

بررسی تغییرات ریزساختاری آلیاژ $Ti-6Al-4V$ کار گرم شده بعد از انجام فرایند آنیلینگ

خسرو فرمنش

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان - شاهین شهر

چکیده

در میان تمام آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژ دو فازی $Ti-6Al-4V$ به دلیل خواص بهینه مکانیکی و مقاومت به خوردگی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل استحکام بالای آلیاژهای تیتانیوم، اکثر قطعات تیتانیوم مورد استفاده در صنایع هوافضا از روش‌های شکل‌دهی گرم تهیه می‌شوند. خواص محصول نهایی وابستگی شدیدی به ریز ساختار نهایی دارد. در این تحقیق با انجام سیکل‌های متفاوت گرم کردن، فشار گرم و آنیل نهایی تاثیر کار گرم روی تحولات ریزساختاری بعد از انجام عملیات آنیلینگ مورد مطالعه قرار گرفت. با انجام آزمایشات متالوگرافی، تغییرات ریز ساختاری قبل از آزمایش‌های فشار گرم و ریز ساختار نهایی بعد از انجام فرآیند باز پخت نمونه‌های تغییر شکل یافته، مورد بررسی قرار گرفت. گستره وسیعی از ریزساختارهای غیر تعادلی همانند ساختارهای حصیری، کروی و یا سوزنی، بدلیل اعمال کار گرم روی نمونه‌ها مشاهده شد، که افزایش استحکام دمای بالا و بهبود خواص خستگی آلیاژ را بدنبال دارند.

واژه‌های کلیدی

تیتانیوم، آلیاژ $Ti-6Al-4V$ ، کار گرم، فرایند آنیل، متالوگرافی

چقرمگی آلیاژ می‌شوند [۲].

۱- مقدمه

اگر آلیاژ $Ti-6Al-4V$ از منطقه β ، به آهستگی سرد شود، فاز α به صورت مکانیزم هسته گذاری و رشد به وجود می‌آید. شکل فاز α به وجود آمده به صورت صفحه‌ای بوده که صفحات قاعده فاز α شش گوش متراکم با صفحاتی از کریستال مکعبی مرکزدار فاز β ، تطابق کریستالوگرافی دارد. روابط برگرد $\{110\}_\beta || \{0001\}_\alpha$ و $\langle 111 \rangle_\beta || \langle 1120 \rangle_\alpha$ در اینجا برقرار است. فاز α از صفحات β (۰۱۱)، هسته گذاری خود را شروع می‌کند. سرعت رشد فاز α در جهات موازی با صفحه β (۰۱۱) بسیار سریعتر از جهات عمود بر آن بوده و بطور کلی در این استحاله جهات ترجیحی وجود ندارد. دوازده متغیر کریستالوگرافی طبق روابط بالا وجود دارند که باعث می‌شود

تیتانیوم خالص عنصری چند شکلی است. در دمای پایین دارای ساختار شش گوش تنگ پکیده است (فاز α) و بالاتر از دمای استحاله، ساختار آن به مکعب مرکز دار (فاز β) تغییر می‌کند. اضافه کردن عناصر آلیاژی گستره پایداری این دو فاز را تغییر می‌دهد [۱]. آلیاژ دو فازی $Ti-6Al-4V$ در دمای بالا دارای ریز ساختار β بوده که در حین سرد شدن در یک دمای خاص، استحاله $\alpha + \beta \rightarrow$ انجام می‌شود. در آلیاژ $Ti-6Al-4V$ ، با توجه به تاریخچه آن (دمای تغییر فرم، مقدار کرنش اعمالی، دما و زمان آنیلینگ و سرعت سرد شدن) گستره وسیعی از ریز ساختار قابل دستیابی است. چیده مان متفاوت فاز α و فاز β در کنار یکدیگر، باعث تغییر خواص استحکامی، خزشی، خستگی و

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد استفاده (wt%)

Ti	H	O	Zr	Mo	Fe	V	Al
بقیه	۰/۰۰۵	۰/۲	<۰/۱	۰/۵	۰/۱۲	۳/۸۸	۵/۵۵

جدول (۲): مشخصات آزمایش فشار گرم

آهنک کرنش واقعی (s^{-1})	دمای تغییر فرم گرم ($^{\circ}C$)				
۰/۱	۱۰۵۰	۱۰۰۰	۹۵۰	۹۰۰	۸۵۰
۰/۰۱	۱۰۵۰	۱۰۰۰	۹۵۰	۹۰۰	۸۵۰
۰/۰۰۱	۱۰۵۰	۱۰۰۰	۹۵۰	۱۹۰۰	۸۵۰

ریز ساختار به تک فاز β ، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه تا دمای $1050^{\circ}C$ گرم شده و سپس ۱۰ دقیقه در این دما نگهداری گردید. در مرحله دوم دمای نمونه به مدت ۱ تا ۲ دقیقه به دمای آزمایش رسانده شد و آزمایش فشار گرم در دمای ثابت تعیین شده، تا کرنش ۰/۵۵ انجام گردید [۷]. برای بررسی تاثیر فرایند آنیلینگ روی فازهای موجود، نمونه‌های تغییر شکل گرم یافته با سرعت $1/75^{\circ}C/s$ تا دمای $980^{\circ}C$ گرم شده و به مدت ۱۲۰ دقیقه در همین دما در محیط گاز آرگون آنیل شدند. جدول شماره (۲) سیکل تغییر فرم اعمال شده را نشان می‌دهد.

بررسی تحولات ریز ساختاری نمونه‌های تغییر شکل یافته و نمونه‌های تغییر شکل یافته و آنیل شده، توسط آزمایش‌های متالوگرافی انجام شد. برای برش نمونه‌ها در جهت موازی و عمود بر محور فشار از دیسک الماسه با پوشش نیتريد برون مکعبی بدون اعمال فشار، استفاده شد. برخی از نمونه‌ها مانت سرد و برخی مانت گرم شدند، برای مانت گرم نمونه‌ها از دمای پایین $150^{\circ}C$ استفاده شد. جهت پولیش ابتدایی از ورق سمباده از جنس کاربید سلیسیوم با دانه بندی ۸۰ و ۱۲۰ و ۴۰۰ و ۶۰۰ استفاده شد. جهت روانکاری از روغن‌های روانکار عاری از آب استفاده شد. جهت پولیش نهایی از صفحات پولیش بابافت مناسب و مخلوط ذرات معلق در الکل پودر ($\alpha - Al_2O_3$) کروی با اندازه ذرات ۱، ۵، ۹، ۳، ۰/۳ و ۰/۰۵ میکرون استفاده شد. در انتها نمونه‌ها جهت بررسی ریز ساختاری با محلول کروم (10% H_2O , 2% HNO_3 , 88% HF) اچ گردید و توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

صفحات α در جهات مختلف در درون دانه‌های β اولیه رشد کنند و در نهایت با یکدیگر برخورد کرده و مرز دانه با زاویه زیاد را بوجود آورند. در هنگام فرایند آنیلینگ این ریز ساختار لایه لایه ای، درشت تر میشود. [۳].

ابزاری قوی برای کنترل ریز ساختار نهایی، انجام سیکل‌های کار گرم و آنیل می‌باشد [۴]. در تحقیق حاضر با اعمال سیکل کار گرم و آنیل تغییرات ریز ساختار نهایی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت دمای استحاله، با انجام آزمایشات دیلاتومتری دماهای استحاله تعیین شد [۵] و فازهای بوجود آمده توسط آزمایش‌های تفرق اشعه ایکس مورد ارزیابی قرار گرفت [۶].

۲- روش تحقیق

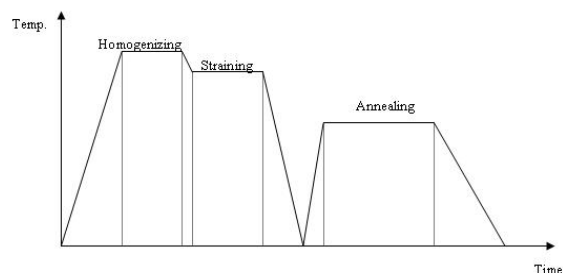
در این تحقیق از آلیاژ Ti-6Al-4V برای انجام آزمایش‌های فشار گرم و سیکل‌های عملیات حرارتی استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) نشان داده شده است.

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایشات، به صورت استاندارد تهیه شدند [۷]. نمونه‌های استوانه‌ای جهت آزمایش‌های فشار گرم و عملیات حرارتی، توسط فرایند ماشینکاری تهیه شدند. فرآیند اعمال شده روی این آلیاژ، به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. جهت بررسی تاثیر فرآیند تغییر فرم گرم و آنیل نهایی به صورت زیر عمل شد. در مرحله اول به منظور همگن سازی و تبدیل تمامی

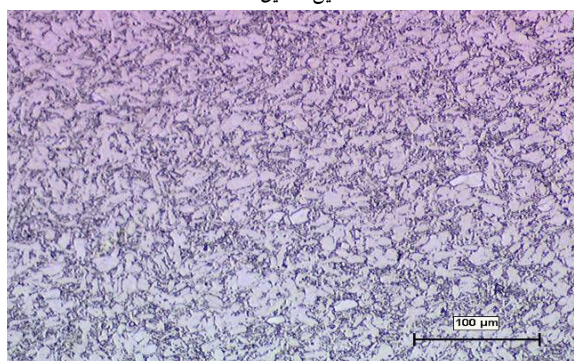
تحت آزمایش‌های تفرق اشعه ایکس قرار گرفتند.

۳- نتایج و مباحث

دمای استحاله تبدیل ساختار دو فازی ($\alpha+\beta$) به ساختار میکروسکوپی تک فاز β در این آلیاژ با انجام یک رشته آزمایشات دیلاتومتر، 992°C تعیین شد [۵]. با انجام آزمایشات فشار گرم دمای شروع استحاله تحت اعمال تنش، 1010°C تعیین شد [۷]. شکل (۲) ریز ساختار اولیه ماده، قبل از آزمایش و در دمای اتاق را نشان می‌دهد. در این شکل فاز β استحاله یافته ریز (فاز خاکستری) در زمینه فاز α (فاز روشن) دیده می‌شود. برای بررسی تاثیر آنیلینگ بر ریز ساختار اولیه، یک نمونه بدون اعمال تغییر شکل آنیل شد. شکل (۳) ریز ساختار حاصل را نشان می‌دهد. این ریز ساختار شامل دانه‌هایی با ساختار نامطلوب لایه‌ای درشت ($\alpha+\beta$) و فاز α که به صورت پیوسته مرز دانه‌ها را پوشانده است، بوده که از استحکام پایین و مقاومت شکست پایینی برخوردار است [۸]. شکل (۴) ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته با آهنگ کرنش $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ در دمای 1000°C ، تحت کرنش 0.5 و باز پخت شده در دمای 980°C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر گاز خنثی را نشان می‌دهد. انجام کار گرم باعث حذف مرز دانه‌های β به عنوان نقاط مناسب برای جوانه زنی شده است. با افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، موقعیت‌های مناسب دیگری برای جوانه زنی در درون دانه‌ها به وجود آمده است. در اینجا هسته‌گذاری غیر همگن فاز α نیز مشاهده می‌شود. با اعمال تغییر شکل در فاز α ساختار داخلی آن دچار اعوجاج می‌شود و ارتباط خاص کریستالوگرافی در هنگام رشد، بین فاز α و فاز β در زمینه دیده نمی‌شود و دیگر فازهای ($\alpha+\beta$) به صورت لایه‌ای در کنار یکدیگر رشد نکرده‌اند. محصولات ناشی از استحاله $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ در حین بازپخت، دیگر به صورت لایه‌ای و پیوسته نیست و همچنین برخی از لایه‌های فاز α که به صورت غیر تعادلی و در حین تغییر شکل بوجود آمده‌اند حین بازپخت، درشت‌تر می‌شوند، ولی برخی لایه‌های ظریف‌تر به سمت خرد



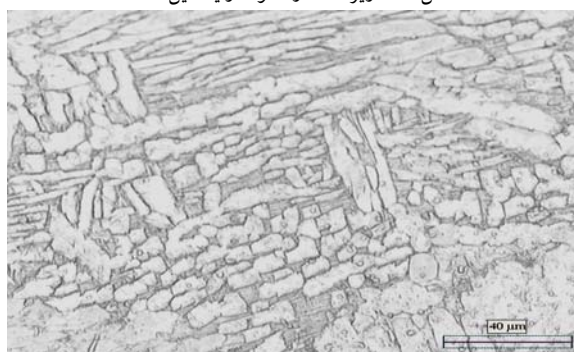
شکل (۱): سیکل شماتیک فرآیند اعمال شده روی آلیاژ Ti-6Al-4V در این تحقیق.



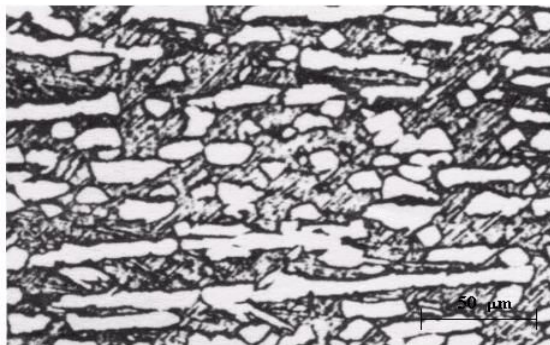
شکل (۲): ریز ساختار نمونه اولیه.



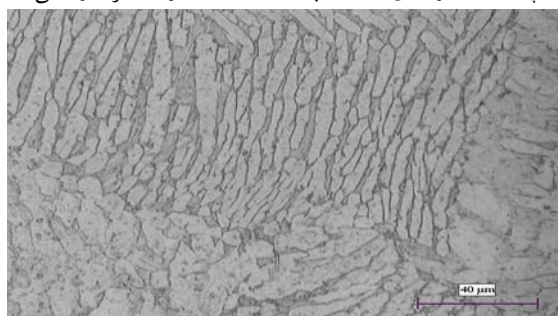
شکل (۳): ریز ساختار نمونه اولیه آنیل شده



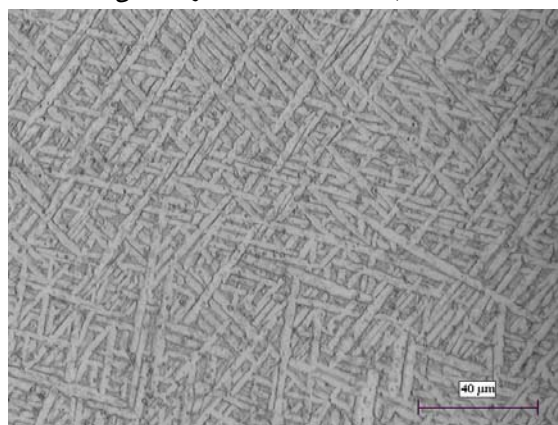
شکل (۴): ریز ساختار پس از باز پخت نمونه تغییر شکل یافته با آهنگ کرنش $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ در دمای 1000°C و باز پخت در دمای 980°C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر گاز خنثی



شکل (۵): ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته در دمای 950°C و سپس باز پخت شده در دمای 980°C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر گاز خنثی



شکل (۶): ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته تا حد کرنش ۰/۵۵ در دمای ثابت 900°C و آهنگ کرنش $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ، پس از باز پخت در دمای 980°C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر گاز خنثی.



شکل (۷): ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته تا حد کرنش ۰/۵۵ در دمای ثابت 1000°C و آهنگ کرنش $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، پس از باز پخت در دمای 980°C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر گاز خنثی.

استحکام خستگی پایینی برخوردار است، به وجود می‌آید [۱۱ و ۱۰].

شدن پیش می‌روند.

ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته در دمای 950°C و سپس باز پخت شده در دمای 980°C برای ۲ ساعت، در شکل (۵) نشان داده شده است. کاملاً پدیده کروی شدن فاز α در زمینه‌ای از فاز β استحاله یافته ریز دیده می‌شود. وایس، شکسته شدن لایه‌های α در حین باز پخت را بدلیل تفاوت انرژی سطحی بین سطوح تماس α/α و β/α می‌داند. در حین تغییر فرم در دمای بالا، آهنگ کار سختی در فاز α با ساختار HCP زیاد است و چگالی نابه‌جایی‌ها به سرعت افزایش می‌یابد، ولی از طرف دیگر به دلیل دمای بالا، شدت نفوذ نیز زیاد است و با مرتب شدن نابه‌جایی‌ها و تشکیل مرزهایی با زاویه کم و مرزهای فرعی، انرژی ماده کاهش می‌یابد. حتی با تشکیل مرزهای فرعی در لایه‌های α به دلیل وقوع تجمع برشی در لایه‌های α ، که دارای سیستم‌های لغزشی محدودی است انرژی این لایه‌ها باز هم زیاد است. در هنگام بازپخت، فاز β در موقعیت‌هایی در لایه‌ها که تمرکز سیلان وجود دارد، بداخل لایه‌های α نفوذ می‌کند [۹].

شکل (۶) ریز ساختار نمونه تغییر شکل یافته تا حد کرنش ۰/۵۵ در دمای ثابت 900°C و آهنگ کرنش $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ، را بعد از باز پخت نشان می‌دهد. به دلیل انرژی کم، ساختار به صورت لایه‌ای است و دیگر کروی شدن مشاهده نمی‌شود. ریز ساختار نمونه‌ای که ابتدا در دمای 1050°C به مدت ۱۰ دقیقه همگن شده و سپس در دمای 1000°C با آهنگ کرنش $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ به اندازه کرنش ۰/۵ تغییر شکل یافته و سپس فوق تبرید شده است، در شکل (۷) دیده می‌شود. با توجه به شکل، استحاله $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ انجام شده است. ولی در اینجا نقش مرز دانه به عنوان نقاط شروع استحاله، بعد از باز پخت حذف نشده و لایه‌ها از روی مرز دانه‌های β اولیه، به داخل دانه‌ها پیشرفت کرده‌اند. در اینجا دیگر مرز دانه‌ها فرصت تطابق با تغییر شکل اعمالی را نداشته و دچار اعوجاج زیادی می‌شوند و به صورت نقاطی که انرژی آنها هنوز هم برای هسته‌گذاری مناسب هستند، باقی می‌مانند و ریز ساختار حصیری که از استحکام و مقاومت شکست خوب و

۴- نتیجه گیری

در ریز ساختار نمونه‌های تغییر شکل یافته و آبل شده روابط کریستالوگرافی حاکم بر رشد فازها مشاهده نمی‌شود و انجام کار گرم باعث حذف مرز دانه به عنوان نقاط ترجیحی جوانه زنی فازها در حین عملیات باز پخت می‌شود، که خواص متفاوتی را به وجود می‌آورد.

۵- مراجع

- [۷] حراتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی، اصفهان، ۱۳۸۳، ۷۰-۶۱
فرمنش خسرو، نجفی زاده عباس، "تحولات ریز ساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V در حین تغییر شکل گرم"، مجله استقلال، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۲۳، شماره ۱، شهریور ۱۳۸۳، ۲۰۲-۱۸۹
- [۸] فرمنش خسرو، نجفی زاده عباس، "تحولات ریز ساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V در حین تغییر فرم داغ"، اولین کنفرانس شکل دهی فلزات و مواد 81 Matform، تهران، ۱۳۸۱، 263-271
- [۹] Chen C.C. and Coyne J.E., "Deformation Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy under Isothermal Forging Conditions", *Metal. Trans. A*, 1976, Vol. 7A, Dec., pp. 1931-1941
- [۱۰] Weiss I., Froes F.H., Eylon D. and welsch G.E., "Modification of Alpha Morphology in Ti-6Al-4V by Thermomechanical Processing", *Metal. Trans. A*, 1986, Vol. 17A, Nov., pp. 1935-1947.
- [۱۱] Ahmed T. and Rack H.J., "Phase Transformations during Cooling in ($\alpha+\beta$) Titanium Alloys", *Mat. Sci. and Eng.*, 1998, Vol. A243, p.206.
- [۱] Donachie Jr. M. J., *Titanium- A Technical Guide*, Second Edition, ASM, 2000.
- [۲] Evans W.J., "Optimizing Mechanical Properties in Alpha + Beta Titanium Alloys", *Mat. Sci. and Eng.*, 1998, Vol. A243, pp. 89-96
- [۳] Fujii H., "Strengthening of $\alpha+\beta$ Titanium Alloys by Thermo mechanical Processing", *Mat. Sci. and Eng.*, 1998, Vol. A243, pp. 103-108.
- [۴] Weiss I. and Semiatin S.L., "Thermomechanical Processing of Alpha Titanium Alloys-An Overview", *Mat. Sci. and Eng.*, 1999, Vol. A263, pp. 243-256
- [۵] فرمنش خسرو، نجفی زاده عباس، "بررسی تغییرات فازی در آلیاژ Ti-6Al-4V در حین سرد کردن توسط آزمایش‌های دیلاتومتری"، هشتمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، اصفهان، ۱۳۸۳، ۴۸-۴۱
- [۶] فرمنش خسرو، نجفی زاده عباس، مسچیان محمد رضا، "بررسی تاثیر عملیات ترمو مکانیکی بر روی استحاله آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از تفرق اشعه ایکس"، اولین همایش منطقه ای عملیات

