

بررسی تأثیر عملیات آنیل محلولی و پیرسازی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6242

رامین حسینی^{۱*}، مریم مرکباتی^۲، علیرضا حجاری^۳، سید مهدی عباسی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، (ramin_blueliver@yahoo.com)

۲- استادیار، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، (m_morakabati@iust.ac.ir)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، (hajari_alireza@yahoo.com)

۴- دانشیار، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، (sma_abbasi@alborz.kntu.ac.ir)

Effect of annealing treatment and aging on the microstructure and tensile properties of Ti-6242

R. Hosseini^{1*}, M. Morakkabati², A.R. Hajari³, S.M. Abbasi⁴

1- M.Sc. Student, Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, E-Mail: Ramin_blueliver@yahoo.com

2- Assistant Prof., Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, E-Mail: m_morakabati@iust.ac.ir

3- M.Sc. Student, Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, E-Mail: hajari_alireza@yahoo.com

4- Associated Prof., Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, E-Mail: sma_abbasi@alborz.kntu.ac.ir

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر دمای آنیل، محیط سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی و دمای عملیات پیرسازی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo است. مطالعه تأثیر دمای عملیات آنیل محلولی با انجام آن در محدوده دو فازی آلفا-بتا و در بازه دمایی °C ۹۴۰-۹۸۵ (با گام‌های ۱۵ °C) و سرمایش در هوا انجام شد. همچنین به منظور بررسی نرخ سرمایش، نمونه‌ای از این آلیاژ پس از عملیات آنیل محلولی در دمای °C ۹۵۵ در روغن نیز سرد شد. در ادامه جهت تعیین اثر دمای پیرسازی، نمونه‌هایی که در دمای °C ۹۵۵ آنیل و در هوا سرد شده بودند در سه دمای °C ۵۷۰، ۶۰۰ و °C ۶۳۰ پیرسازی شدند. نتایج حاصل از مطالعات ریزساختاری نشان داد که افزایش دمای آنیل منجر به کاهش کسر حجمی فاز آلفای اولیه، افزایش ضخامت آلفای ثانویه و اندازه کولونی آلفا می‌شود. همچنین مهم‌ترین تفاوت ریزساختاری با افزایش نرخ سرمایش پس از آنیل، کاهش ضخامت آلفای ثانویه بود که با افزایش استحکام و افت داکتیلیته آلیاژ همراه شد. افزایش دمای پیرسازی منجر به افزایش اندازه کولونی آلفا و ضخامت آلفای ثانویه شد اما تفاوت چندانی در داکتیلیته آلیاژ ایجاد نکرد. مناسب‌ترین خواص کششی در آلیاژ مورد بررسی با آنیل در دمای °C ۹۵۵، سرمایش در هوا و پیرسازی در دمای °C ۶۰۰ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ Ti-6242، عملیات آنیل محلولی و پیرسازی، پارامترهای ریزساختاری، خواص کششی.

Abstract

The effect of variation in annealing heat treatment parameters such as temperature and cooling rate and subsequent aging temperature on the microstructure and tensile properties of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy is the purpose of this study. In order to clarify the effect of annealing temperature, heat treatment carried out in the temperature range of 940-990°C (with 15°C steps) followed by air cooling. The effect of cooling rate was also examined in one specimen annealed at 955°C by cooling in oil. The response of this alloy to aging temperature was evaluated by aging annealed specimens at 955°C at various temperatures of 570, 600 and 630°C. Microstructural analysis showed that increasing the annealing temperature led to a decrease in volume fraction of primary alpha and increase in secondary alpha thickness and alpha colony size. In addition, the most important microstructural difference in various cooling rate after annealing treatment is the decrease in secondary alpha thickness that causes an increase in strength and decrease in ductility. Increasing the aging temperature led to an increase in alpha colony size and secondary alpha thickness while negligible variation in ductility was detected. The best tensile properties of the alloy resulted by annealing at 955°C, cooling in air and aging at 600°C.

Keywords: Ti-6242 alloy, annealing treatment and aging, microstructural parameters, tensile properties.

مقدمه

ریزساختار دوگانه تحت تاثیر قابل ملاحظه پارامترهایی از قبیل اندازه کولونی آلفا، کسر حجمی فاز آلفای اولیه، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدهانه‌ای است و تغییر پارامترهای نامبرده با کنترل شرایط عملیات آنیل محلولی و پیرسازی امکان‌پذیر است. از سوی دیگر در مراجع تنها به گزارش خواص کششی آلیاژ Ti-6242 پرداخته شده و پژوهشی مبنی بر ارتباط بین ریزساختار و خواص کششی این آلیاژ وجود ندارد. لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر دمای عملیات آنیل محلولی و پیرسازی و همچنین مطالعه تأثیر محیط سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6242 و برقراری ارتباط بین آن‌ها است.

مواد و روش پژوهش

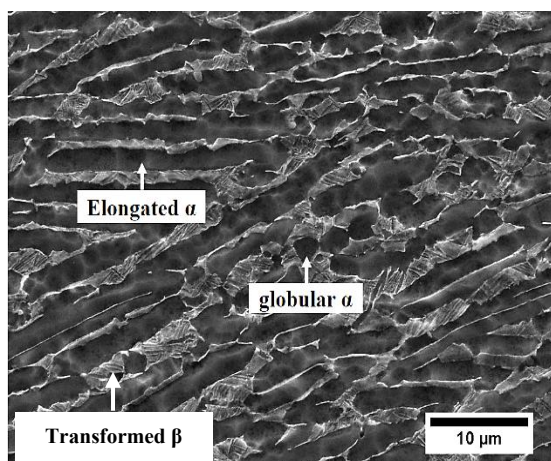
آلیاژ مورد بررسی در این پژوهش طی دو مرحله در کوره VAR و تحت خلا 2×10^{-2} میلی‌بار ذوب شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6242 مورد استفاده در این پژوهش بر حسب درصد وزنی عناصر موجود، در جدول ۱ گزارش شده است. به منظور شکستن ساختار ریختگی، این آلیاژ پس از همگن‌سازی، تحت عملیات نوردگرم اولیه در منطقه تکفاز بتا (دمای 1150°C) قرار گرفت. میزان کاهش سطح مقطع در عملیات نورد گرم اولیه ۷۵٪ بود. سپس عملیات نورد گرم ثانویه در محدوده دوفازی آلفا-بتا (دمای 950°C) و با ۶۰٪ کاهش ضخامت انجام شد. دمای استحاله بتای آلیاژ مذکور بر اساس بررسی‌های متالوگرافی حدود 995°C تخمین زده شد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6242 (درصد وزنی).

Al	Sn	Zr	Mo	Ti
۵/۷	۱/۸	۳/۸	۱/۹	باقی‌مانده

در مرحله نخست و به منظور بررسی تاثیر دمای عملیات آنیل محلولی، نمونه‌هایی از این آلیاژ به مدت یک ساعت در 4°C دمای مختلف در بازه دمایی $940-985^\circ\text{C}$ (با گام‌های 15°C) آنیل و سپس در هوا سرد شدند. در مرحله دوم و به منظور بررسی تأثیر محیط سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی، نمونه‌ی آنیل شده در

آلیاژهای تیتانیم شبه‌آلفا به دلیل ارائه خواص خزشی مناسب از جمله آلیاژهای پرمصرف در کاربردهایی نظیر اجزای حساس موتورهای جت هستند. افزایش کارایی آلیاژهای تیتانیم که به واسطه بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها صورت می‌گیرد، به عنوان یک اصل مهم در طراحی این آلیاژها در نظر گرفته می‌شود. آلیاژ شبه آلفای Ti-6242 در قسمت کمپرسور موتورهای جت و اجزای پوسته هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳-۱]. به منظور دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، عملیات حرارتی نهایی استاندارد برای آلیاژ Ti-6242، عملیات آنیل محلولی و پیرسازی [۱] است [۴ و ۵]. آلیاژهای تیتانیم شبه‌آلفا که تحت این عملیات دو مرحله‌ای قرار می‌گیرند، خواص مکانیکی (از جمله استحکام تسلیم، استحکام کششی و خواص خستگی) مناسب‌تری نسبت به آلیاژهای شبه‌آلفایی دارند که تنها تحت عملیات آنیل قرار می‌گیرند [۶ و ۷]. ریزساختار دوگانه ۲ که شامل آلفای کروی در زمینه‌ای از آلفا و بتای لایه‌ای است، تلفیق مناسبی از خواص کششی، خستگی و خزشی ریزساختارهای لایه‌ای ۳ و هم‌محور ۴ ارائه می‌دهد. از این رو ریزساختار دوگانه پرکاربردترین ریزساختار در آلیاژهای تیتانیم دو فازی است [۸ و ۹]. بنا به تحقیقات انجام شده [۱۰ و ۱۱] دمای عملیات آنیل محلولی نقش مهمی در تعیین کسر حجمی فاز آلفای اولیه و همچنین درصد عناصر آلیاژی در فازهای مختلف دارد. بررسی‌ها [۱۲] نشان داده است که سرعت سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی در منطقه دوفازی آلفا-بتا تعیین‌کننده اندازه کولونی آلفا (پهنای لایه‌هایی موازی از آلفا-بتا) و ضخامت آلفای ثانویه است و تأثیر قابل توجهی بر استحکام آلیاژهای تیتانیم شبه آلفا دارد. همچنین در پژوهشی دیگر [۱۳] بررسی خواص کششی آلیاژ TG6 با ریزساختار دوگانه نشان داد که کاهش ضخامت آلفای ثانویه منجر به افزایش استحکام کششی شده است. در آلیاژهای تیتانیم شبه آلفا، زمان و دمای مناسب برای عملیات پیرسازی به میزان عناصر آلیاژی و استحکام مورد نیاز وابسته است [۲]. بنابراین به کمک عملیات آنیل محلولی و پیرسازی می‌توان به محدوده وسیعی از استحکام و ریزساختار در این آلیاژها دست یافت [۷ و ۱۴]. خواص کششی آلیاژهای تیتانیم شبه آلفا با



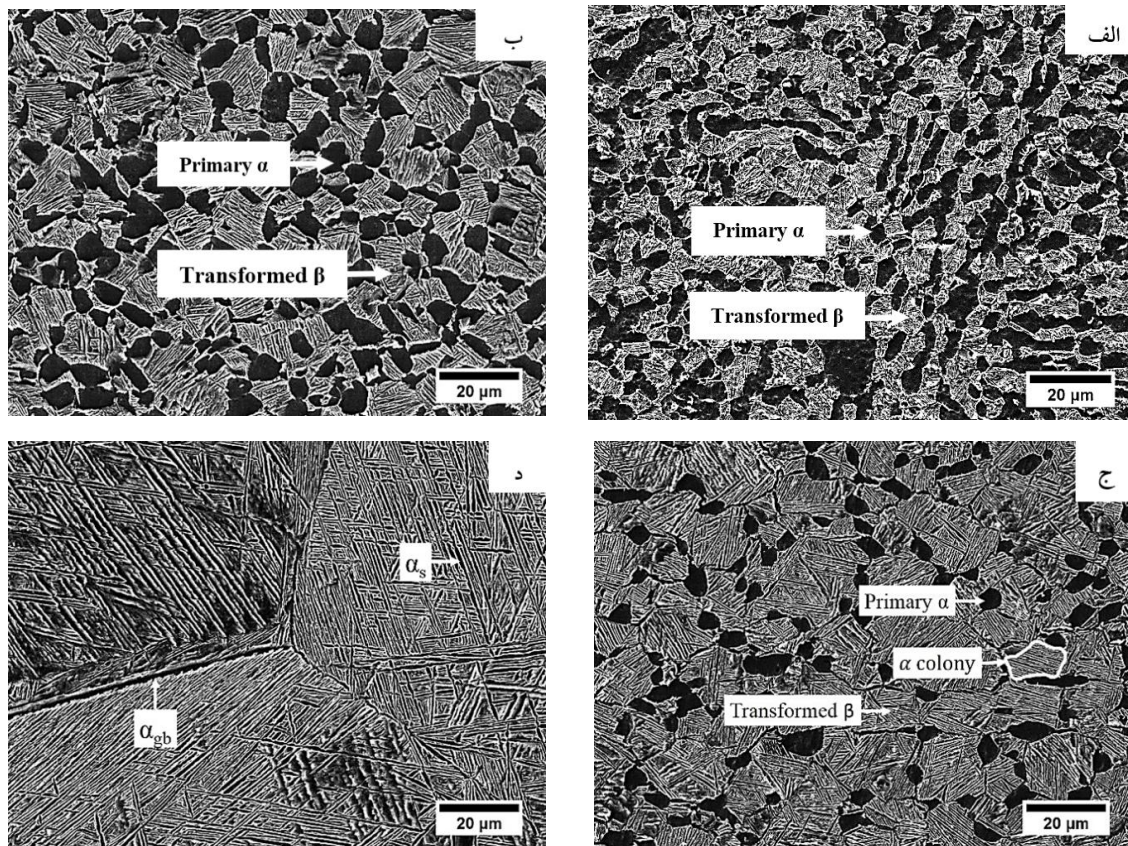
شکل (۱) ریزساختار آلیاژ Ti-6242 پس از نورد گرم ثانویه.

نتایج و بحث

۱- تاثیر دمای آنیل بر کروی شدن

شکل ۲ ریزساختار SEM نمونه‌های آنیل شده در ۴ دمای مختلف در محدوده دو فاز آلفا-بتا را پس از پیرسازی به مدت ۸ ساعت در دمای 600°C نشان می‌دهد. محققان [۱۵-۱۸] معتقدند، کروی شدن فاز آلفا از طریق دو مکانیزم کروی شدن دینامیک (حین مرحله تغییر شکل گرم) و یا استاتیک (در مرحله آنیل محلولی) رخ می‌دهد. بنابراین بنا بر بررسی‌های انجام شده [۴]، پیرسازی تاثیری بر میزان کروی شدن فاز آلفای اولیه ندارد. از این رو در این پژوهش، بررسی تاثیر دمای آنیل بر کروی شدن فاز آلفا روی نمونه‌های پیرسازی شده انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ریزساختار حاصل از آنیل در دمای 985°C ، ریزساختار سبکی شکل یا همان بتای استحاله یافته است. در ادامه و با کاهش دمای آنیل نسبت به دمای 985°C ، ریزساختارهای دوگانه با کسر حجمی متفاوت آلفای اولیه بدست آمدند. با مقایسه ریزساختار آلیاژ در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که کسر بیشتری از دانه‌های کشیده‌ی آلفا حین عملیات آنیل به صورت استاتیک کروی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ریزساختار پس از تغییر شکل ثانویه در دمای 950°C ، شامل آلفاهای کشیده در جهت نورد به همراه مقدار اندکی آلفای کروی است. با توجه به اینکه فاز آلفا در دمای پایین و فاز بتا در دماهای بالا پایدار است، با کاهش دمای عملیات آنیل

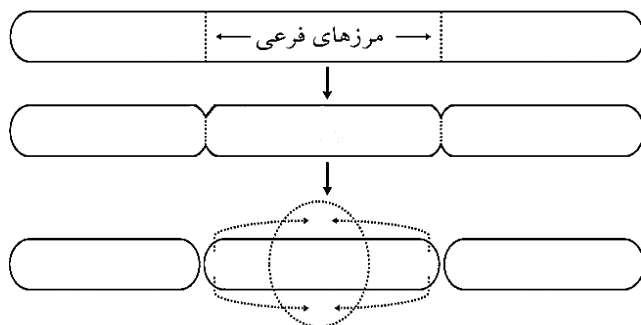
دمای 950°C در محیط روغن نیز سرد شد. لازم به ذکر است که بررسی‌های ریزساختاری و خواص کششی نمونه‌های این دو مرحله، پس از پیرسازی آن‌ها در دمای 600°C انجام شد. سپس در مرحله سوم و با هدف تعیین تاثیر دمای پیرسازی بر ریزساختار و خواص کششی این آلیاژ، نمونه آنیل شده در دمای 950°C که در هوا سرد شده بود علاوه بر دمای 600°C در دو دمای 570°C و 620°C نیز پیرسازی شد. زمان عملیات پیرسازی برای تمامی نمونه‌ها ۸ ساعت و محیط سرمایش پس از آن هوا است. پس از انجام عملیات فوق، بررسی خواص کششی آلیاژ انجام شد. نمونه‌های آزمایش کشش به ترتیب دارای طول و قطر گیج ۲۵ و $6/25$ میلی‌متر بودند. آزمایش کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 و با نرخ کرنش 10^{-3} s^{-1} بوسیله دستگاه INSTRON 8502 انجام شد. در ادامه سطح نمونه‌های عملیات حرارتی شده به منظور برداشتن لایه اکسیدی، یک میلی‌متر لایه برداری شد. همچنین به منظور بررسی‌های متالوگرافی، سطح نمونه‌ها با ورق سنباده مش ۶۰ تا ۳۰۰۰ صیقل داده و سپس حکاکی شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از محلول کروم با ترکیب ۲ میلی‌لیتر HF، ۲ میلی‌لیتر HNO_3 و ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر انجام شد. بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل BX51 Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Tescan VEGA3 انجام شد. همچنین با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر Clemex، محاسبه کسر حجمی فاز آلفای اولیه نیز صورت گرفت. ریزساختار آلیاژ مورد بررسی پس از نورد گرم ثانویه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، دانه‌های آلفای اولیه حین تغییر شکل ایجاد و در راستای نورد کشیده شده‌اند. همچنین در بخشی از ساختار کروی شدن دینامیک رخ داده است که در نتیجه وقوع این پدیده نسبت ابعادی برخی از دانه‌های آلفا کاهش یافته و تعدادی دانه کروی آلفا در ریزساختار تشکیل شده است.



شکل (۲) ریزساختار حاصل از عملیات آنیل محلولی در دماهای الف) 940°C ، ب) 955°C ، ج) 970°C و د) 985°C پس از پیرسازی در دمای 600°C .

و دمای عملیات آنیل محلولی منجر به افزایش میزان کروی شدن فاز آلفا می‌شود.

در شکل ۳ شماتیک فرآیند کروی شدن لایه‌های آلفا حین عملیات آنیل نشان داده شده است.



شکل (۳) مکانیزم کروی شدن استاتیک فاز آلفای اولیه [۱۹].

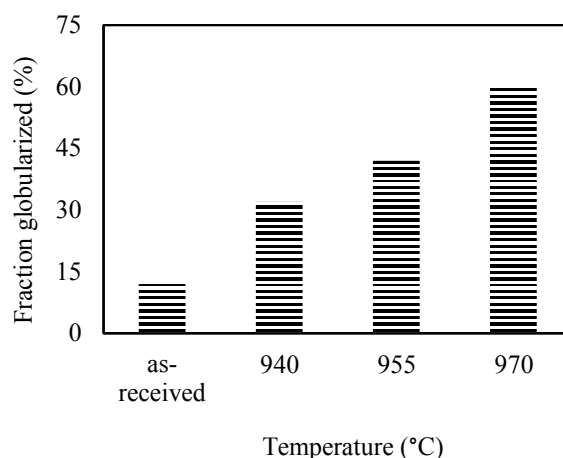
محلولی دانه‌های آلفای اولیه رشد کرده و سبب افزایش کسر حجمی فاز آلفا می‌شود. از آنجا که کره کمترین نسبت سطح به حجم را دارد پایدارترین وضعیت برای فاز آلفا کروی شدن آن است. تحقیقات اخیر [۱۹] نشان می‌دهد که مکانیزم کروی شدن استاتیک شامل دو مرحله است. در مرحله اول به منظور کاهش انرژی فصل مشترک، لایه‌های آلفای اولیه از محل مرزهای فرعی آلفا/آلفا که حین تغییر شکل ایجاد شده‌اند، تکه تکه می‌شوند. در مرحله دوم مهاجرت اتم‌های محلول از لبه‌های انتهایی هر لایه به سمت قسمت صاف آن اتفاق می‌افتد و لایه‌های آلفا به صورت تدریجی کروی می‌شوند. از آنجا که مرحله دوم در فرآیند کروی شدن استاتیک، فرآیندی کنترل شده با نفوذ است، نسبت به مرحله اول که در زمان‌های کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد، نیاز به زمان بیشتری دارد. با توجه به ماهیت وابسته به نفوذ مرحله دوم، افزایش زمان

جدول (۲) تاثیر دمای آنیل بر مشخصه‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6242.

دمای آنیل (°C)	۹۴۰	۹۵۵	۹۷۰	۹۸۵
کسر حجمی آلفای اولیه (%)	۳۴	۲۶	۱۳	۰
اندازه کولونی آلفا (μm)	۲/۹۵	۴/۱۸	۵/۰۳	۲۶۸
ضخامت آلفای ثانویه (μm)	۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۴۳
ضخامت آلفای مرزدهانه‌ای (μm)	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۷۱

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش دمای آنیل محلولی از دمای ۹۴۰ °C به ۹۸۵ °C کسر حجمی فاز آلفای اولیه کاهش یافته است. این کاهش در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۹۸۵ °C به اندازه‌ای بوده که کسر حجمی آلفای اولیه به صفر رسیده است. همچنین با افزایش دمای آنیل محلولی، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدهانه‌ای افزایش یافته است. مکانیزمی که از طریق آن تحولات ریزساختاری ذکر شده روی می‌دهد، نفوذ عناصر آلیاژی در اثر پدیده‌ای به نام جدایش عناصر آلیاژی است [۲۱]. در اثر پدیده جدایش عناصر آلیاژی، عناصر پایدارساز قوی فاز آلفا (آلومینیم) و فاز بتا (مولیبدن) به ترتیب در دو فاز آلفا و بتا جدایش می‌یابند [۲۲]. در واقع حین جدایش عناصر آلیاژی بین فازهای آلفا و بتا، بازچینش عناصر روی می‌دهد بدین ترتیب با افزایش دمای عملیات آنیل محلولی به دلیل پایداری بیشتر فاز بتا در دمای بالاتر، کسر حجمی فاز آلفای کروی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش دما، در اثر نفوذ عناصر پایدارساز فاز آلفا از آلفای اولیه به سمت بتای استحاله یافته، کسر حجمی آلفای کروی کاهش یافته است. اما از سوی دیگر نفوذ فاز آلفا در امتداد مرزدهانه‌های بتا/بتا یا آلفا/بتا به فاز بتا کاهش و ضخامت فاز آلفای ثانویه افزایش می‌یابد. دلیل عدم وجود آلفای اولیه در ریزساختار مربوط به شکل ۲-د، نزدیک بودن دمای عملیات آنیل محلولی به دمای استحاله بتا (حدود ۹۹۵ °C) است. در این دما نفوذ به حدی بالا بوده که آلفای کروی مشاهده نمی‌شود. در پژوهش‌های دیگر [۲۳ و ۲۴] نیز هنگامی که دمای عملیات آنیل محلولی آلیاژ Ti-6242 به ترتیب ۵ °C و ۶ °C پایین‌تر از دمای استحاله بتا بوده، اثری از آلفای کروی مشاهده نشده و ریزساختار حاصله سببی شکل گزارش شده است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار تغییرات استحکام و داکتیلیته

در شکل ۴ نسبت فاز آلفای کروی شده به کل فاز آلفای موجود در ریزساختار بر حسب دمای آنیل محلولی نشان داده شده است.



شکل (۴) تاثیر دمای آنیل بر کسر آلفای کروی.

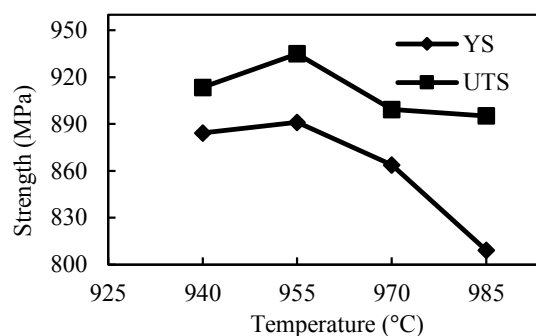
در این پژوهش دانه‌هایی با نسبت ابعادی کوچکتر از ۱/۵ به عنوان آلفای کروی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، حدود ۱۲٪ از دانه‌های آلفا به صورت دینامیک حین تغییر شکل کروی شده‌اند. با انجام عملیات حرارتی در یک زمان ثابت روی نمونه‌ی تغییر شکل یافته، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آنیل، کسر آلفای کروی افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای آنیل سبب افزایش سینتیک کروی شدن شده است. تحقیقات اخیر روی آلیاژ Ti-6Al-4V [۲۰] نیز صحت این ادعا را ثابت می‌کند.

۲- تاثیر دمای آنیل بر ریزساختار و خواص کششی

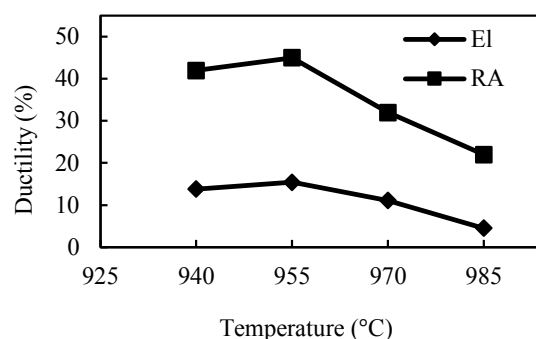
چنانچه پیش‌تر اشاره شد، پارامترهای ریزساختاری و تاثیر متقابل آن‌ها بر هم تعیین کننده خواص مکانیکی آلیاژهای تیتانیوم شبه آلفا است. از این رو در این بخش به بیان تاثیر دمای عملیات آنیل محلولی بر پارامترهای ریزساختاری و خواص کششی پرداخته می‌شود. در جدول ۲ مقادیر کسر حجمی آلفای اولیه، اندازه کولونی آلفا، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدهانه‌ای در دماهای مختلف آنیل گزارش شده است.

موازی قرار دارند، اگر لغزش در یک لایه آغاز شود، به سرعت به سایر لایه‌ها نیز منتقل خواهد شد [۲۶ و ۲۷]. از این رو هر چه اندازه کولونی آلفا کاهش یابد، طول مسیر موثر لغزش نیز کاهش یافته و استحکام بهبود خواهد یافت. از سوی دیگر بر اساس رابطه هال-پچ اندازه دانه کمتر منجر به دستیابی به استحکام و داکتیلیته بالاتر می‌شود. بررسی‌ها [۲۲] نشان داده است که ضخامت آلفای ثانویه و آلفای مرزدانه‌ای تاثیر معکوسی بر خواص کششی دارد؛ چرا که با افزایش ضخامت آن‌ها، استحکام کاهش و داکتیلیته افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که با کاهش دمای آنیل از ۹۸۵ تا ۹۵۵ °C، استحکام تسلیم، استحکام کششی و داکتیلیته افزایش یافته است. از سوی دیگر با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۲، یا کاهش دما در این بازه دمایی، کسر حجمی فاز آلفای اولیه افزایش یافته و اندازه کولونی آلفا، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدانه‌ای کاهش یافته است. بنابر مطالب بیان شده، این تغییرات ریزساختاری اثرات مثبتی بر استحکام دارد. بنابراین افزایش استحکام ناشی از کاهش دمای آنیل در این محدوده دمایی مربوط به همین تحولات ریزساختاری است. بر این اساس، علت افت شدت استحکام تسلیم در نمونه آنیل شده در دمای ۹۸۵ °C نیز به افزایش قابل ملاحظه اندازه کولونی آلفا مرتبط است. این مسئله به محدود شدن اندازه کولونی آلفا توسط فاز آلفای کروی در ریزساختار دوگانه نسبت داده می‌شود [۲۸]. به بیان دیگر در ریزساختار سبیدی شکل با توجه به عدم حضور آلفای اولیه، اندازه کولونی‌های آلفا بسیار بزرگتر است. همان‌طور که بیان شد، کاهش اندازه کولونی آلفا منجر به بهبود داکتیلیته می‌شود در حالی که کاهش ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدانه‌ای داکتیلیته را کاهش می‌دهد. بنابر نتایج بدست آمده، به نظر می‌رسد علت افزایش داکتیلیته با کاهش دمای آنیل از ۹۸۵ به ۹۵۵ °C، آن است که اثر اندازه کولونی آلفا بر داکتیلیته به اثر ضخامت لایه‌های آلفا غلبه داشته است. نتیجه جالب دیگر آن است که با کاهش دمای آنیل از دمای ۹۵۵ به ۹۴۰ °C، با وجود آنکه روند تغییرات ریزساختاری مشابه با بازه دمایی ۹۸۵ تا ۹۵۵ °C است، اما خواص کششی افت کرده است. بنابراین علت کاهش خواص کششی در دمای ۹۴۰ °C به پارامترهای ریزساختاری مذکور مرتبط نیست. در

آلیاژ Ti-6242 را بر حسب دمای آنیل نشان می‌دهند.

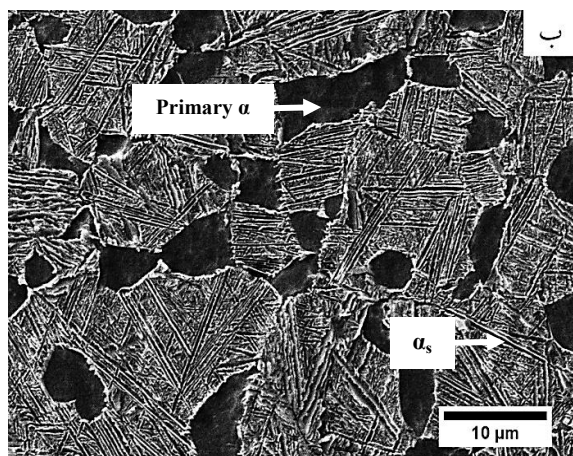
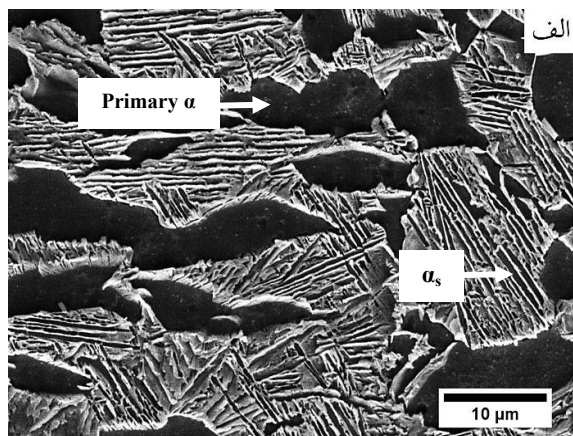


شکل (۵) تاثیر دمای آنیل بر استحکام آلیاژ Ti-6242.



نمودار (۶) تاثیر دمای آنیل بر داکتیلیته آلیاژ Ti-6242.

پارامترهای ریزساختاری که خواص مکانیکی را کنترل می‌کند، شامل کسر حجمی آلفای اولیه، اندازه کولونی آلفا، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و آلفای مرزدانه‌ای است [۲۲]. در واقع خواص کششی منتج از ترکیب عوامل نامبرده بوده و ترکیب آن پارامترها است که ارتباط بین خواص و ریزساختار را تعیین می‌کند. مکانیزم کنترل‌کننده خواص کششی در آلیاژ Ti-6242، لغزش در فاز آلفا گزارش شده است [۲۱]. چرا که فاز آلفا با ساختار کریستالی هگزاگونال فشرده، نسبت به فاز بتا با ساختار کریستالی مکعب مرکزپر سیستم‌های لغزش بسیار محدودتری دارد [۲۵]. بنابراین با افزایش کسر حجمی فاز آلفای اولیه میزان لغزش کاهش یافته و خواص کششی بهبود می‌یابد. اما در داخل یک کولونی آلفا با توجه به اینکه لایه‌های آلفا-بتا به صورت



شکل (۷) ریزساختار حاصل از عملیات آنیل در دمای ۹۵۵°C و سرمایش در الف) هوا و ب) روغن پس از پیرسازی در دمای ۶۰۰°C.

جدول (۳) تاثیر محیط سرمایش پس از آنیل بر مشخصه‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6242.

محیط سرمایش پس از آنیل (°C)	هوا	روغن
کسر حجمی آلفای اولیه (%)	۲۶	۲۴
اندازه کولونی آلفا (μm)	۴/۱۸	۴/۳
ضخامت آلفای ثانویه (μm)	۰/۲۴	۰/۱۱
ضخامت آلفای مرزدانه‌ای (μm)	۰/۳۱	۰/۲۹

هنگامی که نرخ سرمایش بالاتر باشد، فرصت برای رشد فاز آلفای ثانویه کاهش می‌یابد؛ چراکه ضخیم شدن فاز آلفای ثانویه فرآیندی وابسته به نفوذ است و با افزایش سرعت سرمایش پس از آنیل، فرصت نفوذ کاهش می‌یابد. بنابراین با تغییر محیط

پژوهشی دیگر نیز [۴] این پدیده مشاهده شده است. علت این پدیده به اثر جدایش عناصر آلیاژی نسبت داده می‌شود. اثر جدایش عناصر آلیاژی منجر به کاهش استحکام منطقه لایه‌ای در ریزساختار دوگانه می‌شود. در ریزساختار دوگانه عنصر پایدار ساز آلفا (آلومینیم) در دو فاز آلفای اولیه و بتای استحاله یافته (لایه‌های آلفا-بتا) جدایش می‌یابد. به نحوی که مقدار آن در فاز آلفای اولیه بیشتر است [۲۹]. بنابراین میان غلظت آلومینیم در فاز آلفای اولیه و بتای استحاله یافته، اختلافی وجود دارد. اما در مجموع مقدار عنصر آلومینیم در ترکیب آلیاژ ثابت است. با افزایش کسر حجمی فاز آلفای اولیه (۳۴٪ در دمای ۹۴۰ °C)، مقدار بیشتری از عنصر آلومینیم به داخل فاز آلفای اولیه جهت پایداری بیشتر این فاز جدایش می‌یابد. بدین ترتیب مقدار آلومینیم در بتای استحاله یافته کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. عملیات پیرسازی، ذرات استحکام‌بخش Ti_3Al رسوب می‌کنند. بنابراین در اثر جدایش عناصر آلیاژی، مقدار بسیار کمتری از این فاز استحکام‌بخش در منطقه بتای استحاله یافته رسوب خواهد کرد. از این رو استحکام این قسمت به شدت کاهش یافته و منجر به افت قابل ملاحظه خواص کششی می‌شود.

۳- اثر محیط سرمایش پس از آنیل بر ریزساختار و خواص کششی

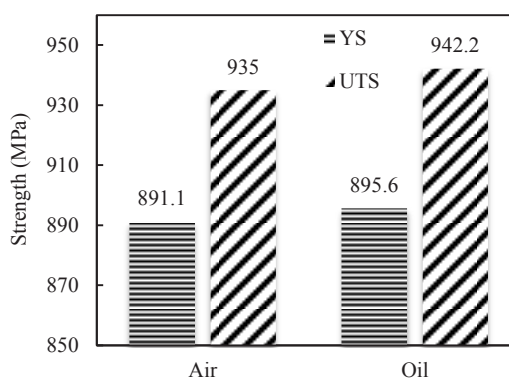
شکل ۷ تاثیر محیط سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی را بر ریزساختار آلیاژ Ti-6242 پس از پیرسازی در دمای ۶۰۰ °C نشان می‌دهد.

در جدول ۳ مقادیر کسر حجمی آلفای اولیه، اندازه کولونی آلفا، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و مرزدانه‌ای در نمونه‌هایی که محیط سرمایش آن‌ها پس از آنیل محلولی متفاوت بوده، گزارش شده است. با مقایسه مقادیر ارائه شده در جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ سرمایش، کسر حجمی آلفای اولیه به مقدار اندکی کاهش یافته و این مسئله منجر به افزایش اندک اندازه کولونی آلفا شده است. همچنین مشاهده می‌شود که تنها تغییر اساسی و مهمی که در ریزساختار این آلیاژ رخ داده کاهش شدید ضخامت آلفای ثانویه بوده است.

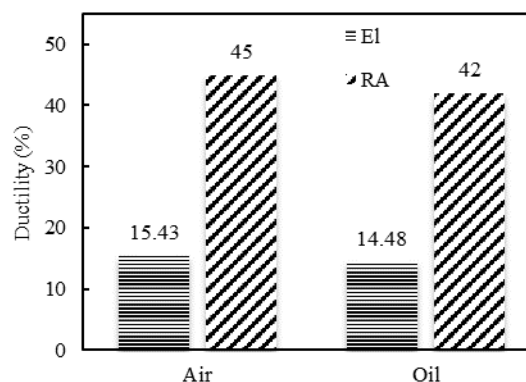
۴- اثر دمای پیرسازی بر ریزساختار و خواص کششی

شکل ۱۰ ریزساختار SEM آلیاژ Ti-6242 را پس از آنیل محلولی به مدت یک ساعت در دمای 955°C ، سرمایش در هوا و پس از آن پیرسازی به مدت ۸ ساعت در سه دمای 570°C ، 600°C و 630°C نشان می‌دهد. فاز رسوبی Ti_3Al از عوامل استحکام‌بخش در آلیاژ Ti-6242 است. با توجه به مراجع مختلف [۳۰-۳۲] اندازه این ذرات رسوبی در حد نانومتر بوده لذا در تصاویر SEM موجود در شکل ۱۰ امکان نمایش آن‌ها وجود ندارد. نحوه رسوب‌گذاری این فاز توسط عملیات پیرسازی کنترل می‌شود. دمای پیرسازی عامل مهمی در کنترل سرعت رشد، اندازه و توزیع فاز رسوبی Ti_3Al است. بنابراین به هر آلیاژ تیتانیم شبه‌آلفا یک دمای پیرسازی مناسب نسبت داده می‌شود. از آن‌جا که دمای انحلال ذرات Ti_3Al در آلیاژ Ti-6242 650°C است، دمای مناسب برای این عملیات حدود 600°C ذکر شده است [۳۳ و ۳۴]. هنگامی که پیرسازی در دمای مناسب انجام شود، رسوب‌گذاری فاز منظم Ti_3Al به صورت همگن هم در مرزخانه‌ها و هم در داخل زمینه اتفاق می‌افتد. با کاهش دمای پیرسازی از این دمای مناسب، رسوب‌گذاری فاز منظم Ti_3Al به صورت یکنواخت و تنها در زمینه انجام می‌شود. این در حالی است که با افزایش دمای پیرسازی، رسوب‌گذاری فاز Ti_3Al تنها در مرزخانه‌ها و نابجایی‌ها اتفاق می‌افتد [۳۵]. بنابراین در یک دمای مشخص مناسب‌ترین نحوه رسوب‌گذاری این فاز روی می‌دهد. مقادیر کسر حجمی آلفای اولیه، ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه مرزخانه‌ای و اندازه کولونی آلفای این آلیاژ پس از پیرسازی در دماهای مختلف در جدول ۴ گزارش شده است. با توجه به جدول ۴، با افزایش دمای پیرسازی کسر حجمی آلفای اولیه تغییر چندانی نداشته اما اندازه کولونی آلفا و ضخامت لایه‌های آلفای مرزخانه‌ای و آلفای ثانویه افزایش یافته است. ضخامت لایه‌های آلفای مرزخانه‌ای و ثانویه در نمونه پیرسازی شده در دمای 630°C ، نسبت به دو دمای 570°C و 600°C افزایش چشمگیری داشته است.

سرمایش از هوا به روغن انتظار می‌رود که ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه کاهش یابد. تاثیر تغییر محیط سرمایش پس از آنیل محلولی در دمای 955°C بر استحکام و داکتیلیته آلیاژ Ti-6242 به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل (۸) تاثیر محیط سرمایش پس از آنیل بر استحکام آلیاژ Ti-6242.

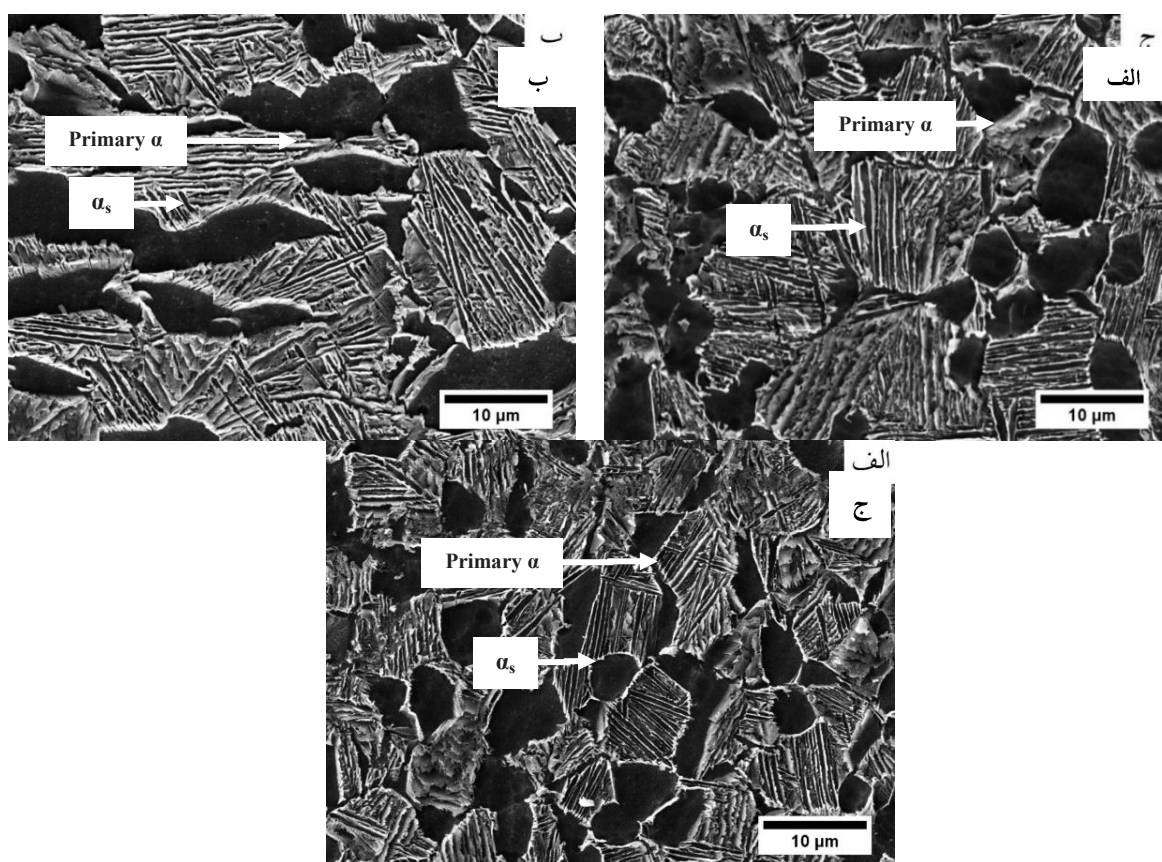


شکل (۹) تاثیر محیط سرمایش پس از آنیل بر داکتیلیته آلیاژ Ti-6242.

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌شود که استحکام تسلیم و استحکام کششی آلیاژ Ti-6242 با افزایش نرخ سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی افزایش یافته و این در حالی است که داکتیلیته این آلیاژ در این شرایط دچار افت شده است. علت این پدیده را می‌توان به تنها تفاوت ریزساختاری قابل‌ملاحظه در این دو ریزساختار نسبت داد چراکه با افزایش ضخامت آلفای ثانویه انعطاف‌پذیری آلیاژ افزایش و استحکام آن افت خواهد کرد.

جدول ۴- تاثیر دمای پیرسازی بر مشخصه‌های ریزساختاری آلیاژ Ti-6242.

۶۳۰	۶۰۰	۵۷۰	دمای پیرسازی (°C)
۲۷	۲۶	۲۴	کسر حجمی آلفای اولیه (%)
۵/۸	۴/۱۸	۳/۹۴	اندازه کولونی آلفا (μm)
۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۲۳	ضخامت آلفای مرزدانه‌ای (μm)
۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۱	ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه (μm)



شکل (۱۰) ریزساختار حاصل از آنیل در دمای ۹۵۵°C و پس از آن پیرسازی در دماهای الف) ۵۷۰°C، ب) ۶۰۰°C و ج) ۶۳۰°C.

استحکام بخش Ti_3Al نسبت داد. همچنین استحکام نمونه پیرسازی شده در دمای ۶۳۰°C نسبت به دو دمای پیرسازی دیگر به شدت کاهش یافته است. دلیل کاهش شدید استحکام در این نمونه، آلفای مرزدانه‌ای ضخیم‌تر و کولونی آلفای درشت‌تر است.

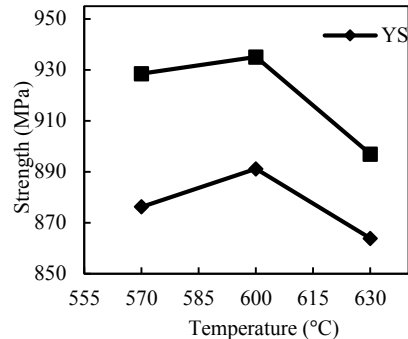
مقادیر استحکام کششی و استحکام تسلیم و همچنین مقادیر کاهش سطح مقطع و درصد ازدیاد طول آلیاژ Ti-6242 پس از پیرسازی در سه دمای مختلف به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ گزارش شده‌اند. با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که خواص کششی این آلیاژ با پیرسازی در دمای ۶۰۰°C بیشینه است. بیشینه بودن استحکام در نمونه پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر و با اندازه مناسب‌تر فاز

است.

۲. با افزایش دمای آنیل محلولی کسر حجمی آلفای اولیه کاهش و اندازه کولونی آلفا، ضخامت آلفای ثانویه و آلفای مرزانه‌ای افزایش یافته است.

۳. با افزایش نرخ سرمایش پس از عملیات آنیل محلولی، ضخامت آلفای ثانویه کاهش یافته که منجر به افزایش استحکام کششی و کاهش داکتیلیته شده است.

۴. مناسب‌ترین خواص کششی توسط آنیل در دمای 955°C سرمایش در هوا و پیرسازی در دمای 600°C حاصل شد.



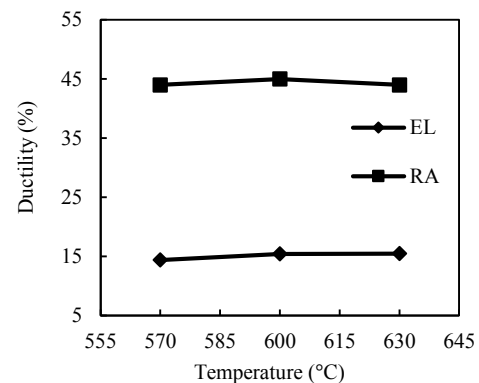
شکل (۱۱) تاثیر دمای پیرسازی بر استحکام آلیاژ Ti-6242

پی‌نوشت‌ها

- 1 STA: Solution Treatment And Aging
- 2 Duplex Microstructure
- 3 Lamellar Microstructure
- 4 Equiaxed Microstructure

منابع و مراجع

- [1] W.Chen and C.Boehlert, "The 455°C tensile and fatigue behavior of boron-modified Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (wt.%)", International Journal of Fatigue, vol. 32, pp. 799-807, 2010.
- [2] M.J.Donachie, Titanium: a technical guide: ASM international, 2000.
- [3] I.Polmear and D.S.John, Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [4] G.Lütjering and J. C.Williams, Titanium vol. 2: Springer, 2003.
- [5] G.Welsch, R.Boyer, and E.Collings, Materials properties handbook: titanium alloys: ASM international, 1993.
- [6] W.Evans, "Optimising mechanical properties in alpha+ beta titanium alloys," Materials Science and Engineering: A, vol. 243, pp. 89-96, 1998.
- [7] J.Burger and D.Hanink, "Heat Treating Titanium and its Alloys," Met Prog, vol. 71, pp. 70-75, 1967.
- [8] C.Leyens and M.Peters, Titanium and titanium alloys: Wiley Online Library, 2003.
- [9] G.Lütjering, J.Williams, and A.Gysler, "Microstructure and mechanical properties of titanium alloys," Microstructure and Properties of Materials, vol. 2, pp. 1-74, 2000.
- [10] T.Ahmed and H.Rack, "Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys," Materials Science and Engineering: A, vol. 243, pp. 206-211, 1998.
- [11] J.Wood, P.Russo, M.Welter, and E.Crist, "Thermomechanical processing and heat treatment of



شکل (۱۲) تاثیر دمای پیرسازی بر داکتیلیته Ti-6242

با مشاهده شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که افزایش دمای پیرسازی تاثیری بر میزان داکتیلیته این آلیاژ نداشته است. علت این مسئله را می‌توان به تقابل اثر مثبت افزایش ضخامت لایه‌های آلفای ثانویه و اثر منفی افزایش اندازه کولونی آلفا بر داکتیلیته نسبت داد.

نتیجه‌گیری

بررسی تاثیر دمای عملیات آنیل محلولی و محیط سرمایش پس از آن و دمای پیرسازی بر ریزساختار و خواص کششی آلیاژ Ti-6242 نشان داد که،

۱. در اثر عملیات آنیل محلولی فاز آلفای کشیده حاصل از نورد گرم ثانویه بواسطه پدیده کروی شدن استاتیک کروی شده

- Nonferrous Metals Society of China, vol. 24, pp. 682-689, 2014.
- [23] K.Thiehsen, "The effect of primary alpha, nickel, and chromium on the creep properties of Ti 6242Si," 1993.
- [24] M. Es-Souni, "Primary, secondary and anelastic creep of a high temperature near α -Ti alloy Ti6242Si," *Materials Characterization*, vol. 45, pp. 153-164, 2000.
- [25] M.Motyka, K.Kubiak, J.Sieniawski, and W.Ziaja, "Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys," *Titanium Alloys-Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*, pp. 88-116, 2012.
- [26] L.Zeng, Y.Zhao, Q.Hong, and Y.Qi, "Creep behavior of Ti-600 alloy solutioned at β and $\alpha+\beta$ region."
- [27] R.Wanhill and S.Barter, *Fatigue of beta processed and beta heat-treated titanium alloys*: Springer Science & Business Media, 2011.
- [28] E.Lee, "Microstructure evolution and microstructure/mechanical properties relationships in $\alpha+\beta$ titanium alloys," *The Ohio State University*, 2004.
- [29] S.L.Semiatin, T.M.Lehner, J.D.Miller, R.D.Doherty, and D.U.Furrer, "Alpha/Beta Heat Treatment of a Titanium Alloy with a Nonuniform Microstructure," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 38, pp. 910-921, 2007.
- [30] J.Zhang, N.Peng, Q.Wang, and X.Wang, "A New Aging Treatment Way for Near alpha High Temperature Titanium Alloys," 2009.
- [31] W.Jia, W.Zeng, and H.Yu, "Effect of aging on the tensile properties and microstructures of a near-alpha titanium alloy," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 108-115, 2014.
- [32] S.Zhang, H.Xu, G.Li, Y.Liu, and R. Yang, "Effect of carbon and aging treatment on precipitation of ordered α_2 in Ti-5.6 Al-4.8 Sn-2Zr-1Mo-0.35 Si-0.7 Nd alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 408, pp. 290-296, 2005.
- [33] G.Welsch, R.Boyer, and E.W.Collings, *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*: ASM International, 1993.
- [34] G.Lütjering and J.C.Williams, *Titanium*: Springer, 2007.
- [35] J.Zhang, Q.Wang, Y.Liu, L.Li, and D. Li, "Optimal Selection and Control for Precipitation of α_2 Phase in Near α High Temperature Ti Alloys during Aging Treatment," vol. 20, 2004.
- Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-Si for structural applications," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 243, pp. 109-118, 1998.
- [12] F.Warchomicka, "Effect of heat treatments on the microstructure of deformed Ti-6Al-4V," 2010.
- [13] T.Wang, H.Guo, Y.Wang, X.Peng, Y.Zhao, and Z.Yao, "The effect of microstructure on tensile properties, deformation mechanisms and fracture models of TG6 high temperature titanium alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 2370-2379, 2011.
- [14] Y.Y.Fu, S.X.Hui, W.J.Ye, and X.J.Mi, "Influence of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Property of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Fe Alloy," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 1003-1006.
- [15] I.Balasundar, T.Raghu, and B.P.Kashyap, "Hot working and geometric dynamic recrystallisation behaviour of a near- α titanium alloy with acicular microstructure," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 600, pp. 135-144, 2014.
- [16] Z.Du, S.Xiao, J.Liu, S.Lv, L.Xu, F.Kong, et al., "Hot Deformation Behavior of Ti-3.5 Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0.5 Fe Alloy in $\alpha+\beta$ Field," *Metals*, vol. 5, pp. 216-227, 2015.
- [17] J.Y.Kim, K.-T.Park, I.O.Shim, and S.H.Hong, "Globularization behavior of ELI grade Ti-6Al-4V alloy during nonisothermal multi-step forging," *Materials transactions*, vol. 49, pp. 215-223, 2008.
- [18] S.L.Semiatin, V.Seetharaman, and I.Weiss, "The thermomechanical processing of alpha/beta titanium alloys," *JOM*, vol. 49, pp. 33-39, 1997.
- [19] C.H.Park, J.W.Won, J.-W.Park, S.Semiatin, and C.S.Lee, "Mechanisms and kinetics of static spheroidization of hot-worked Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1 Si with a lamellar microstructure," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, pp. 977-985, 2012.
- [20] S.Zherebtsov, M.Murzinova, G.Salishchev, and S.Semiatin, "Spheroidization of the lamellar microstructure in Ti-6Al-4V alloy during warm deformation and annealing," *Acta Materialia*, vol. 59, pp. 4138-4150, 2011.
- [21] K.Prasad, R.Sarkar, P.Ghosal, D.Satyanarayana, S.Kamat, and T.Nandy, "Tensile and creep properties of thermomechanically processed boron modified Timetal 834 titanium alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 6733-6741, 2011.
- [22] X.-n.Peng, H.-z.Guo, Z.-f.Shi, Q.Chun, and Z.-l.Zhao, "Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment," *Transactions of*