



# The Effect of Single-step and Two-step Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of the Novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr Alloy

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Morakabati M.<sup>1\*</sup>,  
Saki H.<sup>1</sup>,  
Mahdavi R.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Morakabati M, Saki H, Mahdavi R. The Effect of Single-step and Two-step Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of the Novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr Alloy. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(03):199-208.

<sup>1</sup> Faculty of materials and manufacturing Technologies, Malek Ashtar university of Technology, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of materials and manufacturing Technologies, Malek Ashtar university of Technology, Tehran, Iran  
m\_morakabati@mut.ac.ir

### Article History

Received: August 13, 2022  
Accepted: February 19, 2023  
ePublished: March 15, 2023

## ABSTRACT

Metastable beta titanium alloys are suitable for use in the aerospace industry due to their high strength and good ductility, as well as their high strength-to-weight ratio. The aim of the current research is to investigate the microstructure and tensile properties of the alloy after single-step and two-step aging following thermal-mechanical cycles of single-phase  $\beta$  annealing and two-phase  $\alpha+\beta$  annealing. For this purpose, on one strip of the alloy, solution annealing heat treatment in the single-phase  $\beta$  region, cold rolling and recrystallization and on the other strip, solution annealing heat treatment in the two-phase  $\alpha+\beta$  region was performed. Afterwards, the specimens from the strips were subjected to single-step aging at 550°C. In addition, in order to perform two-step aging, specimens were subjected to heat treatment at 300 and 550°C for primary and secondary aging, respectively. Then the structural evolution of the alloy was investigated by SEM and X-ray diffraction pattern and the tensile properties of it by tensile test. It was found that the optimum heat treatment cycle of the Ti-3873 alloy was two-step aging after  $\alpha+\beta$  solution treatment leading to 1190 MPa yield strength and 14.7% elongation. In this case, the obtained structure has no grain boundary alpha and the formed secondary alpha has a length of less than 0.5  $\mu\text{m}$  and its average thickness is 0.15  $\mu\text{m}$ .

**Keywords** Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr Alloy, Single-Phase  $\beta$  Annealing, Two-Phase  $\alpha+\beta$  Annealing, Two-Step Aging, Microstructure, Tensile Properties

## CITATION LINKS

1- State of the art in beta titanium alloys for airframe applications. 2- The relationship between microstructure and age hardening response in the metastable beta titanium alloy Ti-11.5 Mo-6 Zr-4.5 Sn (beta III). 3- Precipitation and recrystallization behavior of beta titanium alloys during continuous heat treatment. 4- Recent developments in heat treatment of beta titanium alloys for aerospace applications. 5- Beta alloys. 6- Thermomechanical processing of beta titanium alloys—an overview. 7- A comparative study of the mechanical properties of high-strength  $\beta$ -titanium alloys. 8- Quick reference guide for  $\beta$  titanium alloys in the 00s. 9- Design of a new multi-element beta titanium alloy based on d-electron method. 10- On the compressive deformation behavior of new beta titanium alloys designed by d-electron method. 11- Investigating the effect of cold rolling and heat treatment on the recrystallization behavior and mechanical properties of the novel metastable beta titanium alloy Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr. 12- Metallography and microstructures of titanium and its alloys. 13- 8M. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials (Metric), Annual Book of ASTM Standards. 14- Microstructural evolution of  $\omega$  assisted  $\alpha$  precipitates in  $\beta$ -CEZ alloy during ageing process. 15- Phase Transformations in Metals and Alloys (Revised Reprint) CRC Press. 16- Diffusion in solids. 17- Alloying element effects in metastable beta titanium alloys. 18- Correlation between alpha phase morphology and tensile properties of a new beta titanium alloy. 19- Effect of the two-phase solution annealing and aging on Alpha precipitates and Tensile properties of Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr alloy. 20- Mechanical Metallurgy. 21- Effect of prestrain and aging treatment on microstructures and tensile properties of Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5 Al alloy.

## اثر پیرسازی تکمرحله‌ای و دومرحله‌ای بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ نوین Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr

مریم مرکباتی<sup>۱\*</sup>، حسین ساکی<sup>۱</sup>، رشید مهدوی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### چکیده

آلیاژهای تیتانیوم شبه‌پایدار بتا به دلیل دارا بودن استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب و همچنین نسبت استحکام به وزن بالا جهت کاربرد در صنعت هوافضا مناسب می‌باشند. هدف از پژوهش حاضر بررسی ریزساختار و خواص کششی حاصل از پیرسازی تکمرحله‌ای و دومرحله‌ای پس از چرخه های مکانیکی حرارتی آنیل تک‌فاز  $\beta$  و آنیل دوفاز  $\alpha+\beta$  در آلیاژ نوین Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr است. به این منظور، روی یک تسمه از این آلیاژ، عملیات حرارتی آنیل انحلالی در منطقه تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد و بر روی تسمه دیگر، عملیات حرارتی آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  انجام شد. سپس، نمونه‌هایی از این تسمه‌ها در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات پیرسازی تک مرحله‌ای قرار گرفت. همچنین جهت انجام عملیات پیرسازی دومرحله‌ای، نمونه‌هایی در دمای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب جهت پیرسازی اولیه و ثانویه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. پس از آن، تحولات ساختاری آلیاژ بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و تفرق اشعه‌ی ایکس و خواص کششی بوسیله‌ی آزمایش کشش سرد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، سیکل بهینه عملیات حرارتی آلیاژ Ti-3873، پیرسازی دومرحله‌ای پس از آنیل در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  است که منجر به دستیابی به استحکام تسلیم ۱۱۹۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۱۴/۷٪ شد. در این حالت، ساختار بدست آمده فاقد آلفای مرز دانه‌ای بوده و آلفای ثانویه تشکیل شده دارای طول کمتر از ۰/۵ میکرومتر و میانگین ضخامت آن ۰/۱۵ میکرومتر می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** آلیاژ Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr، آنیل تک‌فاز  $\beta$ ، آنیل دوفاز  $\alpha+\beta$ ، پیرسازی دومرحله‌ای، ریزساختار، خواص کششی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

\*نویسنده مسئول: m\_morakabati@mut.ac.ir

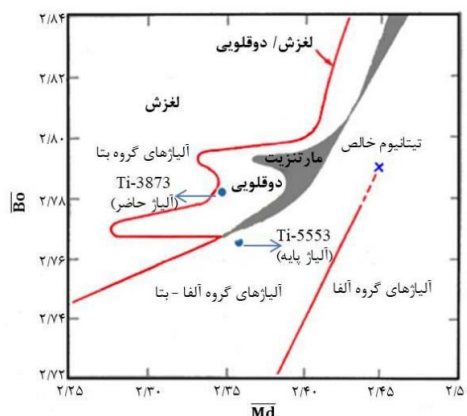
### ۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم شبه‌پایدار بتا به دلیل داشتن خواصی چون مقاومت به خوردگی عالی، بالاترین نسبت استحکام به وزن در دمای محیط، استحکام خستگی بالا، شکل‌پذیری سرد و قابلیت عملیات مکانیکی حرارتی؛ برای کاربردهای بسیاری به ویژه در صنایع هوابی و هوافضا مناسب می‌باشند [۱]. چرخه‌های عملیات مکانیکی حرارتی آلیاژهای تیتانیوم بتا در دو دسته عمده قرار می‌گیرند؛ دسته اول با هدف کاهش اندازه دانه‌ی  $\beta$  و دسته دوم با هدف توزیع یکنواخت رسوبات ریز  $\alpha$  در زمینه‌ی  $\beta$  انجام می‌شود. کاهش اندازه دانه  $\beta$  بوسیله نورد سرد شدید و عملیات آنیل تبلور مجدد کوتاه مدت یا آنیل انحلالی در دمای پایین‌تر از دمای استحاله بتا و نزدیک به آن انجام می‌گیرد [۲-۴]. در پژوهشی [۵]

کاهش اندازه دانه  $\beta$  در آلیاژ Ti-5Al-2Sn-2Cr-4Mo-4Zr-1Fe (β-CEZ) از ۴۰۰ به ۶۰ میکرومتر باعث تغییر میزان کاهش سطح مقطع از ۱٪ به ۲۱٪ شده است که نشان‌دهنده بهبود انعطاف‌پذیری می‌باشد. جهت توزیع یکنواخت رسوبات  $\alpha$  در زمینه‌ی  $\beta$  از پیرسازی دومرحله‌ای (دما پایین، دما بالا) استفاده می‌شود [۶]. در پیرسازی دومرحله‌ای ذکر شده، با بهره‌گیری از فاز غیر تعادلی امگا ( $\omega$ ) تلفیقی از استحکام و انعطاف‌پذیری بالا بدست می‌آید. به عنوان مثال پیرسازی آلیاژ Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti-15-3) به ترتیب در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد که هر کدام به مدت ۱۰ ساعت است منجر به دستیابی به تنش تسلیم و نهایی ۱۱۶۸ و ۱۲۲۶ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۸/۶٪ شده که خواص بالاتری نسبت به حالت پیرسازی تک مرحله‌ای را ارائه داده است [۷].

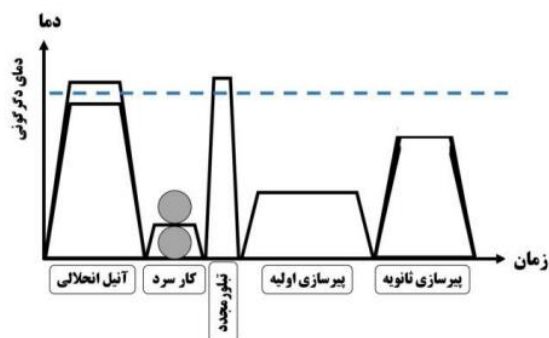
آلیاژ Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (Ti-5553) یک نمونه از این دسته آلیاژها است که به دلیل داشتن خواص اشاره شده، در ارا به فرود هواپیماها کاربرد دارد [۸]. اخیراً با استفاده از روش نیمه تجربی دی‌الکترون (d-electron) چند آلیاژ بر پایه آلیاژ Ti-5553 طراحی گردیده است [۹]. از بین آلیاژهای طراحی شده، آلیاژ Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr دارای بالاترین پایداری است. در این آلیاژ، به دلیل وجود مقادیر بالای مولیبدن و وانادیم، استحاله فازی بتا به آلفا به تاخیر می‌افتد. همچنین بیان شده است که این آلیاژ قابلیت شکل‌پذیری سرد عالی دارد [۱۰].

در شکل ۱ موقعیت هر دو آلیاژ ذکر شده در دیاگرام  $\overline{\text{Bo}} - \overline{\text{Md}}$  نشان داده شده است. آلیاژ Ti-3873 نسبت به آلیاژ Ti-5553 دارای Md کمتر و Bo بیشتری است [۹]. در دیاگرام  $\overline{\text{Bo}} - \overline{\text{Md}}$  با افزایش Bo و کاهش Md پایداری فاز بتا افزایش می‌یابد و بر این اساس پایداری فاز بتا آلیاژ Ti-3873 نسبت به آلیاژ Ti-5553 بیشتر است و به همین دلیل سرعت رسوب‌گذاری فاز آلفا در آلیاژ Ti-3873 نسبت به آلیاژ Ti-5553 کمتر است و با کمی تاخیر صورت می‌گیرد. این مورد منجر به افزایش گستره عملیات حرارتی می‌شود. در مطالعه نخست [۱۱] دمای استحاله فاز بتا آلیاژ Ti-3873 بوسیله روش متالوگرافی ۷۶۰-۷۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد.



شکل ۱) محدوده مکانیزم‌های تغییر شکل در دیاگرام  $\overline{\text{Bo}} - \overline{\text{Md}}$  برای آلیاژهای تیتانیوم و موقعیت آلیاژهای Ti-5553 و Ti-3873 [۹].

در منطقه دوفازی  $\alpha+\beta$  و تسمه آنیل انحلالی شده در منطقه تک‌فازی  $\beta$ ، نورد سرد و آنیل شده، در دمای  $550^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت هشت ساعت پیرسازی تک‌مرحله‌ای شدند. در ادامه متن این نمونه‌ها به اختصار، دوفاز تک‌مرحله و تک‌فاز تک‌مرحله بیان می‌گردند. همچنین نمونه‌های دیگری در دمای  $300^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت هشت ساعت پیرسازی اولیه و پس از سرمایش در هوا، در دمای  $550^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت هشت ساعت تحت عملیات پیرسازی دومرحله‌ای قرار گرفتند که به اختصار، دوفاز دومرحله و تک‌فاز دومرحله بیان می‌گردند. برای بررسی ریزساختار از نمونه‌های به ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  میلی‌متر و برای آزمایش کشش از نمونه‌های به ابعاد  $5 \times 5 \times 50$  میلی‌متر استفاده شد. جهت بررسی ریزساختار، نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی توسط پوساب به روش استاندارد پرداخت و سپس توسط محلول شیمیایی اصلاح شده کرول [12] با ترکیب  $18\text{HNO}_3 - 6\text{HF} - 3$  به مدت ۳ دقیقه حکاکی شیمیایی شدند. نمونه‌های آزمایش کشش پس از عملیات حرارتی مطابق استاندارد ASTM E8 [13] آماده سازی شده و تحت آزمایش کشش قرار گرفتند؛ برای هر چرخه عملیات حرارتی دو مرتبه آزمایش کشش انجام شد و به دلیل تطابق مناسب نتایج، به گزارش یک مورد از هر چرخه اکتفا شده است. تصویربرداری از ریزساختار بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI NOVA NANOSEM 450 مجهز به تفنگ نشر میدانی، آنالیز فازی توسط پراش اشعه ایکس بوسیله دستگاه XRD ساخت شرکت BRUKER آلمان مدل D8 ADVANCE و آزمایش کشش بوسیله دستگاه Instron 8502 انجام شد.



شکل ۳) شماتیک ترتیب انجام عملیات مکانیکی-حرارتی در پژوهش حاضر.

### ۳- نتایج و بحث

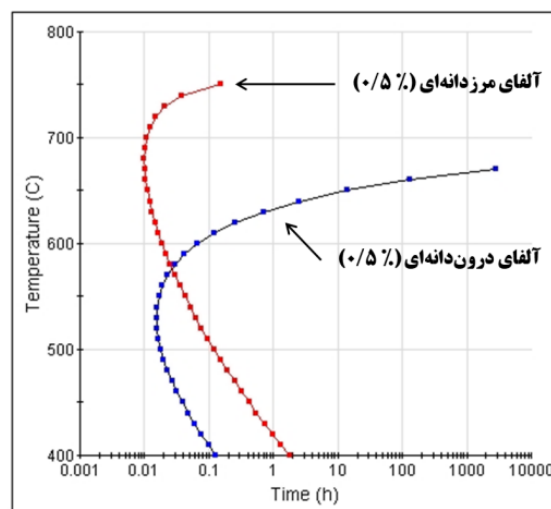
#### ۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

##### ۳-۱-۱- ریزساختار حاصل از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز $\beta$ ، نورد سرد

##### و تبلور مجدد و پیرسازی پس از آن

ریزساختار آلیاژ پس از عملیات تک‌فاز تک‌مرحله و تک‌فاز دومرحله در شکل ۴ ارائه شده است. چنانکه مشاهده می‌شود پیرسازی تک مرحله‌ای (شکل ۴-الف) منجر به تشکیل دو حالت از رسوبات آلفا شده است. این رسوبات عبارتند از، آلفای مرزدانه‌ای پیوسته ( $\alpha_{GB}$ )

هدف از پژوهش حاضر، بررسی خواص مکانیکی حاصل از انجام مسیرهای عملیات حرارتی مختلف جهت پیرسختی آلیاژ Ti-3873 می‌باشد. برای این منظور عملیات مختلف شامل کارسرد، آنیل انحلالی و پیرسازی یک و دو مرحله‌ای جهت ایجاد ساختار دوفازی ریزدانه و همگن جهت دستیابی به استحکام بالا و حفظ انعطاف‌پذیری انجام گرفت. طراحی چرخه‌های عملیات حرارتی بر اساس نتایج دیاگرام TTT آلیاژ Ti-3873 شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار JMatPro (شکل ۲) می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود در دماهای بالاتر از  $550^\circ\text{C}$  ابتدا آلفای مرزدانه‌ای و کمتر از آن دما ابتدا آلفای درون‌دانه‌ای (آلفای ثانویه) تشکیل می‌گردد.



شکل ۲) دیاگرام TTT آلیاژ Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار JMatPro.

### ۲- مواد و روش آزمایش

در پژوهش حاضر از آلیاژ Ti-3873 با ترکیب شیمیایی Ti-2.9Al-7.9Mo-7V-3Cr-0.18O بر حسب درصد وزنی استفاده شد. شمش مذکور ابتدا در ناحیه‌ی بتا تحت عملیات همگن‌سازی و سپس بوسیله فرآیند آهنگری داغ تحت کاهش ضخامت ۶۰٪ قرار گرفت. در نهایت در دمای  $750^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد با کاهش ضخامت به میزان ۵۰٪ نورد گرم شد. مطابق شماتیک شکل ۳؛ یکی از تسمه‌های آلیاژ تحت عملیات آنیل انحلالی در دمای  $750^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت و در آب کوئنچ شد. تسمه دیگر این آلیاژ تحت عملیات آنیل انحلالی در دمای  $800^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت و در آب کوئنچ شد. سپس روی آن فرآیند نورد سرد به میزان ۷۰٪ بدون آنیل میانی و طی چندین پاس با کاهش ضخامت هر پاس ۱-۲ میلی‌متر انجام شد. پس از نورد سرد، عملیات حرارتی تبلور مجدد نمونه‌ها در دمای  $820^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه و کوئنچ در آب انجام گردید. در نهایت اساس نتایج دیاگرام TTT آلیاژ Ti-3873 شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار JMatPro (شکل ۲) پیرسازی نمونه‌ها انجام گرفت؛ به این ترتیب، نمونه‌هایی از تسمه آنیل انحلالی شده

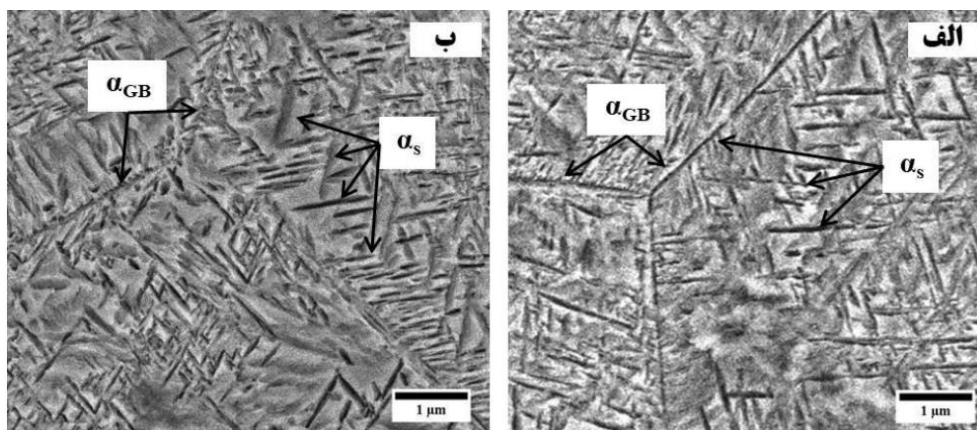
گزارش شده است<sup>[14]</sup> پیرسازی اولیه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تشکیل فاز میانی  $\omega_{iso}$  می‌شود. این فاز با گذشت زمان به رسوبات آلفای ثانویه تبدیل می‌گردد. به دلیل هم‌سیما بودن فاز  $\omega_{iso}$ ، جوانه‌زنی این فاز در داخل زمینه‌ی بتا بوده به صورت یکنواخت می‌باشد. به همین دلیل توزیع فاز آلفای تشکیل شده حاصل از فاز  $\omega_{iso}$  یکنواخت‌تر از حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای (شکل ۴-الف) می‌باشد. همزمان با رشد آلفای ثانویه، آلفای مرزدانه‌ای در مرز دانه‌های بتا تشکیل می‌شود. بنابراین عملیات تک‌فاز دومرحله بر مورفولوژی آلفای مرزدانه‌ای تأثیری نداشته است.

### ۳-۱-۲- ریزساختار حاصل از آنیل انحلالی دوفازی $\alpha+\beta$ و پیرسازی پس از آن

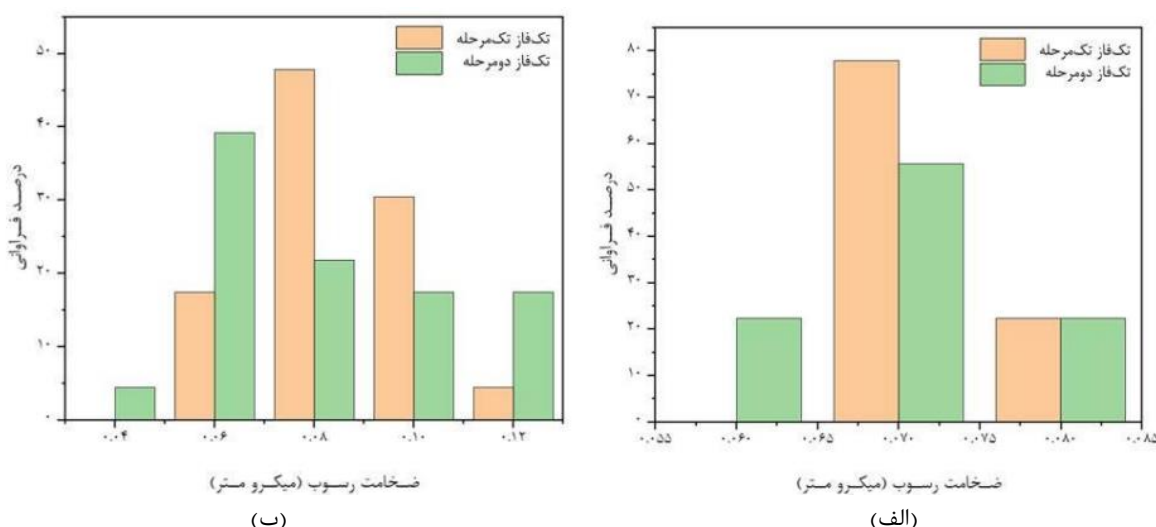
ریزساختار حاصل از عملیات دوفاز تک‌مرحله و دوفاز دومرحله در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با پیرسازی پس از آنیل انحلالی  $\alpha+\beta$ ، ریزساختار شامل دانه‌های ریز بتا، فاز آلفای

و آلفای ثانویه ( $\alpha_s$ ) می‌باشند. برخی از رسوبات آلفای ثانویه از آلفای مرزدانه‌ای به داخل دانه کشیده شده‌اند و به عنوان آلفای کناری در نظر گرفته می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با انجام پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۴-ب) نسبت به پیرسازی تک‌مرحله‌ای (شکل ۴-الف)، ضخامت رسوبات آلفای مرزدانه‌ای تغییری نکرده است. توزیع رسوبات آلفای ثانویه موازی و متقاطع یکنواخت‌تر شده و اندازه، ضخامت و فاصله بین رسوبات آلفای ثانویه کمتر شده است.

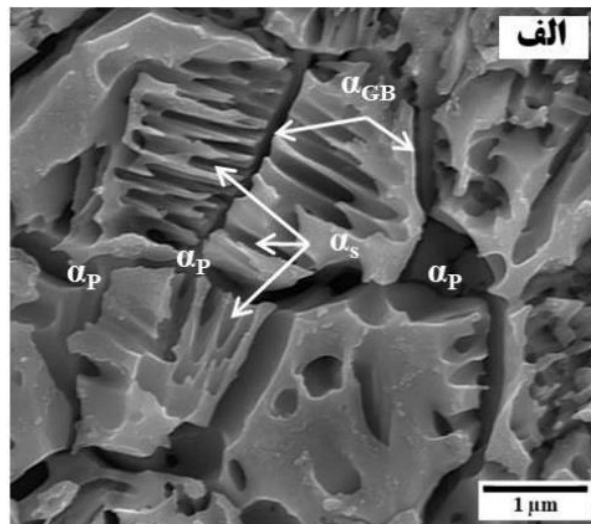
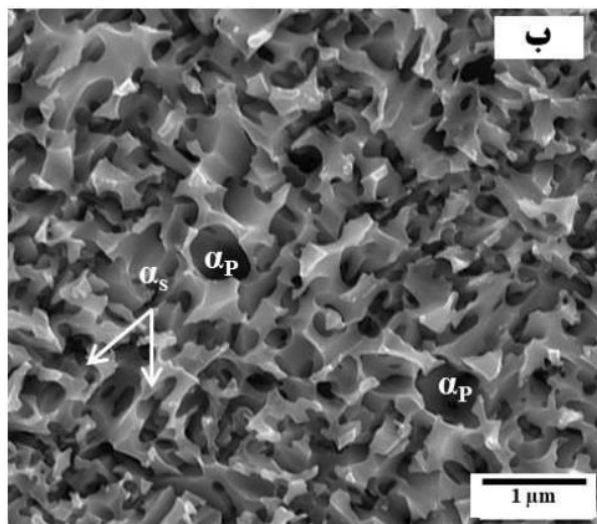
با توجه به نمودارهای توزیع ضخامت رسوبات آلفا تصاویر شکل ۴ که در شکل ۵ ارائه شده است؛ میانگین ضخامت رسوبات آلفا مرزدانه‌ای حاصل از عملیات تک‌فاز تک‌مرحله و تک‌فاز دو مرحله (شکل ۵-الف) یکسان و برابر با ۰/۰۶۷ میکرومتر می‌باشد. همچنین میانگین ضخامت رسوبات آلفا ثانویه حاصل از عملیات تک‌فاز تک‌مرحله و تک‌فاز دو مرحله (شکل ۵-ب) به ترتیب برابر با ۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۲ میکرومتر تعیین شد.



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار حاصل از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد و سپس الف) پیرسازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و ب) پیرسازی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس پیرسازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵) نمودار توزیع ضخامت رسوبات آلفا (الف) آلفای مرزدانه‌ای و ب) آلفای ثانویه؛ حاصل از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد و سپس پیرسازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (تک‌فاز تک‌مرحله) و پیرسازی در دمای ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (تک‌فاز دو مرحله).



شکل ۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار حاصل از عملیات آنیل انحلالی  $\beta + \alpha$  و سپس (الف) پیرسازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و (ب) پیرسازی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس پیرسازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

آلفای مرزدانه‌ای تشکیل می‌شوند و پس از آن، شرایط برای جوانه‌زنی فاز آلفای درون‌دانه‌ای (فاز آلفای ثانویه) فراهم می‌گردد [15]. به علت ریز بودن دانه‌های بتا، مساحت جانبی این دانه‌ها بالا است. در نتیجه، نفوذ اتمی سرعت بالایی خواهد داشت و دگرگونی‌های نفوذی، سریع‌تر انجام می‌شود [16]. به این دلیل ضخامت آلفای مرزدانه‌ای بیشتر از ضخامت آلفای ثانویه است.

ریزساختار حاصل از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha + \beta$  و پیرسازی دومرحله‌ای در شکل ۶- ب نشان می‌دهد که ساختار فاقد آلفای مرزدانه‌ای بوده و آلفای ثانویه به صورت دیسک‌های با سطح مقطع بیضوی شکل ایجاد شده‌اند. طول آلفای ثانویه کمتر از ۰/۵ میکرومتر و میانگین ضخامت آن ۰/۱۵ میکرومتر می‌باشد.

باتوجه به تصاویر ریزساختار حاصل از پیرسازی تک‌مرحله‌ای (شکل ۶- الف) و ریزساختار حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۶- ب) مشاهده می‌شود که انجام پیرسازی دومرحله‌ای باعث حذف ساختار مرزدانه‌ای و کاهش طول و ضخامت آلفاهای ثانویه به ترتیب از ۰/۲ میکرومتر به ۰/۵، ۰/۱۵ میکرومتر

شده است. در حالت پیرسازی دومرحله‌ای طی پیرسازی اولیه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت هشت ساعت ابتدا فاز میانی  $\omega_{iso}$  به صورت همدم تشکیل می‌شود. بر اساس مرجع [14]، فاز  $\omega_{iso}$  دارای مورفولوژی مکعبی در سیستم آلیاژی Ti-V و مورفولوژی کروی و بیضوی در سیستم آلیاژی Ti-Mo می‌باشد. فاز آلفای ثانویه توسط جابجایی و نفوذ اتم‌ها و در مکان‌های با تمرکز عناصر آلیاژی در درون دانه‌های بتا جوانه می‌زند و رشد می‌کنند. در حین پیرسازی ثانویه فاز آلفای ثانویه با سرعت بیشتری نسبت به پیرسازی اولیه رشد می‌کند. باتوجه به ریزساختار حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۶- ب)، فاز آلفای ثانویه بیضوی شکل بوده و نشان دهنده مطابقت این آلیاژ با سیستم آلیاژی Ti-Mo است. البته باتوجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-3873 که

اولیه کروی شکل با میانگین اندازه دانه ۱ میکرومتر است. فاز آلفای اولیه در حین کارگرم در منطقه‌ی دوفازی  $\alpha + \beta$  و در نقاط سه‌گانه مرز دانه‌های بتا تشکیل شده است. فاز آلفای اولیه از رشد دانه‌های بتا جلوگیری می‌کند و منجر به دستیابی به دانه‌های ریز بتا با میانگین اندازه دانه ۵ میکرومتر شده است.

در نمونه‌ای که تحت پیرسازی تک‌مرحله‌ای قرار گرفته، مطابق شکل ۶- الف ضخامت فاز آلفای تشکیل شده در مرز دانه‌های بتا به ۰/۲ میکرومتر می‌رسد. به دلیل غیرهم‌سیما بودن رسوبات آلفا با زمینه‌ی بتا، جوانه‌زنی فاز آلفا ابتدا در مرزدانه‌های بزرگ زاویه صورت می‌گیرد [15]. در نتیجه در ابتدا آلفای مرزدانه‌ای تشکیل می‌شود. با افزایش دما، نفوذ اتمی سرعت بیشتری داشته و رشد ناشی از دگرگونی‌های نفوذی بیشتر می‌شود [16].

چنانکه در شکل ۶- الف مشاهده می‌شود، رسوبات فاز آلفای ثانویه در سه جهت تشکیل شده‌اند. گزارش شده است [18] پایداری بالای فاز بتا منجر به تشکیل رسوبات آلفای ثانویه در سه جهت می‌شود. دو عامل باعث پایداری بالا فاز بتا در آلیاژ Ti-3873 می‌شود؛ اول: وجود ۱۷ درصد وزنی عناصر پایدارکننده فاز بتا در ترکیب آلیاژ و دوم: پس زدن عناصر پایدارکننده فاز بتا ناشی از تشکیل آلفای اولیه در حین آنیل انحلالی  $\alpha + \beta$ . در حین آنیل انحلالی در منطقه دوفازی  $\alpha + \beta$  این عناصر پس‌زده شده، در زمینه‌ی بتا حل شده و منجر به افزایش پایداری فاز بتای زمینه می‌شوند.

اندازه، ضخامت و فاصله بین رسوبات آلفای ثانویه متغیر می‌باشد؛ در حالت پیرسازی تک مرحله‌ای (شکل ۶ Error! Reference source not found. الف)، موارد یاد شده به ترتیب ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ میکرومتر می‌باشد. چنانکه بیان شد به دلیل غیرهم‌سیما بودن رسوبات آلفا با زمینه‌ی بتا، تشکیل فاز آلفا ابتدا در مرزدانه‌های بزرگ زاویه صورت می‌گیرد. در نتیجه در ابتدا

فرآیند تشکیل آلفای ثانویه است. پایداری زمینه‌ی بتا نمونه حاصل از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  نسبت به نمونه حاصل از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد بیشتر بوده و سرعت نفوذ عناصر آلیاژی Mo و V، کم می‌باشد. در نتیجه فرآیند تشکیل فاز آلفای ثانویه پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  نسبت به حالت دیگر نیاز به زمان بیشتری دارد. به همین دلیل پیرسازی دومرحله‌ای نقش مهمی در رسوب‌دهی فاز آلفای ثانویه پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  ایفا می‌کند.

پراش در زاویه‌های  $41^\circ$  و  $76^\circ$  پس از عملیات تک‌فاز تک‌مرحله و دومرحله نشان دهنده رسوب فاز آلفا در مرزخانه، تشکیل آلفای کناری و آلفای ثانویه می‌باشد. پراش در زاویه‌ی  $76^\circ$  پس از عملیات دوفاز تک‌مرحله مشاهده نمی‌شود و پس از عملیات تک‌فاز دومرحله دارای شدت خیلی کمتری نسبت به عملیات تک‌فاز دومرحله می‌باشد. در نتیجه می‌توان بیان کرد که این پراش مربوط به آلفای ثانویه و پراش زاویه‌ی  $41^\circ$  مربوط به آلفای مرزخانه‌ای و کناری می‌باشد. شدت بالای پراش در زاویه‌ی  $76^\circ$  در حالت تک‌فاز دومرحله نشان دهنده حجم بالای آلفای ثانویه نسبت به آلفای کناری و آلفای مرزخانه‌ای است که به دلیل بهره‌گیری از فاز غیر تعادلی امگا ( $\omega$ ) می‌باشد.

### ۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از عملیات‌های تک‌فاز تک‌مرحله و دومرحله و دوفاز تک‌مرحله و دومرحله در شکل ۸ ارائه شده است. مساحت زیر نمودار تنش - کرنش به عنوان چقرمگی در نظر گرفته می‌شود.

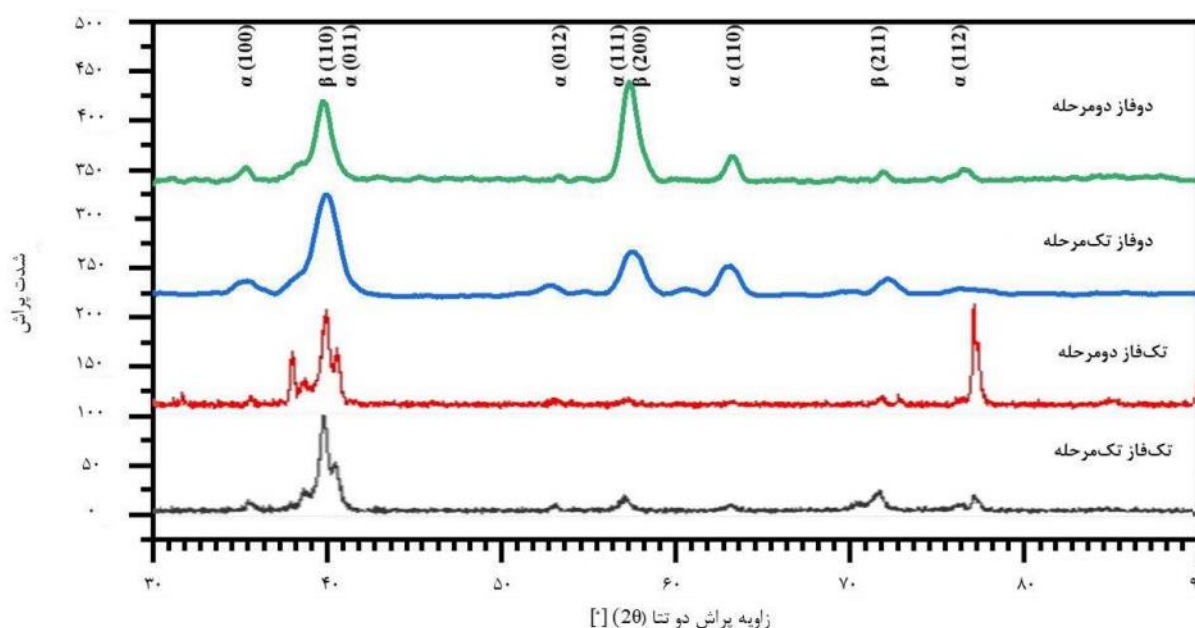
شامل ۸ درصد وزنی Mo است این نتیجه منطقی می‌باشد. حذف ساختار مرزخانه‌ای نیز به دلیل افزایش انرژی محرکه جوانه‌زنی فاز آلفای ثانویه در حالت پیرسازی دومرحله‌ای نسبت به پیرسازی تک‌مرحله‌ای می‌باشد. مطابق مرجع [18] تشکیل فاز امگای هم‌دما درون فاز بتا باعث تمرکز موضعی عناصر آلیاژی شده و این امر باعث بیشتر شدن انرژی محرکه فاز آلفای ثانویه نسبت به آلفای مرزخانه‌ای می‌گردد در نتیجه آلفای مرزخانه‌ای تشکیل نمی‌شود.

### ۲-۳- بررسی‌های فازی

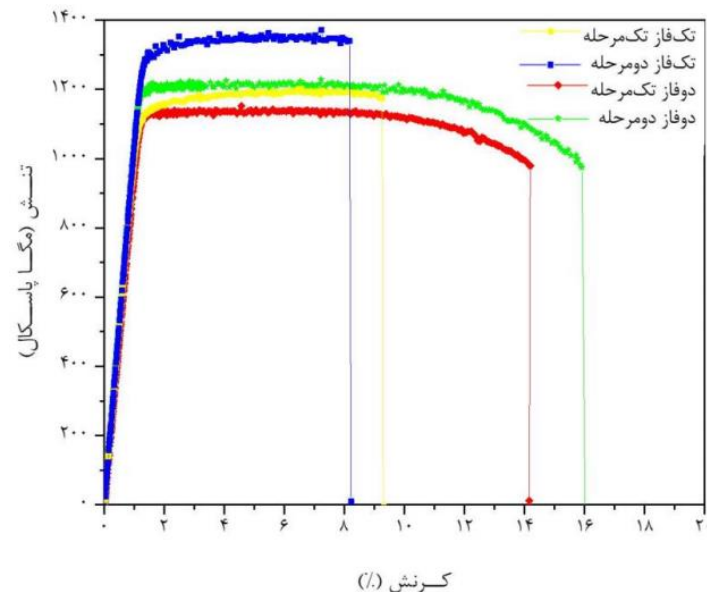
تشکیل فاز آلفای اولیه، توسط الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ Ti-3873 پس از آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  در مطالعه دیگری [19] ارائه و تایید شده است. در ادامه الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ Ti-3873 پس از عملیات‌های تک‌فاز تک‌مرحله و دومرحله و دوفاز تک‌مرحله و دومرحله در شکل ۷ ارائه شده است. در الگوی پراش حاصل از دوفاز تک‌مرحله مشاهده می‌شود فاز آلفا در صفحات (۰۱۱)، (۰۱۲)، (۰۱۰)، (۱۱۱) و (۱۱۰) پراش یافته است. این مسئله رسوب فاز آلفا طی پیرسازی پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  را تایید می‌کند.

فاز بتا در زاویه‌های  $2\theta$  برابر با  $39^\circ$ ،  $57^\circ$  و  $73^\circ$  پراش یافته است. اما پراش فاز آلفا با توجه به تاریخچه و حالت پیرسازی در زاویه‌های مختلف با شدت‌های متفاوت رخ می‌دهد.

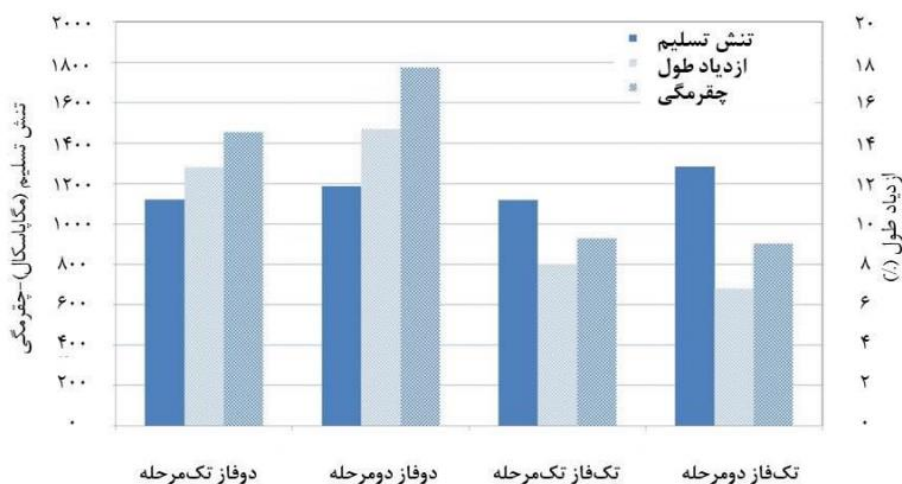
فاز آلفا در زاویه‌های  $2\theta$  برابر با  $35^\circ$ ،  $41^\circ$ ،  $53^\circ$ ،  $57^\circ$ ،  $63^\circ$  و  $76^\circ$  پراش یافته است. پراش  $41^\circ$  و  $76^\circ$  فقط در عملیات‌های تک‌فاز تک‌مرحله و دومرحله تشکیل می‌یابد. درحالی‌که پراش  $57^\circ$  و  $63^\circ$  فقط در عملیات‌های دوفاز تک‌مرحله و دومرحله تشکیل شده است. همچنین شدت پراش‌های حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای بیشتر از پیرسازی تک‌مرحله‌ای می‌باشد. که به دلیل نفوذی بودن



شکل ۷) الگوی تفرق اشعه ایکس آلیاژ Ti-3873 حاصل از عملیات پیرسازی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای با دمای پیرسازی نهایی  $550^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد نمونه‌های بدست آمده از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  و پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد.



شکل ۸) منحنی تنش - کرنش حاصل از عملیات پیرسازی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با دمای پیرسازی نهایی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های بدست آمده از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  و پس از عملیات آنیل انحلالی تک فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد.



#### چرخه عملیات حرارتی - مکانیکی

شکل ۹) نتایج خواص مکانیکی حاصل از عملیات پیرسازی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با دمای پیرسازی نهایی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های بدست آمده از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  و پس از عملیات آنیل انحلالی تک فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد.

نمونه‌ی حاصل از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$ ، مانع رشد دانه‌های بتا می‌شود. میانگین اندازه دانه‌ی بتا پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  کمتر از ۵ میکرومتر و پس از عملیات آنیل انحلالی تک فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد بیشتر از ۳۰ میکرومتر می‌باشد. به همین دلیل نمونه حاصل از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  دارای ازدیاد طول بالاتری است. ازدیاد طول این نمونه ۵٪ بیشتر از نمونه‌ای است که تحت عملیات آنیل انحلالی تک فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد قرار گرفته بود؛ درحالی که استحکام آن تقریباً ۱۰۰ مگاپاسکال کمتر می‌باشد. بنابراین، پیرسازی نمونه‌های آنیل انحلالی یافته در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  نسبت به پیرسازی نمونه‌های آنیل انحلالی یافته در منطقه تک فاز

نتایج خواص مکانیکی حاصل از منحنی‌های تنش - کرنش عملیات‌های تک فاز تک مرحله و دو مرحله و دوفاز تک مرحله و دو مرحله (شکل ۸) در شکل ۹ ارائه شده است.

بر اساس منحنی شکل ۸ و نمودار شکل ۹، نمونه‌های دوفاز تک مرحله و دو مرحله نسبت به نمونه‌های تک فاز تک مرحله و دو مرحله استحکام کمتر و ازدیاد طول بالاتری دارند. طبق مطالب بیان شده، استحکام متأثر از کسر حجمی، اندازه و ضخامت آلفای ثانویه است. به علت تشکیل آلفای اولیه در عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$ ، کسر حجمی آلفای ثانویه کاهش می‌یابد. بنابراین نمونه‌ی حاصل از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  دارای استحکام کمتری است. حضور فاز آلفای اولیه در

$\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد شده، منجر به دستیابی به خواص مناسب‌تری می‌شود.

پیرسازی دومرحله‌ای در عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  منجر به افزایش استحکام به میزان (۷۰ مگاپاسکال) و ازدیاد طول به میزان (۲٪) می‌شود. درحالی که پیرسازی دومرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد باعث افزایش استحکام به میزان قابل توجهی (۱۷۰ مگاپاسکال) و کاهش ازدیاد طول به میزان ناچیز (۱٪) می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که پیرسازی دومرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  منجر به افزایش چقرمگی می‌شود اما پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد چقرمگی تغییری نکرده است. همچنین خواص حالت پیرسازی دو مرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  بیشتر از سایر حالت‌ها می‌باشد و فقط تنش نهایی آن به میزان ۱۵۰ مگاپاسکال از حالت پیرسازی دومرحله‌ای پس از حالت نورد سرد و تبلور مجدد کمتر است. بنابراین انجام عملیات پیرسازی دومرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  جهت دستیابی به خواص مکانیکی حداکثر مناسب است.

فاز آلفای اولیه منجر به افزایش پایداری فاز بتا می‌شود. با افزایش پایداری فاز بتا نیروی محرکه جوانه‌زنی آلفای ثانویه کاهش و زمان تکمیل رشد آن‌ها افزایش می‌یابد. انجام پیرسازی دومرحله‌ای باعث افزایش نیروی محرکه جوانه‌زنی رسوبات منجر به آلفای ثانویه می‌شود. همچنین انجام پیرسازی دومرحله‌ای، فرصت کافی را برای تکمیل رشد آلفای ثانویه فراهم می‌نماید. در نتیجه، طی پیرسازی دومرحله‌ای کسر حجمی آلفای ثانویه افزایش و توزیع آن‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین، استحکام و انعطاف‌پذیری به صورت هم‌زمان افزایش یافته است. همچنین چقرمگی افزایش می‌یابد. در نتیجه پاسخ به عملیات پیرسازی دومرحله‌ای در عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  نسبت به حالت تبلور مجدد یافته تک‌فاز بسیار مناسب می‌باشد.

رسوبات آلفای ثانویه، لایه‌ای شکل بوده و فصل مشترک بین رسوبات آلفا و زمینه بتا، غیرهم‌سیما است. همچنین مکانیزم تغییر شکل فعال در آلیاژ حاضر لغزش می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان کرد که به هنگام اعمال تنش کششی به آلیاژ Ti-3873، برای عبور از ناحیه‌ی کرنش الاستیک نیاز به لغزش صفحات اتمی بوسیله‌ی حرکت نابجایی‌ها است. از طرفی رسوبات آلفای ثانویه مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند. در نتیجه برای عبور نابجایی‌ها از این موانع نیاز به اعمال تنش بیشتر می‌باشد. بنابراین با کاهش کسر حجمی این موانع (آلفای ثانویه)، تنش مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. انجام پیرسازی دومرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  (شکل ۸- منحنی سبز رنگ) منجر به استحکام بیشتری نسبت به حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای در همان شرایط (شکل ۸- منحنی قرمز رنگ) می‌شود؛ دلیل این مورد،

تشکیل فاز آلفای ثانویه می‌باشد. چنانکه بیان شد، میزان استحکام رابطه مستقیمی با میزان تشکیل فاز آلفای ثانویه دارد. تحولات ریزساختاری نیز نشان داده که پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۶- ب) منجر به ریزساختاری با رسوبات ریز آلفای ثانویه به ضخامت ۰/۱۵ میکرومتر بدون رسوبات آلفای مرزانه‌ای می‌شود. در حالی که ریزساختار حاصل از پیرسازی تک‌مرحله‌ای (شکل ۶- الف) دارای رسوبات آلفای ثانویه به ضخامت ۰/۲ میکرومتر به همراه رسوبات آلفای مرزانه‌ای می‌باشد. رسوبات آلفای ثانویه مانع حرکت نابجایی‌ها شده و باعث تشکیل حلقه‌های نابجایی و افزایش چگالی نابجایی‌ها در حالت پیرسازی دومرحله‌ای نسبت به حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای می‌شود و بر اساس مکانیزم استحکام‌بخشی اوروان<sup>[20]</sup>، افزایش چگالی نابجایی‌ها منجر به افزایش استحکام تسلیم نمونه‌ی حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای نسبت به حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای شده است. علاوه بر این، با انجام پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۸- منحنی سبز رنگ)، علاوه بر افزایش استحکام تسلیم، درصد کرنش شکست نیز افزایش می‌یابد. بر اساس ریزساختارهای حاصل از پیرسازی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای (تصاویر شکل ۶- الف و ب)، تحولات ریزساختاری مشاهده شده عبارت است از: انجام پیرسازی دومرحله‌ای باعث حذف آلفای مرزانه‌ای ریزتر شدن رسوبات آلفای ثانویه شده است حضور آلفای ثانویه منجر به افزایش استحکام تسلیم نمونه‌ی حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای شده است. بر اساس مکانیزم استحکام‌بخشی اوروان<sup>[20]</sup>، به دلیل حضور رسوبات آلفای ثانویه ریزتر، چگالی حلقه‌های نابجایی در حالت پیرسازی دومرحله‌ای (شکل ۶- ب) بیشتر از حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای (شکل ۶- الف) می‌باشد. از طرفی با توجه به ریزساختار شکل ۶- الف، رسوبات آلفای ثانویه غیر متقاطع بوده و اثر قفل شوندگی آن‌ها بر نابجایی‌ها کمتر است. بنابراین نابجایی‌ها می‌توانند آزادانه حرکت کنند<sup>[21]</sup>. به دلیل حرکت آزادانه نابجایی‌ها در این حالت، نرخ تجمع نابجایی‌ها نسبت به حالت پیرسازی تک‌مرحله‌ای افزایش نمی‌یابد و این عامل منجر به کرنش بیشتر نمونه‌ی حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از ریزساختار شکل‌های ۴ و ۶، در نمودار شکل ۹ مشخص شد برای دستیابی به تلفیق مناسبی از استحکام و انعطاف‌پذیری، انجام پیرسازی دو مرحله‌ای به همراه آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  در ارتقای خواص مکانیکی آلیاژ Ti-3873 موثر است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ نوین تیتانیوم شبه پایدار بتا Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد و عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  و پیرسازی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای نشان داد:

- alloy Ti-11.5 Mo-6 Zr-4.5 Sn (beta III). Metallurgical and Materials Transactions A. 1980; 11:21-31.
- 3- Ivasishin OM, Markovsky PE, Matviychuk YV, Semiatin SL. Precipitation and recrystallization behavior of beta titanium alloys during continuous heat treatment. Metallurgical and Materials Transactions A. 2003; 34:147-58.
- 4- Santhosh R, Geetha M, Nageswara Rao M. Recent developments in heat treatment of beta titanium alloys for aerospace applications. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017; 70:1681-8.
- 5- Lütjering G, Williams JC. Beta alloys. Titanium. 2007:283-336.
- 6- Weiss I, Semiatin SL. Thermomechanical processing of beta titanium alloys—an overview. Materials Science and Engineering: A. 1998;243(1-2):46-65.
- 7- Ivasishin OM, Markovsky PE, Matviychuk YV, Semiatin SL, Ward CH, Fox S. A comparative study of the mechanical properties of high-strength  $\beta$ -titanium alloys. Journal of alloys and compounds. 2008;457(1-2):296-309.
- 8- Nyakana SL, Fanning JC, Boyer RR. Quick reference guide for  $\beta$  titanium alloys in the 00s. Journal of Materials Engineering and Performance. 2005; 14:799-811.
- 9- Sadehghpour S, Abbasi SM, Morakabati M. Design of a new multi-element beta titanium alloy based on d-electron method. InTMS 2018 147th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings 2018 (pp. 377-386). Springer International Publishing.
- 10- Sadehghpour S, Abbasi SM, Morakabati M, Kisko A, Karjalainen LP, Porter DA. On the compressive deformation behavior of new beta titanium alloys designed by d-electron method. Journal of Alloys and Compounds. 2018; 746:206-17.
- 11- Saki H, Morakabati M, Mahdavi R. Investigating the effect of cold rolling and heat treatment on the recrystallization behavior and mechanical properties of the novel metastable beta titanium alloy Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr. presented at the 9th International Conference & Exhibition on Materials science & Metallurgical engineering. 2020.
- 12- Gammon LM, Briggs RD, Packard JM, Batson KW, Boyer R, Dombay CW. Metallography and microstructures of titanium and its alloys. ASM handbook. 2004; 9:899-917.
- 13- ASTM E. 8M. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials (Metric), Annual Book of ASTM Standards. InAm Soc Testing Mater 1999 (Vol. 3, p. 01).
- 14- He T, Feng Y, Luo W, He Y, Tian L, Lai Y. Microstructural evolution of  $\omega$  assisted  $\alpha$  precipitates in  $\beta$ -CEZ alloy during ageing process. Materials Characterization. 2018; 138:19-25.
- 15- Porter DA, Easterling KE, Sherif MY. Phase transformations in metals and alloys. CRC press; 2009.
- 16- Shewmon P, editor. Diffusion in solids. Springer; 2016.
- 17- Yoltan CF, Froes FH, Malone RF. Alloying element effects in metastable beta titanium alloys. Metallurgical Transactions A. 1979; 10:132-4.
- 18- Sadehghpour S, Abbasi SM, Morakabati M, Bruschi S. Correlation between alpha phase morphology and

- استحکام تسلیم و ازدیاد طول حاصل از پیرسازی تک مرحله‌ای در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد به ترتیب ۱۱۱۸ مگاپاسکال و ۸٪ بدست آمد. در حالی که پیرسازی تک مرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی دوفازی  $\alpha+\beta$  منجر به دستیابی به استحکام تسلیم و ازدیاد طول به ترتیب ۱۱۲۰ مگاپاسکال و ۱۲/۸٪ شد.
- انجام پیرسازی دومرحله‌ای با دمای پیرسازی اولیه و ثانویه ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد پس از عملیات آنیل انحلالی تک‌فاز  $\beta$ ، نورد سرد و تبلور مجدد منجر به افزایش استحکام تسلیم به ۱۲۸۵ مگاپاسکال و کاهش ازدیاد طول به ۶/۸٪ نسبت به پیرسازی تک‌مرحله‌ای در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد شد.
- استحکام تسلیم و ازدیاد طول حاصل از پیرسازی دومرحله‌ای پس از عملیات آنیل انحلالی دوفازی  $\alpha+\beta$  به ترتیب ۱۱۸۷ مگاپاسکال و ۱۴/۷٪ بدست آمد که نسبت به پیرسازی تک‌مرحله‌ای هم استحکام تسلیم و هم ازدیاد طول افزایش یافته است و به عنوان چرخه‌ی مناسب عملیات مکانیکی حرارتی آلیاژ Ti-3873 معرفی می‌گردد.
- انجام پیرسازی دومرحله‌ای با دمای پیرسازی اولیه و ثانویه ۳۰۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد پس از عملیات آنیل انحلالی در منطقه دوفاز  $\alpha+\beta$  منجر به تشکیل ساختار فاقد آلفای مرزدهانه‌ای و آلفای ثانویه با طول کمتر از ۰/۵ میکرومتر و میانگین ضخامت آن ۰/۱۵ میکرومتر شد.

**تشکر و قدردانی:** از همکاری پژوهشگاه مواد فلزی، در تامین مواد اولیه و انجام آزمایش‌های مکانیکی قدردانی می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تحت حمایت مالی دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شده است و همچنین در هیچ مجله دیگری چاپ نشده است.

**تعارض منافع:** کلیه حقوق مادی و معنوی، به دانشگاه صنعتی مالک اشتر تعلق دارد و اقتباس مطالب از آن، باید با ذکر مرجع باشد.

**منابع مالی:** هزینه‌ها توسط دانشگاه صنعتی مالک اشتر تامین شده است.

## منابع

- 1- Cotton JD, Briggs RD, Boyer RR, Tamirisakandala S, Russo P, Shchetnikov N, Fanning JC. State of the art in beta titanium alloys for airframe applications. Jom. 2015;67(6):1281-303.
- 2- Froes FH, Yoltan CF, Capenos JM, Wells MG, Williams JC. The relationship between microstructure and age hardening response in the metastable beta titanium

tensile properties of a new beta titanium alloy. Materials & Design. 2017; 121:24-35.

19- Saki H, Morakabati M, Mahdavi R. EFFECT OF THE TWO-PHASE SOLUTION ANNEALING AND AGING ON ALPHA PRECIPITATES AND TENSILE PROPERTIES OF Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr ALLOY. Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal). 2021;40(3):43-59.

20- Paupler P. GE Dieter. Mechanical Metallurgy. Mc Graw-Hill Book Co., New York 1986. XXIII+ 751 p., DM 138.50, ISBN 0-07-016893-8.

21- Song ZY, Sun QY, Xiao L, Liu L, Sun J. Effect of prestrain and aging treatment on microstructures and tensile properties of Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5 Al alloy. Materials Science and Engineering: A. 2010;527(3):691-8.