدداً تغییر شیبی در منحنی مشاهده می‌شود که حاکی از وقوع استحاله فاز بتا به آلفا و ایجاد فاز آلفا در مرزدانه بتا است. از آنجا که فاز آلفا با ساختار کریستالوگرافی HCP نسبت به فاز بتا با ساختار کریستالوگرافی BCC دارای سیستم لغزش کمتری است، استحکام فاز آلفا بیشتر از فاز بتا بوده است [۴]. لذا با ایجاد فاز آلفا شیب منحنی سیلان افزایش یافته است. بنابراین این پدیده، منجر به افزایش تنش مورد نیاز برای تغییرشکل شده است. همچنین به منظور تعیین دقیق دمای شروع استحاله، از منحنی تنش بر حسب دما مشتق دوم گرفته شد (شکل - ب). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی دارای سه تقعر است؛ تقعر اول مربوط به انتقال تنش از منطقه الاستیک به پلاستیک و تقعر دوم مربوط به جوانه‌زنی فاز آلفا در ساختار کاملاً بتا است. در مورد تقعر سوم، با توجه به اینکه این منطقه در دمای حدود ۹۸۰ °C قرار دارد و از طرف دیگر به دلیل نرخ کرنش پایین (0.01 s^{-1})، بر اساس تحقیقات پژوهشگران [۱۴] به نظر می‌رسد در این منطقه تبلور مجدد فاز بتا و یا کروی شدن ساختار سوزنی رخ داده باشد و از این رو سبب کاهش استحکام شده است.

با مقایسه نتایج حاصل از متالوگرافی و پیچش گرم برای هر دو آلیاژ، افزایشی در حدود ۱۰ °C برای دمای شروع استحاله فاز بتا به آلفا در آزمایش پیچش گرم مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد این تفاوت ناشی از پدیده استحاله متأثر از کرنش باشد [۱۵]. اعمال کرنش باعث افزایش انرژی ذخیره شده در اثر قفل شدن نابجایی‌ها و ایجاد مکان‌های مرجحی برای جوانه‌زنی فاز آلفا روی



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های الف- W970 و ب- W940 پس از انجام عملیات پیرسازی.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های الف- A970 و ب- A940 پس از انجام عملیات پیرسازی.

در نمونه‌های آنیل شده در دمای 970°C نسبت به نمونه‌های آنیل شده در دمای 940°C شده است.

چنان‌که در شکل ۵ نشان داده شده است، لایه‌های نازک فاز آلفای ثانویه در نمونه‌های سرمایش یافته در آب پس از نورد ثانویه و آنیل با وضوح بسیار اندکی رؤیت می‌شوند. مکانیزم تشکیل فاز آلفای ثانویه در مرجع [۵] به این صورت گزارش شده است که مرزدانه‌های فاز بتا، مکان‌های مرجحی برای تشکیل فیلم‌ها نازک فاز آلفا حین کار داغ، سرمایش پس از کار داغ و عملیات حرارتی هستند. تشکیل این نوع فاز آلفا که به نام آلفای ثانویه است از مرزدانه آغاز شده و لایه‌های آن تا داخل دانه ادامه می‌یابد. از سوی دیگر، ریزساختار نمونه‌های سرمایش یافته در هوا شرایط متفاوت‌تری را دارند. به عنوان نمونه، میانگین اندازه فاز آلفای اولیه در آن‌ها بیش‌تر از نمونه‌های سرمایش یافته در آب است و همچنین فاز آلفای ثانویه در زمینه آن‌ها به راحتی قابل مشاهده نیست که علت آن امکان به وجود آمدن زمان طولانی‌تر پس از نورد ثانویه حین سرمایش در هوا است. لذا این امر منجر به فراهم آمدن شرایط نفوذ و در نتیجه انحلال فاز آلفای ثانویه در زمینه بتا می‌شود.

در شکل ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های W970 و W940 پس از انجام عملیات پیرسازی، ارائه شده است. بدیهی است که به سبب سرمایش در آب پس از نورد گرم ثانویه و همچنین پس از عملیات آنیل انحلالی، فاز بتای استحاله یافته،

جدول ۲- کسر حجمی فاز آلفای اولیه و میانگین اندازه آن در آلیاژ Ti-6242S در نمونه‌های با تاریخچه متفاوت عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی.

کد نمونه	ویژگی	کسر حجمی فاز آلفای اولیه (%)	میانگین اندازه‌ی فاز آلفای اولیه (μm)
W970		۱۸	۵
W940		۲۵	۷/۵
A970		۲۸	۶/۵
A940		۳۶	۱۰

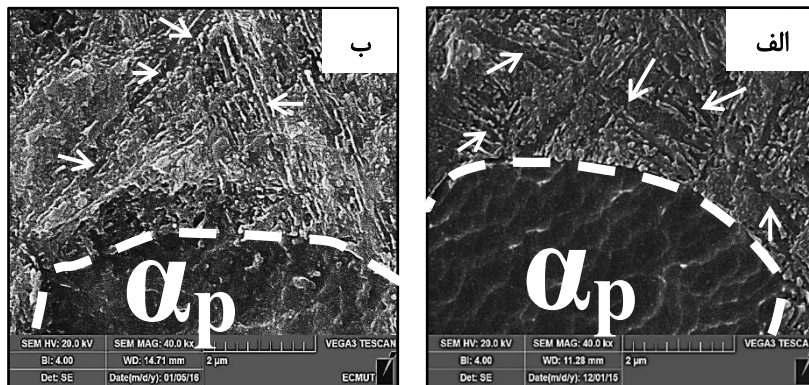
انرژی لازم جهت تبلور مجدد استاتیکی به واسطه‌ی عملیات حرارتی آنیل انحلالی در نمونه‌های سرد شده در آب، شده و در نتیجه می‌تواند موجب افزایش تعداد دانه‌های فاز آلفای اولیه‌ی کروی شود؛ به طوری که کسر فاز آلفای کروی در نمونه‌های W970 و W940 به ترتیب ۴۷ و ۳۰ درصد به دست آمد. در حالی که برای نمونه‌های A970 و A940 به ترتیب ۳۲ و ۲۵ درصد به دست آمد. دمای بالاتر عملیات آنیل انحلالی، سبب تکه‌تکه شدن فاز آلفای کشیده شده که در ادامه می‌تواند سبب تشکیل فاز آلفای کروی شود؛ به طوری که تعداد دانه‌های فاز آلفای کروی در نمونه‌های W970 و A970، بیش‌تر از نمونه‌های W940 و A940 است. علاوه بر این و با افزایش دمای عملیات آنیل انحلالی از 940°C به 970°C ، میزان نفوذ عناصر با سهولت بیشتر و جدایش عناصر پایدارساز آلفا آسان‌تر می‌شود [۱۷]، که این موضوع سبب افزایش تعداد دانه‌های کروی فاز آلفای اولیه

نشان می‌دهد که افت حرارتی شدیدتر (ΔT بیش‌تر)، مشخصاً بر پهنای لایه‌ی فاز آلفای اولیه اثر می‌گذارد. این در حالی است که اندازه‌ی کلونی‌های آلفا و طول لایه‌های پیوسته‌ی آلفا در مرزخانه‌های بتا، تا حد زیادی به کمک اندازه دانه بتا تعیین می‌گردد. لذا با توجه به یکسان بودن محیط سرمایش پس از فرآیند آنیل انحلالی در دماهای 940°C و 970°C ، نمونه‌هایی که در دمای 970°C تحت آنیل انحلالی قرار گرفتند، به ترتیب نسبت به نمونه‌هایی که در دمای 940°C تحت آنیل انحلالی قرار گرفتند، به‌واسطه‌ی بالاتر بودن دمای عملیات حرارتی آنیل انحلالی، شانس بیشتری را برای رشد فاز آلفای ثانویه دارند و در نتیجه دارای آلفای ثانویه با ضخامت بیشتر هستند (جدول ۳). افزایش ضخامت و طول لایه‌های تیغه‌ای فاز آلفای ثانویه به خروج عناصر پایدارساز فاز بتا از این فاز در دماهای بالا نیز می‌تواند مربوط شود. به طوری که در تصاویر شکل‌های ۶-ب و ۷-ب مشاهده می‌شود که لایه‌ها قابل مشاهده نبوده و با زمینه به صورت درهم‌رفته و تودرتو مشاهده می‌شود. همچنین گزارش شده است [۱۹] که با افزایش دمای آنیل انحلالی، میزان خروج عنصر مولیبدن از فاز بتا، که پایدارساز این فاز نیز است، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش دمای عملیات آنیل انحلالی، غلظت تنها عنصر پایدارساز فاز بتا در آلیاژ Ti-6242S، یعنی مولیبدن، در فاز بتا کاهش می‌یابد. این

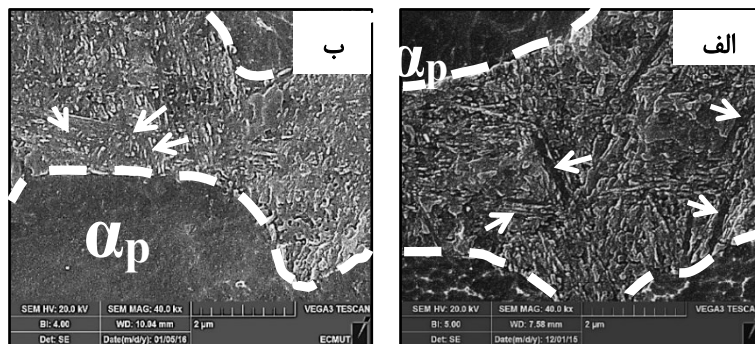
دارای درهم‌تنیدگی و درهم‌فرورفتگی زیادی بوده و بسیار ریز به نظر برسد. در این تصاویر مناطق تیره‌تر نمایانگر فاز آلفا و مناطق روشن‌تر، نمایانگر فاز بتا است. مطابق تصاویر SEM مشاهده می‌شود که فاز بتای استحاله‌یافته به واسطه سرمایش در آب پس از عملیات آنیل انحلالی، همراه با درهم‌تنیدگی زیادی است. همچنین فاز آلفای ثانویه موجود در شکل ۶، به صورت نوارهایی باریک و نازک دیده می‌شود. در شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های A940 و A970 پس از انجام عملیات پیرسازی ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ ضخامت لایه‌های فاز آلفا در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی ارائه شده است.

مقایسه دو شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که پس از نورد ثانویه در آب سرد شده‌اند، به دلیل افت سریع‌تر دما، فاز بتای استحاله‌یافته، دارای درهم‌تنیدگی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی است که پس از نورد ثانویه در هوا سرد شده‌اند. دستیابی به این نوع ساختار در مطالعات [۱۸] نیز گزارش شده است. همچنین اهمیت محیط سرمایش پس از فرآیند نورد گرم ثانویه، در اثرگذاری آن بر میزان اندازه کلونی آلفا خلاصه می‌شود.

به این صورت که افزایش سرعت سرمایش، موجب ریزتر شدن تیغه‌های فاز آلفای تشکیل شده و متراکم‌تر کردن آن‌ها در منطقه‌ی بین لایه‌ها می‌شود. همچنین مقایسه شکل‌های ۶ و ۷



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ریزساختار نمونه‌های الف- W970 و ب- W940 پس از انجام پیرسازی. فاز آلفای ثانویه با پیکان مشخص شده است.



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ریزساختار نمونه‌های الف- A970 و ب- A940 پس از انجام پیرسازی. فاز آلفای ثانویه با پیکان مشخص شده است.

جدول ۳- میانگین ضخامت‌های فاز آلفای ثانویه در زمینه‌ی آلیاژ Ti-6242S در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی.

ویژگی کد نمونه	میانگین ضخامت فاز آلفای ثانویه (μm)
W970	۰/۱۹۰
W940	۰/۱۶۰
A970	۰/۲۰۰
A940	۰/۱۷۵

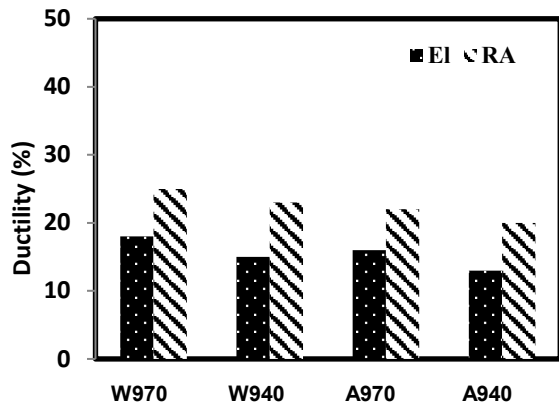
به این معنی است که کاهش غلظت این عنصر در فاز بتا، سبب کاهش درصد فاز بتای باقی‌مانده و نازک‌تر شدن لایه‌های این فاز در زمینه‌ی آلیاژ می‌شود؛ که این موضوع می‌تواند با درشت شدن لایه‌های کناری، یعنی لایه‌های فاز آلفای ثانویه همراه شود. از این رو، ضخامت فاز آلفای ثانویه با افزایش دمای عملیات حرارتی از ۹۴۰ به ۹۷۰°C افزایش یافته است.

۳-۳- ارزیابی تغییرات خواص کششی با تغییر پارامترهای عملیات ترمومکانیکی و حرارتی

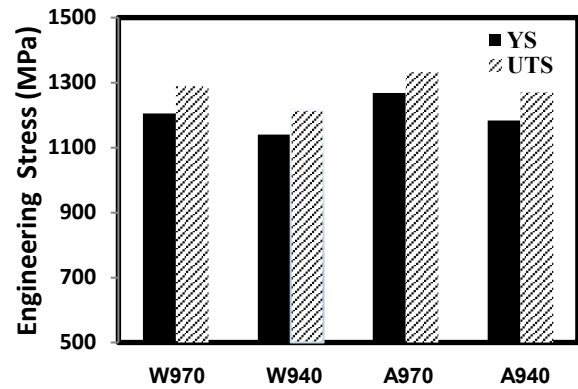
تغییرات تنش و انعطاف‌پذیری حاصل از آزمایش کشش دما محیط و دمای ۴۸۰°C آلیاژ Ti-6242S برای نمونه‌های W970 ، W940 ، A970 و A940 پس از انجام عملیات پیرسازی به ترتیب در شکل ۹ به نمایش در آمده است. آنچه که سبب ایجاد اختلاف در درصد ازدیاد طول و کرنش شکست دو نمونه A970 و W970 به ترتیب نسبت به دو نمونه A940 و W940 ، کسر حجمی فاز آلفای کرووی و ریزتر با جهت‌گیری‌های کریستالوگرافی غیر یکسان همراه با کسر حجمی فاز بتای باقی‌مانده بیش‌تر است.

چنانکه مشاهده می‌شود، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و انعطاف‌پذیری نمونه‌های W970 و A970 نسبت به نمونه‌های W940 و A940 بیشتر است. همچنین بالاتر بودن استحکام و کمتر بودن انعطاف‌پذیری نمونه‌های با محیط سرمایش هوا پس از نورد ثانویه نسبت به نمونه‌های محیط سرمایش آب در شرایط دمایی یکسان عملیات آنیل انحلالی مشاهده می‌شود. از سوی دیگر مقایسه داده‌های شکل ۸ که نشان دهنده خواص کششی آلیاژ در دمای محیط است با داده‌های شکل ۹ که نشان دهنده خواص کششی آلیاژ در دمای ۴۸۰°C است، روند تغییرات مشابهی را با تغییر محیط سرمایش پس از نورد ثانویه و همچنین تغییر دمای عملیات آنیل انحلالی نشان می‌دهد. لذا تحلیل نتایج خواص کشش دما محیط با دمای بالا با

لحاظ کردن هر دو شرایط انجام شده است. عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۹۷۰°C پس از نورد ثانویه و سرمایش در هر دو محیط آب و هوا، که با افت حرارتی بیش‌تری نسبت به دمای ۹۴۰°C نیز همراه است، باعث می‌شود تا اندازه‌ی فاز آلفا مطابق شکل ۴-الف نسبت به ۴-ب و شکل ۵-الف نسبت به شکل ۵-ب بیشتر کاهش یابد. در نتیجه، طول لغزش در نمونه‌های W970 و A970 نسبت به نمونه‌های W940 و A940 کمتر می‌شود. زیرا هر عاملی که سبب توقف حرکت نابجایی‌ها شود، موجب افزایش استحکام می‌گردد و لذا تعداد فاز آلفای کرووی و با اندازه کوچک‌تر، نه‌تنها ضمن ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها، بلکه با کاهش طول تجمع آن‌ها در پشت سر یکدیگر سبب افزایش استحکام تسلیم می‌شود [۲۰] که در نهایت سبب افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی می‌گردد. علاوه بر این، بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ بالاتر بودن دمای عملیات حرارتی در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای ۹۷۰°C باعث شده است تا افزون بر ریزتر شدن فاز آلفای اولیه- به‌واسطه‌ی حل شدن فاز آلفای اولیه و تمایل به تشکیل مورفولوژی کرووی با نسبت سطح به حجم کم‌تر- میزان کرووی شدن این فاز نیز افزایش یابد؛ گزارش شده است [۹،۱] که عملیات حرارتی در محدوده‌ی پایداری فازهای آلفا/بتا و با به‌کارگیری زمان کافی و دمای مناسب، سبب کرووی و هم‌محور شدن فاز آلفای اولیه می‌شود هم‌چنین اثر افزایش دما به‌واسطه‌ی تسهیل فرآیندهای نفوذ، در کرووی کردن و یا تکه‌تکه شدن فاز آلفای کشیده شده بیش‌تر است. لذا این موضوع اثر بسیار فراوانی در افزایش استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌های W970 و A970 نسبت به نمونه‌های W940 و A940 دارد (مقایسه داده‌های شکل‌های ۸ و ۹). همچنین از آنجایی که سرعت رشد و افزایش ضخامت لایه‌های فاز آلفای ثانویه به نفوذپذیری عناصر آلیاژی آن آلیاژ بستگی داشته و این پارامتر نیز شدیداً به دما وابسته است، بنابراین با توجه به شکل ۴-الف نسبت به شکل ۴-ب و شکل ۵-الف نسبت به شکل ۵-ب، به نظر می‌رسد دمای بالاتر عملیات آنیل انحلالی سبب خروج بیش‌تر عنصر مولیبدن از فاز بتا شده و این امر به افزایش ضخامت فاز آلفای ثانویه می‌انجامد. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد که رشد همه‌جانبه‌ی لایه‌های ریز و درشت فاز آلفا نیز، سبب افزایش استحکام تسلیم آلیاژ می‌شود، که این خود دلیل محکمی بر اثربخشی عملیات پیرسازی در افزایش استحکام آلیاژ است؛ چرا که عملیات پیرسازی با ایجاد رسوبات در مرز لایه‌ها و ارتباط مستقیم تعداد این لایه‌ها با اثربخشی این فرآیند، سبب افزایش استحکام آلیاژ می‌شود [۲۱].

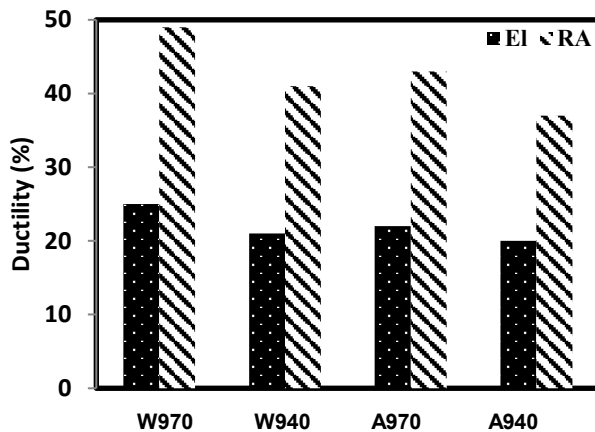


ب

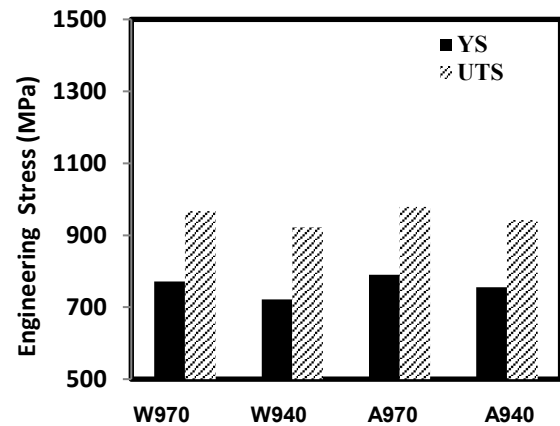


الف

شکل ۸- تغییرات الف- تنش تسلیم و تنش کششی نهایی و ب- درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع حاصل آزمایش کشش دمای محیط برای آلیاژ Ti-6242S در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی و حرارتی (دمای انحلال/ محیط سرمایش پس از نورد).



ب



الف

شکل ۹- تغییرات الف- تنش تسلیم و تنش کششی نهایی و ب- درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع حاصل آزمایش کشش در دمای ۴۸۰ °C برای آلیاژ Ti-6242S در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی و حرارتی (دمای انحلال/ محیط سرمایش پس از نورد).

کششی تسلیم و نهایی، مربوط به نمونه A970 است؛ که مقادیر آن به ترتیب ۱۲۶۸ و ۱۳۳۲ در دمای محیط و ۷۹۰ MPa و ۹۷۹ در دمای ۴۸۰ °C به دست آمد. این موضوع به دلیل بیش‌تر بودن کسر حجمی فاز آلفا به واسطه‌ی سرمایش در هوا پس از نورد گرم ثانویه و بالاتر بودن دمای عملیات آنیل انحلالی و در نتیجه بیش‌تر بودن افت حرارتی است که سبب ریزدانه‌تر شدن و کروی‌تر شدن فاز آلفا می‌شود. هم‌چنین، با وجود کم‌تر بودن استحکام کششی نمونه W970 نسبت به نمونه A970، در این نمونه به دلیل بیش‌تر بودن درصد فاز بتا در زمینه، درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع بیش‌تر است. به‌گونه‌ای که مقادیر درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع حاصل از آزمایش کشش در دمای محیط در نمونه W970 به ترتیب ۱۸ و ۲۵ درصد است؛ در حالی که همین پارامترها برای نمونه A970 به ترتیب ۱۶ و ۲۲ درصد به دست آمد. از سوی دیگر، افزایش

نتایج حاصل از آزمایش کشش سرد (شکل ۸) و گرم (شکل ۹) نشان می‌دهد که نسبت پارامتر کارسخت‌پذیری، یعنی σ_{UTS}/σ_{YS} در نمونه‌های W970 و A970 نسبت به نمونه‌های W940 و A940 بیشتر است. بر خلاف سایر فلزات اعم از آلیاژهای آهنی، سختی‌پذیری در آلیاژهای شبه آلفا و یا آلفا/بتای تیتانیوم، قابلیت وقوع استحاله‌ی کامل فاز بتای استحاله‌یافته و یا بتای باقی‌مانده در دمای اتاق معنا می‌شود [۲۲]؛ که این امر با فرآهم آوردن شرایط سرمایش سریع و افت دمایی شدیدتر در نمونه‌های W970 و A970 به ترتیب نسبت به نمونه‌های W940 و A940 احراز و یا تشدید شده است. بدیهی است که اختلاف پارامتر کارسختی‌پذیری در آزمایش کشش سرد به دلیل پایین‌تر بودن دمای آزمایش، نمود بیش‌تری نسبت به آزمایش کشش گرم دارد. همان‌گونه که نتایج به دست آمده از آزمایش کشش سرد و گرم هر ۴ نمونه آلیاژ Ti-6242S نشان می‌دهند، بیش‌ترین استحکام

مراجع

- [1] Lütjering G., Williams J. C., Titanium, Springer, First Edition, 2003.
- [2] Srivatsan T., Al-Hajri M., Petraroli M., Derreberry B., Lam P., The fracture behavior of a Ti-6242 alloy deformed in bending fatigue, Materials Science and Engineering A, 2002, 334, 327-333.
- [3] Hörnqvist M., Månsson T., Fatigue crack growth in Ti-6242 under elasto-plastic loading conditions, Procedia Engineering, 2010, 2, 223-229.
- [4] Campbell J.F., Manufacturing technology for aerospace structural materials: Elsevier, First Edition, 2011.
- [5] Leyens C., Peters M., Titanium and titanium alloys, Wiley-VCH Verlag, First Edition, 2003.
- [6] Lütjering G., Williams J., Gysler A., Microstructure and mechanical properties of titanium alloys, Microstructure and Properties of Materials, 2000, 2, 1-74.
- [7] Mitchell B. S., An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers, John Wiley & Sons, First Edition, 2004.
- [8] Semiati S.L., An overview of the thermomechanical processing of α/β titanium alloys: current status and future research opportunities, Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51, 2593-2625.
- [9] Semiati S., Thomas J., Dadras P., Processing-microstructure relationships for Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1 Si, Metallurgical Transactions A, 1998, 14 2363-2374.
- [10] Dieter G. E., Kuhn H. A., Semiati S. L., Handbook of workability and process design, ASM International, First Edition, 2003.
- [11] Welsch G., Boyer R., Collings E.W., Materials Properties handbook: Titanium alloys, ASM International, First Edition, 1993.
- [12] Roy S., Tungala V., Suwas S., Effect of Hypoeutectic boron addition on the β transus of Ti-6Al-4V alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42, 2535-2541.
- [13] Fields J.D.S., Backofen W.A., Determination of strain-hardening characteristics by torsion testing, American Society for Testing and Materials Proceedings, 1957, 57, 1259-1272.
- [14] Prasad Y. V. R. K., Sasidhara S., Hot working guide: A Compendium of processing maps, ASM International, First Edition, 1997.
- [15] Abbaschian R., Reed-Hill R., Physical metallurgy principles, Cengage Learning, Forth Edition, 2009.
- [16] Dehghan-Manshadi A., Dippenaar R.J., Strain-induced phase transformation during thermo-mechanical processing of titanium alloys, Materials Science and Engineering A, 2012, 552, 451-456.
- [17] McQuillan M., Phase transformations in titanium and its alloys, Metallurgical Reviews, 1963, 8, 41-104.
- [18] Sha W., Malinov S., Titanium alloys: Modelling of microstructure, properties and applications, Elsevier, First Edition, 2009.
- [19] Lin P., Zhou L., Xu P., et al. Enhanced strength of dual-phase Ti6242 alloy via a heterogeneous microstructure, Materials & Design, 2023, 230, 111972.
- [20] Jia W., Zeng W., Yu H., Effect of aging on the tensile properties and microstructures of a near-alpha titanium alloy, Materials & Design, 2014, 58, 108-115.
- [21] Donachie M.J., Titanium: A technical guide: ASM International, Second Edition, 2000.

استحکام در نمونه‌های با محیط سرمایش هوا در مقایسه با نمونه‌های با محیط سرمایش آب پس از نورد، به دلیل بیش‌تر بودن کسر حجمی فاز آلفا با ساختار کریستالوگرافی HCP و با تعداد صفحات لغزش کمتر است که متعاقباً منجر به افت درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع این نمونه‌ها شده است (مقایسه تصاویر شکل ۵ با شکل ۴). بر اساس نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که دمای پایین‌تر عملیات حرارتی در نمونه‌های W970 و A970 نسبت به نمونه‌های W940 و A940، سبب حفظ بیش‌تر اثرات ناشی از سرمایش پس از فرآیند نورد گرم ثانویه بر ریزساختارهای حاصله از عملیات حرارتی آنیل انحلالی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- نتایج تعیین دمای استحاله آلفا به بتا در آلیاژ Ti-6242S با روش عملیات حرارتی با سیکل گرمایش، عملیات حرارتی با سیکل سرمایش و همچنین آزمایش پیچش گرم نشان داد که دمای استحاله‌ی این آلیاژ، 1000 ± 5 °C است.
- ۲- سرمایش در آب پس از عملیات نورد گرم ثانویه، سبب ریزتر شدن ریزساختار آلیاژ Ti-6242S و افزایش مکان‌های جوانه زنی فاز آلفای اولیه و در نتیجه کروی‌تر شدن این فاز شده است.
- ۳- دمای بالاتر عملیات حرارتی، سبب کروی‌تر شدن فاز آلفای اولیه و کاهش نسبت سطح به حجم آن، کاهش اثرات نامطلوب توزیع ناهمگن عناصر آلیاژی و پهن‌تر شدن ضخامت فاز آلفای ثانویه در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 970 °C با محیط سرمایش آب و هوا پس از نورد ثانویه به ترتیب نسبت به نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 940 °C با محیط سرمایش آب و هوا پس از نورد ثانویه می‌شود.
- ۴- نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 970 °C به واسطه ی کسر بالای فاز آلفای کروی و بیش‌تر بودن کسر حجمی فاز بتای باقی‌مانده از استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی و همچنین ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع بیش‌تری برخوردار هستند.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

The Evaluation of Thermomechanical and Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Tensile Properties of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si Alloy

Maryam Morakabati^{1*}, Seyed Mehdi Abbasi², Yavar Mansouri³

1. Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

2. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3. M.Sc. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* Corresponding author: m_morakabati@mut.ac.ir

Paper history:

Received: 18 June 2023
Accepted: 10 March 2024

Keywords:

Secondary rolling,
Cooling environment,
Annealing heat treatment,
Microstructure,
Tensile test.

Abstract:

This research aims to study the effect of the cooling environment after secondary rolling and the annealing temperature on the microstructure and tensile properties of the near alpha Ti-6242S alloy. The produced ingot was homogenized and hot rolled at 1150°C. Then, the transit temperature of alpha to the beta of the alloy was determined as 1000±5°C via heat treatment and hot torsion test. Subsequently, the strips were secondary hot rolled at 940°C and cooled at water and air. Then, they were solution annealed for 1 hour at 940 and 970°C, and water quenched and aged. Afterwards, the microstructure was studied and the tensile test was performed at 25 and 480°C. Results showed that the specimens with the same cooling environment annealed at 970°C as compared with the ones annealed at 940°C, have the microstructure with more rounded and lower volume fraction of primary alpha phase and wider secondary alpha phase results to the achievement of higher strength and ductility. Besides, the increase in strength of the specimens cooled in air compared to the ones cooled in water after rolling is related to the higher volume fraction of the alpha phase leading to a decrease in ductility.

[Please cite this article using:](#)

Maryam Morakabati, Seyed Mehdi Abbasi, Yavar Mansouri, The Evaluation of Thermomechanical and Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Tensile Properties of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2023, 7(1) 45-55.

DOI: 10.22034/FRJ.2024.402919.1179

Journal homepage: www.foundingjournal.ir