



# Determination Workability of The Novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr Titanium Alloy via Ductility Evaluation in Two-Phase Alpha-Beta and Single-Phase Beta Regions

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Dabaghi M.<sup>1</sup>,  
Morakabati M.<sup>1\*</sup>,

### How to cite this article

Dabaghi M, Morakabati M, Determination Workability of The Novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr Titanium Alloy via Ductility Evaluation in Two-Phase Alpha-Beta and Single-Phase Beta Regions. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(02):111-118.

<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: March 10, 2024

Accepted: June 1, 2024

ePublished: June 15, 2024

## ABSTRACT

In This study, in order to evaluation of ductility and consequently the optimum workability region of novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr titanium alloy (Ti-3873), the hot tensile tests were performed at a constant strain rate of 0.1 s<sup>-1</sup> and the temperature range of 650-850°C. To establish the relationship between microstructural evolution and ductility, the microstructure of the specimen was examined by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) after and before hot deformation. The results showed that ductility at the temperatures of 650-750°C, increased from 33% to 54% as a consequence of transformation of  $\alpha$  to  $\beta$  phases and gradually eliminating the  $\alpha$  phase. The maximum ductility obtained at 850°C with a 71% increase in ductility. Microstructural studies showed the elongated and serrated boundaries confirmed the occurrence of dynamic recovery. Recrystallized grains were also observed at 850°C. Therefore, it can demonstrate that the restoration mechanism of the Ti-3873 alloy during hot tension is dynamic recovery and partial dynamic recrystallization. Finally, according to tension results, the appropriate range of deformation deformation of the Ti-3873 alloy in this study is 800-850°C.

**Keywords** Novel Titanium Alloy, Hot Ductility, Hot Tension, Dynamic Recovery and Recrystallization.

## CITATION LINKS

1- Titanium alloys for aerospace applications. 2- Titanium for automotive applications: challenges and opportunities in materials and processing. 3- Biomedical applications of titanium and its alloys. 4- Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications. 5- Design of a new multi-element beta titanium alloy based on d-electron method. 6- Improvement of tensile properties of alloy through chemical composition modification and thermomechanical process control. 7- Military applications for  $\beta$  titanium alloys. 8- Thermomechanical processing of beta titanium alloys—an overview. 9- An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components. 10- The effect of single-step and two-step aging on the microstructure and mechanical properties of the novel Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr alloy. 11- Comparison of the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-3573 and Ti-3873 Alloys after Cold Rolling and Aging Treatment. 12- Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Dynamic Recrystallization of Metastable  $\beta$  Titanium Alloy. 13- Standard test methods for tension testing of metallic materials. 14- Transformation softening in three titanium alloys. 15- Recrystallization and related annealing phenomena. 16- Mechanical metallurgy. 17- Flow behavior modeling of IMI834 titanium alloy during hot tensile deformation. 18- Hot strength and hot ductility of titanium alloys—a challenge for continuous casting process. 19- Automated method for fractographic analysis of shape and size of dimples on fracture surface of high-strength titanium alloys. 20- Materials selection in mechanical design.

# تعیین کارپذیری آلیاژ نوین تیتانیوم Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr با ارزیابی انعطاف‌پذیری در مناطق دوفازی آلفا بتا و تک‌فاز بتا

مهناز دباغی<sup>۱</sup>، مریم مرکباتی<sup>۱\*</sup>

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

## چکیده

در این پژوهش، به منظور ارزیابی انعطاف‌پذیری و در نتیجه منطقه مناسب کارپذیری آلیاژ نوین تیتانیوم (Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr (Ti-3873)، آزمایش کشش گرم در مناطق دوفاز آلفا بتا و تک‌فاز بتا با نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه در محدوده دمای ۶۵۰ تا ۸۵۰ °C انجام شد. به منظور برقراری ارتباط میان تحولات ریزساختاری و انعطاف‌پذیری، ریزساختار نمونه‌ها قبل و پس از تغییر شکل گرم توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان انعطاف‌پذیری حاصل از آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873، در محدوده دمایی ۶۵۰ تا ۷۵۰ °C به دلیل وقوع استحاله فازی آلفا به بتا و حذف تدریجی فاز آلفا، از ۳۳٪ به ۵۴٪ افزایش یافت و حداکثر میزان انعطاف‌پذیری آلیاژ در دمای ۸۵۰ °C به میزان ۷۱٪ بدست آمد. بررسی‌های ریزساختاری، مرزخانه‌های کشیده شده و مضرس شده را نشان داد که حاکی از وقوع بازیابی دینامیک است. همچنین دانه‌های تبلور مجدد یافته در ریزساختار نمونه تغییر شکل یافته در دمای ۸۵۰ °C مشاهده شد. لذا می‌توان بیان نمود مکانیزم ترمیم آلیاژ Ti-3873 هنگام آزمایش کشش گرم، بازیابی دینامیک و در ادامه اندکی تبلور مجدد دینامیک است. در نهایت بررسی نتایج انعطاف‌پذیری پژوهش حاضر نشان داد که محدوده دمایی مناسب تغییر شکل آلیاژ Ti-3873، ۸۰۰ °C تا ۸۵۰ °C است.

**کلیدواژه‌ها:** آلیاژ نوین تیتانیوم، انعطاف‌پذیری، کشش گرم، بازیابی و تبلور مجدد دینامیک.

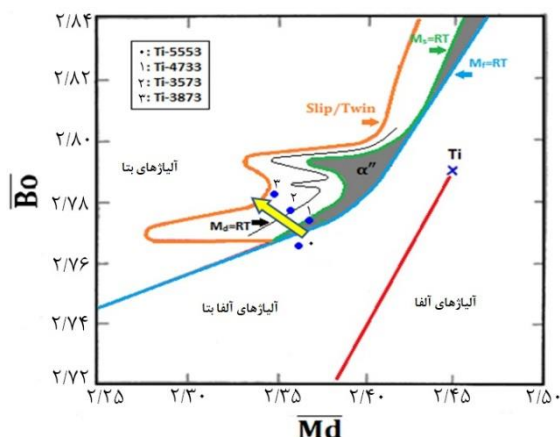
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

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

## ۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم بتا و شبه‌پایدار بتا حاوی عناصر پایدارکننده فاز بتا هستند. این آلیاژها به دلیل داشتن خواصی چون مقاومت به خوردگی عالی، بالاترین نسبت استحکام به وزن در دمای محیط، استحکام خستگی بالا، شکل‌پذیری عالی و قابلیت عملیات حرارتی برای کاربردهای بسیاری به ویژه صنایع هوایی مناسب می‌باشند [1-3]. دستیابی به خواص مکانیکی بالا در آلیاژهای تیتانیوم بتا به دلیل داشتن قابلیت انجام انواع خرجه‌های عملیات ترمومکانیکی گسترده روی آن‌ها میسر است [4].



شکل ۱) محدوده مکانیزم‌های تغییر شکل در نمودار  $B_0 - M_d$  برای آلیاژهای تیتانیوم [5].

آلیاژ نوین Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr در سال ۲۰۱۷ برای اولین بار جهت از بین بردن محدودیت انعطاف‌پذیری آلیاژ Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (Ti-5553) طراحی و تولید شده است. در سال‌های اخیر از روش نیمه تجربی دی الکترون (d-electron) برای طراحی و تولید آلیاژهای تیتانیوم شبه پایدار بتا Ti-5553 جهت افزایش انعطاف‌پذیری و حفظ استحکام استفاده شده است.

این روش بوسیله سطح انرژی اوربیتال d ( $M_d$ ) و مرتبه پیوند ( $B_0$ ) بر اساس نمودار  $B_0 - M_d$  برای آلیاژهای Ti-4Al-7Mo-3V-3Cr (Ti-4733)، Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (Ti-5553) و Ti-3Al-5Mo-7V-3Cr (Ti-3573) و Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr (Ti-3873) با شماره‌های به ترتیب ۰، ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱ ترسیم شده است.

در این نمودار، کمیت  $M_d$  مربوط به الکترونگاتیویته و شعاع فلزی عنصر آلیاژی و کمیت  $B_0$  بیان‌کننده استحکام پیوند کوالانت میان تیتانیوم و عنصر آلیاژی است. گزارش شده است که [5] با افزایش متغیر  $B_0$  و کاهش  $M_d$ ، مکانیزم تغییر شکل از لغزش و استحاله‌ی مارتنزیتی ناشی از تنش به لغزش، استحاله‌ی مارتنزیتی ناشی از تنش و دوقلویی و سپس لغزش تغییر می‌کند.

از طریق نمودار  $B_0 - M_d$  می‌توان با اصلاح ترکیب شیمیایی و پیش‌بینی مکانیزم تغییر شکل بر اساس نوع آلیاژ طراحی شده، خواص مکانیکی را تعیین کرد. مطالعات اولیه روی آلیاژ Ti-3873 نشان داد که آلیاژ مذکور با مکانیزم لغزش تغییر شکل می‌یابد. [6,7]

این آلیاژ در گروه آلیاژهای شبه‌پایدار تیتانیوم بتا قرار دارد و به دلیل شکل‌پذیری مناسب، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مراحل تولید این آلیاژها جهت دستیابی به شکل نهایی، استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مطلوب، عملیات ترمومکانیکی است.

تغییر شکل گرم آلیاژهای تیتانیوم غالباً شامل اعمال تغییر شکل داغ اولیه در منطقه تک‌فاز بتا به منظور از بین رفتن ساختار ریختگی است [8]. پس از آن، تغییر شکل گرم ثانویه در دماهای بالاتر از دمای استحاله بتا و یا در منطقه دوفازی آلفا بتا صورت می‌گیرد. آلیاژهای تیتانیوم در

## ۲- مواد و روش تحقیق

آلیاژ مورد مطالعه با ترکیب Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr طی دو مرحله ذوب و ذوب مجدد در کوره VAR تولید گردید. آنالیز ترکیب شیمیایی آلیاژ به صورت Ti-3.1Al-7.8Mo-7.1V-2.8Cr بدست آمد. به منظور حصول ریزساختار همگن، عملیات حرارتی به مدت پنج ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام شد. بلافاصله شمش مورد مطالعه در همان دمای همگن سازی با کاهش ضخامت به مقدار ۷۰٪ تحت فرآیند نورد داغ قرار گرفت. دمای استحاله آلیاژ با استفاده از روش متالوگرافی و عملیات حرارتی در کوره الکتریکی آذر کوره مدل F2L1500 با توان ۳/۷ Kw/h در محدوده دمایی ۸۰۰-۷۴۰ با فاصله دمایی ۲۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲۰ دقیقه بررسی گردید. نمونه ها بعد از انجام عملیات حرارتی بلافاصله در آب سرد شدند سپس بررسی های ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX 51 انجام شد. نتایج نشان داد به طور کلی دو ریزساختار متفاوت ایجاد شده است. یکی از آن ها در دمای ۷۴۰ °C و به صورت دو فاز آلفا بتا و دیگری در محدوده دمایی ۸۰۰-۷۶۰ °C و به صورت تک فاز بتا مشاهده گردید. بدین ترتیب دمای استحاله بتا در مقدار ۷۵۰ ± ۱۰ °C تعیین شد. همچنین تعیین دمای استحاله بتا با استفاده از نرم افزار JMatPro با در نظر گرفتن نتایج حاصل از آنالیز گاز شبیه سازی شد و تطبیق مناسبی حاصل شد.

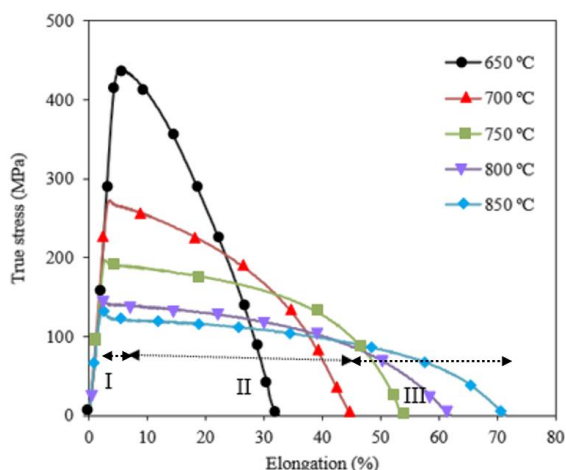
به منظور بررسی رفتار سیلان گرم و تعیین انعطاف پذیری آلیاژ Ti3873، آزمایش کشش گرم در محدوده دمایی ۸۵۰-۶۵۰ °C (مناطق دوفازی آلفا بتا و تک فاز بتا) و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه با فاصله دمایی ۵۰ °C و با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک مدل Instron 8502 مجهز به کوره مقاومتی انجام شد. علت عدم انتخاب دمای کمتر از ۶۵۰، وارد شدن به محدوده ای است که از تغییر شکل گرم خارج شده و کارپذیری کاهش می یابد. علت عدم افزایش دمای آزمایش نسبت به دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد فاصله ۱۰۰ درجه سانتیگرادی حداکثر دمای آزمایش با دمای استحاله است. زیرا در محدوده تک فاز بتا، رشد دانه به دلیل ماهیت فاز بتا روی می دهد. با فاصله گرفتن از این دما و افزایش دما در محدوده تک فاز بتا، رشد قابل ملاحظه دانه منجر به کاهش کارپذیری و همچنین خواص مکانیکی بعد از عملیات حرارتی می شود. از سوی دیگر، افزایش دمای آزمایش کشش و در نتیجه عملیات تغییر شکل در آلیاژهای تیتانیوم به بالاتر از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل میل شدید برهم کنش تیتانیوم با اتمسفر محیط منجر به اکسیداسیون شدید آلیاژ تیتانیوم حین عملیات شکل دهی در دمای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتیگراد می شود. همین امر ضمن کاهش کارپذیری منجر به هدر رفتن آلیاژ تولیدی و همچنین فرسایش تجهیزات شکل دهی می شود. لذا علت عدم انتخاب دمای بالاتر از ۸۵۰ درجه سانتیگراد، رشد قابل ملاحظه دانه و همچنین

فرآیندهای تغییر شکل گرم دو فازی آلفا بتا، تا حدود ۴۰-۵۰ پایین تر از دمای استحاله بتا حرارت داده می شوند و سپس تحت تغییر شکل قرار می گیرند. آزمایش کشش گرم جهت بررسی رفتار تغییر شکل آلیاژی که اطلاعات اندکی در مورد کار گرم آن وجود دارد، استفاده می شود. با استفاده از تغییرات انعطاف پذیری، منحنی های سیلان و همچنین بررسی تحولات ساختاری نمونه های کشش پس از آزمون، محدوده مناسب تغییر شکل گرم آلیاژ تعیین می شود. وقوع پدیده های ترمیم دینامیکی حین تغییر شکل گرم به واسطه ایزوله نمودن ترک ها، انعطاف پذیری ماده تحت کشش را بهبود می بخشد [9]. اطلاعات و مقالات منتشر شده در خصوص آلیاژ Ti-3873 [10-12] مرتبط به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آن پس از انجام عملیات حرارتی است.

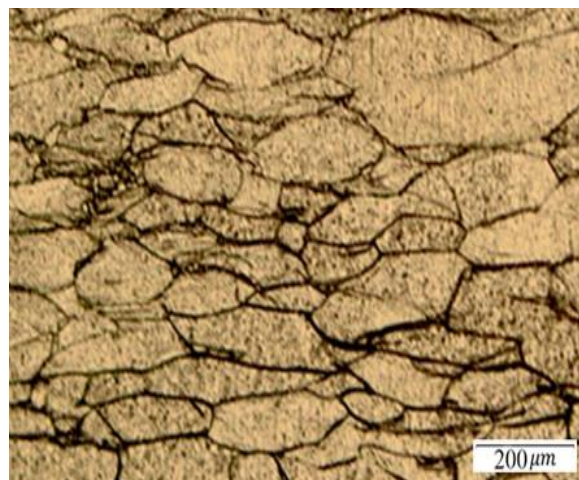
در پژوهشی که توسط نویسندگان به چاپ رسیده است [10]، اثر پیرسازی تک مرحله ای و دو مرحله ای روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Ti-3873 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد انجام آنیل در محدوده دوفازی آلفا بتا و سپس پیرسازی دو مرحله ای منجر به دستیابی به استحکام تسلیم ۱۱۹۰ MPa و انعطاف پذیری ۱۴ درصد شده است.

در مقایسه ای که بین ریزساختار و خواص مکانیکی دو آلیاژ تیتانیوم Ti-3573 و Ti-3873 پس از عملیات کار سرد و پیرسازی انجام گردید، نتایج نشان داد که خواص مکانیکی آلیاژ اول به دلیل بالاتر بودن مقدار مولیبدن است و استحکام کششی حداکثر به مقدار ۱۳۱۴ MPa رسید [11]. در پژوهش دیگری [12]، ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای Ti-3573 و Ti-3873 بعد از ۲۰٪ کاهش سطح مقطع حین تغییر شکل گرم و وقوع تبلور مجدد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استحکام کششی آلیاژ Ti-3873 در دمای بالا نیز به دلیل بیشتر بودن مقدار مولیبدن نسبت به آلیاژ Ti-3573 بیشتر است.

بر اساس مقالات منتشر شده، آزمایش های انجام شده در خصوص ارزیابی رفتار تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-3873 بسیار محدود است. بنابراین فقدان اطلاعات تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-3873 جایگزینی آن را برای Ti-5553 در کاربردهای صنعتی به تاخیر انداخته است. به همین دلیل بررسی رفتار تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-3873 می تواند بخشی از خلاء اطلاعاتی پیرامون فرآوری این آلیاژ را کاهش داده و زمینه ساز کاربرد آن در صنعت گردد. هدف از پژوهش حاضر تعیین انعطاف پذیری آلیاژ Ti-3Al-8Mo-7V-3Cr و در نتیجه منطقه بهینه کارپذیری جهت انجام موفقیت آمیز تغییر شکل گرم آن است.



شکل ۳) نمودار تنش کرنش حاصل از آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873 در مناطق دوفاز آلفا بتا و تک فاز بتا در محدوده دمای °C ۸۵۰-۶۵۰ با نرخ کرنش  $0.1 \text{ s}^{-1}$ .



شکل ۴) ریز ساختار آلیاژ Ti-3873 پس از همگن سازی و نورد داغ در دمای °C ۱۰۰۰.

همانطور که مشاهده می شود، نمودارهای تنش کرنش حاصل از آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873 دارای سه منطقه جداگانه هستند که ناشی از وقوع پدیده های متالورژیکی مهم نظیر کارسختی، ترمیم دینامیکی و گلوپی شدن است. در منطقه (I) پس از عبور از منطقه الاستیک و رسیدن به نقطه تسلیم، تغییر شکل نمونه آغاز می شود. پس از نقطه تسلیم چگالی زیادی از نابجایی های متحرک به وجود می آیند. گزارش شده است که [14] قفل شدن این نابجایی ها در اثر برخورد با یکدیگر و یا برخورد با موانع دیگر نظیر مرز دانه ها، سبب افزایش سریع استحکام در منحنی تنش کرنش می شود.

پدیده کارسختی و قفل شدن نابجایی ها تا رسیدن به تنش حداکثر ادامه می یابد. پس از آن، منطقه دوم (II) آغاز می شود که در دماهای ۶۵۰-۷۵۰ °C (ناحیه دو فاز آلفا بتا با افت شدید تنش و در دماهای ۷۵۰-۸۵۰ °C (ناحیه تک فاز بتا با افت تدریجی تنش همراه است. علت مشاهده منطقه II در ناحیه تک فاز بتا، به وقوع فرایندهای ترمیم دینامیک و برقراری تعادل بین کارسختی و بازیابی هنگام تغییر شکل نسبت داده شده است [15]. گزارش شده است [8] حذف یا آرایش مجدد نابجایی ها منجر به تشکیل مرزهای فرعی یا به عبارت دیگر وقوع بازیابی دینامیک و با وقوع تبلور مجدد دینامیک می شود. بنابراین وسعت منطقه II در دماهای ۷۵۰-۸۵۰ °C، به میزان وقوع فرایند ترمیم دینامیک حین تغییر شکل بستگی دارد. به طوری که هرچه میزان وقوع بازیابی دینامیک و تبلور مجدد دینامیک بیشتر باشد، وسعت منطقه II نیز افزایش می یابد. زیرا وقوع ترمیم دینامیکی سبب افزایش میزان انعطاف پذیری و کارپذیری ماده می شود [15] بنابراین

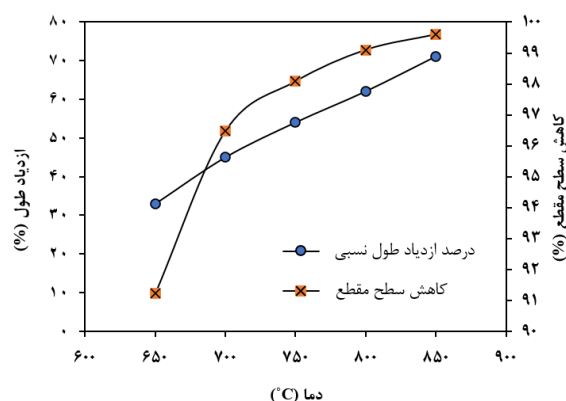
اکسیداسیون آلیاژ است. نمونه های تخت آزمایش کشش گرم مطابق با استاندارد [13] ASTM E8M با ضخامت سه میلیمتر، طول سنج ۲۵ میلی متر، پهنای سنج ۶/۲۵ میلیمتر و طول کلی ۱۰۰ میلیمتر تهیه شدند. ابتدا به منظور رسیدن به شرایط همدمای نمونه ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای آزمایش حرارت داده شده و سپس تا وقوع شکست تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. لازم به ذکر است که پس از آزمایش کشش گرم، برای حفظ ریزساختار دما بالا و امکان بررسی آن، بلافاصله نمونه ها در آب سرد شدند. جهت بررسی ریزساختار، ابتدا سنباده زنی از مش ۶۰ تا ۳۰۰۰ و سپس پولیش انجام شد و در نهایت از محلول با ترکیب  $92\% \text{H}_2\text{O} + 5\% \text{HNO}_3 + 3\% \text{HF}$  به منظور حکاکی نمونه ها استفاده شد. جهت محاسبه اندازه دانه ها از نرم افزار Clemex Vision استفاده شد.

برای بررسی ریزساختاری نمونه های کشش از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA-TESSA استفاده شد. در شکل ۲ ریزساختار اولیه آلیاژ Ti-3873 پس از همگن سازی و نورد داغ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. در این تصویر فاز بتای کشیده شده در جهت نورد با میانگین اندازه دانه ۲۸۰ میکرومتر به خوبی قابل مشاهده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی رفتار سیلان گرم آلیاژ Ti-3873 در مناطق دوفازی آلفا بتا و تک فاز بتا

به منظور بررسی رفتار تغییر شکل آلیاژ Ti-3873، آزمایش کشش گرم در دماهای ۶۵۰، ۷۰۰، ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ با نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه انجام شد. شکل ۳ نمودارهای تنش کرنش حاصل از آزمایش کشش گرم آلیاژ را در مناطق دوفاز آلفا بتا و تک فاز بتا نشان می دهد.



شکل ۴) نمودار تغییرات ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873 برحسب دما.

است. زیرا استحکام کششی آلیاژ Ti-3873 در ناحیه دوفاز وابسته به مورفولوژی و کسر حجمی فاز آلفا است. درحالی که در ناحیه تکفاز بتا، عمدتاً رشد دانه‌های بتا و فعال شدن مکانیزم نفوذی، بر استحکام کششی آلیاژهای تیتانیوم تأثیرگذار است [8]. از سوی دیگر، این امر با ماهیت فازهای آلفا و بتا و ساختار بلوری آنها نیز مرتبط است. فاز آلفا با ساختار کریستالوگرافی هگزگونال فشرده جمعاً ۱۲ سیستم لغزش فعال دارد. درحالی که فا بتا با ساختار کریستالوگرافی مکعبی مرکز پر دارای ۲۴ سیستم لغزش فعال است. در نتیجه مکانیزم تغییر شکل در فاز آلفا با ساختار بلوری HCP متفاوت از فاز بتا با ساختار بلوری BCC است و محققین علت این مسئله را به ساختار بلوری آلیاژهای تیتانیوم در این محدوده دمایی نسبت داده‌اند [11].

### ۲-۳- بررسی ریزساختاری نمونه‌های آزمون کشش گرم.

شکل ۶ ریزساختار نوک نمونه‌های کشش گرم آلیاژ Ti-3873 را به ترتیب در مناطق دوفاز و تکفاز نشان می‌دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش دما از ۶۵۰ تا ۸۰۰ به دلیل عبور از دمای استحاله بتا آلیاژ، کسر حجمی رسوبات فاز آلفا کاهش یافته است و ساختار تکفاز بتا حاصل شده است؛ این امر منجر به افزایش ازدیاد طول نسبی آلیاژ می‌شود.

ریز ساختار شکل‌های ۶-ب و ۶-ج نشان می‌دهد که مرزدهانه‌ها در دماهای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و ۸۵۰ درجه سانتیگراد کشیده شده اند و در قسمت‌های مختلف دندانه دار شده اند. موارد مشابه نیز قبلاً در مورد آلیاژ تیتانیوم بتای Ti-13V-11Cr-3Al و آلیاژ تیتانیوم شبه آلفای IMI834 گزارش شده است [17]. هامفریز و هاترلی معتقدند [15] که حین تغییر شکل گرم، مرزدهانه‌ها به دلیل وجود تنش در مرزهای فرعی و تغییر چگالی نابجایی‌ها، به صورت موضعی مهاجرت می‌کنند. در نتیجه دندانه‌دار می‌شوند؛

هرچه انتقال به منطقه III در کرنش‌های کمتری روی دهد، به معنی میزان وقوع کمتر ترمیم دینامیک و قابلیت کمتر نمونه برای تغییر شکل است. بر این اساس، می‌توان دریافت که وقوع ترمیم دینامیک در محدوده دمای ۷۵۰-۸۵۰ °C (ناحیه تکفاز) سبب افزایش میزان ازدیاد طول نسبی آلیاژ Ti-3873 شده است. درحالی که در دماهای ۷۵۰-۶۵۰ °C (ناحیه دوفازی)، میزان وقوع ترمیم دینامیک و در نتیجه وسعت منطقه II کمتر بوده و آلیاژ ازدیاد طول نسبی کمتری دارد. در نهایت با اعمال کرنش بیشتر، قابلیت تحمل کرنش (تغییر شکل یکنواخت) توسط نمونه در منطقه II به پایان می‌رسد. در نتیجه آغاز تغییر شکل غیریکنواخت و گلوپی شدن، سبب وقوع شکست نمونه در منطقه III می‌شود. از سوی دیگر منحنی سیلان کشش گرم این آلیاژ پدیده تسلیم ناپیوسته را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، تنش سیلان پس از تغییر شکل الاستیک و پیش از ورود به منطقه تغییر شکل پلاستیک، به یک مقدار حداکثر رسیده و بلافاصله دچار افت ناگهانی زیاد شده و سپس به حالت سیلان پایدار می‌رسد. وقوع این پدیده، در تغییر شکل گرم کششی آلیاژهای تیتانیوم بتا دیگر نیز مشاهده شده است. گزارش شده است [16] در صورتیکه نابجایی‌ها به دلیل واکنش با اتم‌های بین‌نشین O, H, N به صورت غیرمتحرک و قفل شده باشند، چگالی نابجایی‌های متحرک کاهش می‌یابد. نتایج آنالیز گاز حضور ۰/۲ درصد عنصر اکسیژن را به صورت اتم محلول بین نشین در آلیاژ Ti-3873 اثبات می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که به دلیل کاهش چگالی نابجایی‌های متحرک، رفتار تسلیم ناپیوسته مشاهده شود. در شکل ۴ نمودار تغییرات ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع نمونه‌های کشش گرم آلیاژ Ti-3873 با دما در نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقدار خطای حاصل از محاسبه کاهش سطح مقطع ۱ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، میزان ازدیاد طول نسبی آلیاژ افزایش یافته و در دمای ۸۵۰ °C به بیشترین مقدار خود، ۷۱ درصد می‌رسد.

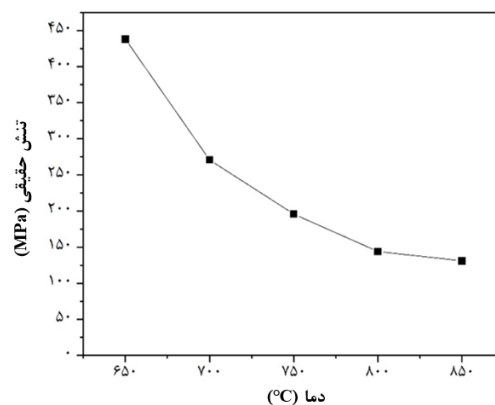
از سوی دیگر تغییرات کاهش سطح مقطع نمونه‌های کشش گرم آلیاژ Ti-3873 در محدوده دمایی ۶۵۰-۷۵۰ °C دارای تغییرات شدید است که می‌تواند ناشی از حذف تدریجی فاز آلفا از زمینه در اثر وقوع استحاله فازی آلفا به بتا باشد.

شکل ۵ نمودار تغییرات بیشینه استحکام کششی شمش آلیاژ Ti-3873 را با دما، نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود، شدت افت تنش حداکثر با دما در ناحیه دو فاز آلفا بتا بسیار بیشتر از ناحیه تکفاز بتا

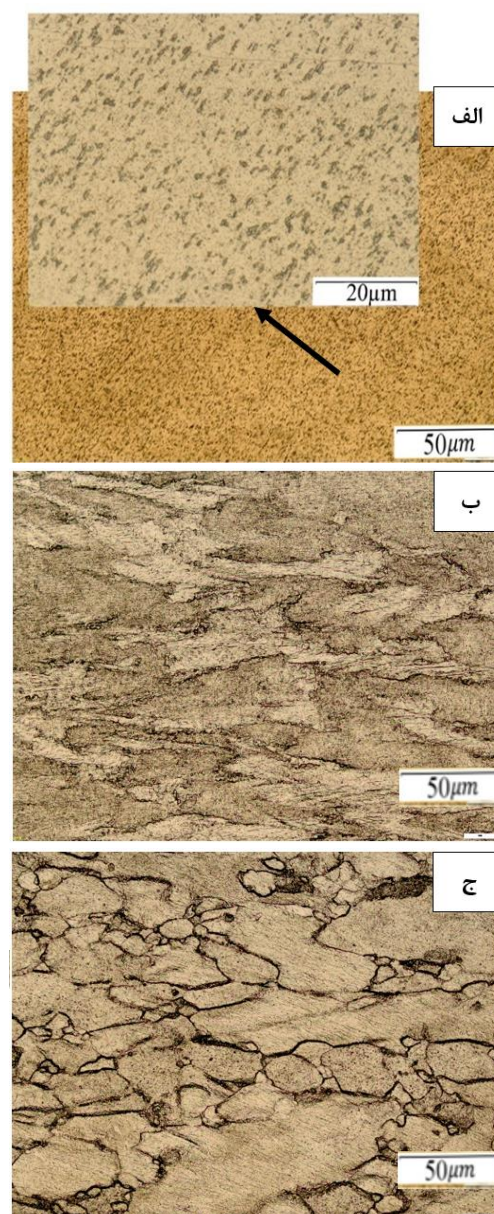
به طوری که طول موج این دندانه‌ها با اندازه دانه‌های فرعی موجود در ریزساختار مرتبط است. از اینرو این دندانه‌دار شدن به عنوان یکی از ویژگی‌های بازیابی دینامیک گزارش شده است. از سوی دیگر، تعداد اندکی دانه‌های تبلور مجدد یافته در مناطق مختلف ساختار نمونه تغییر شکل یافته در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  مشاهده می‌شود. لذا می‌توان دریافت که در این شرایط، بازیابی دینامیک و در ادامه تبلور مجدد دینامیک روی داده است. بنابراین علت اصلی افزایش انعطاف‌پذیری آلیاژ Ti-3873 در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  را میتوان به دندانه‌دار شدن مرزدانه‌ها در ریزساختار نمونه کشش و در نتیجه وقوع بازیابی دینامیک و همچنین وقوع تبلور مجدد حین تغییر شکل گرم آلیاژ نسبت داد. سوزوکی و همکاران<sup>[18]</sup> با بررسی رفتار کشش گرم آلیاژ تیتانیوم شبه بتای Ti-13V-11Cr-3Al در محدوده دمای  $1000-700^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد نیز مشاهده کردند که با افزایش دما تا  $1000^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد به تدریج ازدیاد طول نسبی آلیاژ افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل رشد دانه‌های بتا افت میزان ازدیاد طول نسبی گزارش شد. آنها نیز علت افزایش ازدیاد طول نسبی آلیاژ Ti-13V-11Cr-3Al را در منطقه تکفاز بتا به وقوع بازیابی دینامیک حین تغییر شکل گرم نسبت داده اند.

### ۳-۳- بررسی سطوح شکست نمونه های کشش گرم در منطقه دوفازی آلفا بتا و تکفاز بتا

تصاویر سطوح شکست آلیاژ در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و  $850^{\circ}\text{C}$  در شکل ۷ نشان داده شده است. برای نمونه تغییر شکل یافته در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  جوانه زنی و رشد ریز حفرات و در نهایت به هم پیوستن آنها به یکدیگر و تشکیل دیپل‌ها منجر به وقوع شکست در نمونه شده است. از مکان‌های مرجح برای جوانه زنی ریزحفرات، مرزدانه‌ها، مکان‌های تجمع نابجایی‌ها، ذرات فاز ثانویه و رسوبات موجود در ساختار است. واضح است که بین ریزساختار و سطح شکست ارتباط نزدیکی وجود دارد لذا با بررسی های ریزساختاری می‌توان بیان نمود به علت استحکام بالای فاز آلفا و شکل‌پذیر بودن فاز بتا که منجر به ایجاد فصل مشترک ناهمگن بین فاز آلفا و بتا می‌شود، شکست میتواند از مرزدانه‌های بین این دو فاز آغاز شود<sup>[19]</sup>. با توجه به توسعه ی ساختار دو فازی برای آلیاژ در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  در مقطع شکست دیپل‌هایی مشاهده می‌شود. در بررسی‌های شکست نگاری در منطقه تکفاز بتا در سطح شکست نمونه تغییر شکل یافته در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  مطابق شکل ۷-ب مشاهده می‌شود که در شرایط شکست به اندازه‌ای داکتیل بوده که حفره‌ای در سطح شکست پدیدار نشده است. به عبارت دیگر شکست از نوع موضعی شدن منطقه شکست بوده و با پارگی شدید به صورت نوک مدادی همراه است. تحقیقات اشبی<sup>[20]</sup> در زمینه شکست آلیاژها در دماهای بالا حاکی از آن است، در صورتیکه در یک آلیاژ سطح شکست به یک نقطه ختم شود و هیچ حفره‌ای نیز در آن مشاهده نشود، در نزدیکی منطقه شکست، تبلور مجدد دینامیک روی داده



شکل ۵) تغییرات حداکثر استحکام کششی آلیاژ Ti-3873 با دمای تغییر شکل.



شکل ۶) ریزساختار نمونه‌های کشش گرم آلیاژ Ti-3873 در منطقه دوفازی آلفا بتا در دمای (الف)  $700^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد و منطقه تکفاز بتا در دماهای (ب)  $800^{\circ}\text{C}$  و (ج)  $850^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد در قسمت نوک نمونه‌ها.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش انعطاف‌پذیری و رفتار سیلان آلیاژ نوین Ti-3873 با استفاده از آزمایش کشش دما بالا در نواحی دوفازی و تک‌فاز جهت تعیین پنجره کارپذیری مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج به صورت زیر بدست آمد:

(۱) دمای استحاله بتای آلیاژ Ti-3873 با استفاده از روش متالوگرافی  $750 \pm 10$  درجه سانتیگراد تعیین شد.

(۲) انعطاف‌پذیری حاصل از آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873 در محدوده دمایی ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد به دلیل وقوع استحاله فازی آلفا به بتا و کاهش تدریجی فاز آلفا، از ۳۳٪ به ۵۴٪ افزایش یافت. حداکثر میزان انعطاف‌پذیری به میزان ۷۱٪ در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد بدست آمد.

(۳) شدت افت تنش بیشینه حاصل از آزمایش کشش گرم با افزایش دما در منطقه تک فاز بتا کمتر از منطقه دوفازی آلفا بتا بود که علت آن وابستگی مورفولوژی و کسر حجمی فاز آلفا در منطقه دوفازی، به دما است.

(۴) بررسی ریزساختار نمونه‌های کشش گرم در دمای ۸۵۰-۷۵۰ درجه سانتیگراد نشان داد، بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد جزئی مکانیزم غالب فرآیند ترمیم تغییر شکل گرم کششی آلیاژ Ti-3873 است.

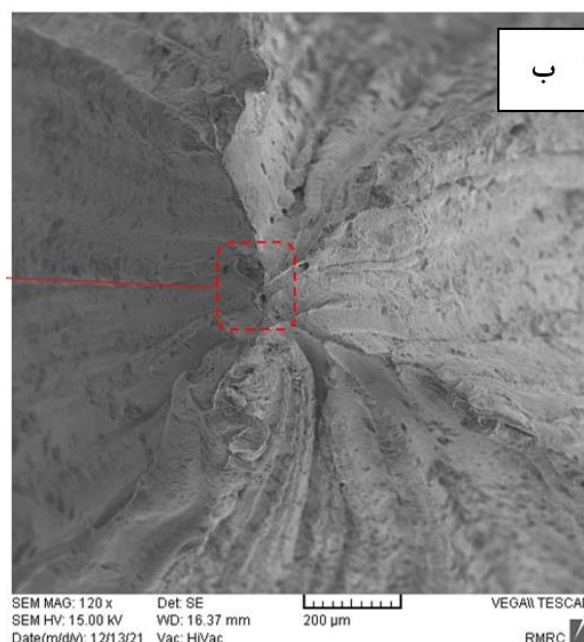
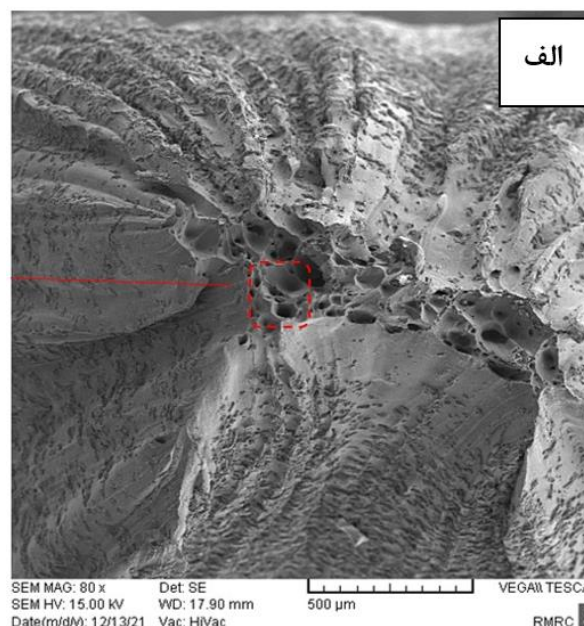
(۵) بررسی شکست نگاری نمونه کشش گرم در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد نشان داد جوانه‌زنی و رشد میکروحفره‌ها و به هم پیوستن آنها و تشکیل دیپل‌ها منجر به وقوع شکست شد. شکست در نمونه تغییر شکل یافته در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد از نوع موضعی شدن منطقه شکست بوده و با پارگی شدید به صورت نوک مدادی بود.

(۶) بررسی نتایج آزمایش کشش گرم در پژوهش حاضر، محدوده دمایی مناسب برای تغییر شکل آلیاژ Ti-3873 را در محدوده دمایی ۸۵۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد نشان داد.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

است. به گونه‌ای که سطح شکست به شکل نوک مدادی ظاهر شده است و به دلیل انعطاف‌پذیری بالای آلیاژ، نوک شکست کاملاً تیز شده است. لذا سطح شکست مشاهده شده در شکل ۷-ب، وقوع تبلور مجدد دینامیک در آلیاژ را در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  که در تصویر ۶-ج نشان داده شده تایید می‌کند. همچنین نتایج تصاویر ۷-ب و ۶-ج با نتایج کاهش سطح مقطع ۹۹ درصد بدست آمده در شکل ۴ برای نمونه تغییر شکل یافته در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  تطابق دارد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش کشش گرم آلیاژ Ti-3873 محدوده مناسب تغییر شکل آلیاژ، منطقه تک‌فاز بتا و محدوده دمایی  $850-800^{\circ}\text{C}$  است.



**شکل ۷)** مطالعات شکست نگاری مربوط به سطح شکست آلیاژ Ti-3873 بعد از آزمایش کشش گرم در دمای (الف)  $650^{\circ}\text{C}$  و (ب)  $850^{\circ}\text{C}$ .

- 18- Suzuki HG, Takakura E, Eylon D. Hot strength and hot ductility of titanium alloys—a challenge for continuous casting process. *Materials Science and Engineering: A*. 1999 May 15;263(2):230-6.
- 19- Konovalenko I, Maruschak P, Prentkovskis O. Automated method for fractographic analysis of shape and size of dimples on fracture surface of high-strength titanium alloys. *Metals*. 2018 Mar 6;8(3):161.
- 20- Ashby MF, Cebon D. Materials selection in mechanical design. *J Phys IV*. 1993 Nov 1;3(C7):C7-1.
- 1- Peters M, Kumpfert J, Ward CH, Leyens C. Titanium alloys for aerospace applications. *Adv Eng Mater*. 2003 Jun 26;5(6):419-27.
- 2- Sachdev AK, Kulkarni K, Fang ZZ, Yang R, Girshov V. Titanium for automotive applications: challenges and opportunities in materials and processing. *JOM*. 2012 May;64(5):553-65.
- 3- Elias CN, Lima JH, Valiev R, Meyers MA. Biomedical applications of titanium and its alloys. *JOM*. 2008 Mar;60(3):46-9.
- 4- Moiseyev VN. Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications. CRC press; 2005 Jul 13.
- 5- Sadeghpour S, Abbasi SM, Morakabati M. Design of a new multi-element beta titanium alloy based on d-electron method. In *TMS 2018 147th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings 2018* (pp. 377-386). Springer International Publishing.
- 6- Sadeghpour S. Improvement of tensile properties of alloy through chemical composition modification and thermomechanical process control [doctoral dissertation]. Malek Ashtar University of Technology; 2017. (in Persian)
- 7- Fanning JC. Military applications for  $\beta$  titanium alloys. *J Mater Eng Perform*. 2005 Dec;14(6):686-90.
- 8- Weiss I, Semiatin SL. Thermomechanical processing of beta titanium alloys—an overview. *Mater Sci Eng A*. 1998 Mar 15;243(1-2):46-65.
- 9- Zhou YG, Zeng WD, Yu HQ. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components. *Mater Sci Eng A*. 2005 Feb 25;393(1-2):204-12.
- 10- 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 Mech Eng*. 2023;23(03):199-208.
- 11- Cai WH, Li Z, Lv KQ, Zhang L. Comparison of the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-3573 and Ti-3873 Alloys after Cold Rolling and Aging Treatment. In *Materials Science Forum 2021 May 10* (Vol. 1026, pp. 3-8). Trans Tech Publications Ltd.
- 12- Lv KQ, Cai WH, Li Z, Nong ZS, Zhang L. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Dynamic Recrystallization of Metastable  $\beta$  Titanium Alloy. In *Materials Science Forum 2022 Jul 18* (Vol. 1064, pp. 177-182). Trans Tech Publications Ltd.
- 13- ASTM E9. Standard test methods for tension testing of metallic materials. Annual book of ASTM standards. ASTM. 2001.
- 14- Jonas JJ, Aranas Jr C, Fall A, Jahazi M. Transformation softening in three titanium alloys. *Mater Des*. 2017 Jan 5;113:305-10.
- 15- Humphreys FJ, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. Elsevier; 2012 Dec 2.
- 16- Dieter GE, Bacon D. Mechanical metallurgy. New York: McGraw-hill; 1976 Dec.
- 17- Ghavam MH, Morakabati M, Abbasi SM, Badri H. Flow behavior modeling of IMI834 titanium alloy during hot tensile deformation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015 Mar 1;25(3):748-58.