# بررسی رفتار تغییرشکل گرم و تحولات ریزساختاری در آلیاژ نزدیک آلفا Ti-8Al-1Mo-1V

فاطمه زرقانی٬، غلامرضا ابراهیمی\*٬، امیر مومنی٬، حمید رضا عزت یور٬ دانشجوی دکتری مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. .) ۲. استاد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۳. دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران. ۴. دانشیار، گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. يست الكترونيك نويسنده مسئول <u>r.ebrahimi@um.ac.ir</u>

### چکیدہ

آلیاژ تیتانیم نزدیک آلفاTi-811 به دلیل خواصی نظیر استحکام ویژه بالا، دانسیته پایین و مقاومت به خوردگی عالی در صنایع هوافضا، خودروسازی و نظامی کاربرد گستردهای دارد. در این پژوهش نمونههای استوانهای با ارتفاع و قطر به ترتیب ۱۲ و ۸ میلیمتر با کمک وایرکات تهیه و برای آزمون فشار گرم به کارگرفته شد. رفتار سیلان آلیاژ Ti-811 با آزمایش فشار گرم در محدودهای از دماها (۹۵۰ ، ۹۷۵، ۱۰۲۰، ۱۰۲۵ و ۲۵ (۱۰۷۵) و نرخکرنش ها (۰/۰۰، ۱/۰، ۱/۰ و-۱s) تحت کرنش ثابت ۶/۰ مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی سیلان نشان داد که نرمی سیلان پیوسته اتفاق می افتد؛ که میزان آن در ناحیه دوفازی، در مقایسه با ناحیه تک فازی بیشتر است. تصاویر ریزساختاری گرفته شده با میکروسکوپ نوری و تحلیلهای مکانیکی نشان داد که مکانیسم های نرمی در ناحیه تک فازیتا، تبلورمجدد دینامیکی فازیتا و در ناحیه دو فازی آلفا+بتا رنج گستردهای از تغییرات ریزساختاری نظیر تغییر فاز دینامیکی، کروی شدن و موجی شدن آلفای لایهای است.

## واژههای کلیدی:

آلیاژ نزدیک آلفا، Ti-811، تغییرشکل گرم، تبلور مجدد دینامیکی، کروی شد،ت.

## Hot deformation characteristic and microstructural evolution of a near alpha alloy Ti-8Al-1Mo-1**V**

# F. zarghani<sup>1</sup>, G.R. Ebrahimi<sup>2\*</sup>, A. momeni<sup>3</sup>, H.R. Ezatpur<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Materials Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. <sup>2</sup>Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup>Association Professor, Department of Materials Science and Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

<sup>4</sup>Association Professor, Department of Engineering Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. \*Corresponding author: r.ebrahimi@um.ac.ir

#### Abstract

Titanium alloy grade Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-811) has been widely applied for many applications such as aerospace, automotive and military industries due to their high specific strength, low density, and excellent corrosion resistance. In this work, cylindrical specimens with a height of 12 mm and diameter of 8 mm were machined for the hot compression tests, the flow stress behavior of near- $\alpha$  alloy Ti-811 was investigated by hot compression testing under conditions of varying temperature (between 950, 975, 1000, 1025, 1050 and 1075 °C), strain rates (0.001, 0.01, 0.1 and 1s<sup>-1</sup>) and true strain up to 0. 6. The stress-strain curves of Ti-811 alloy revealed that the continuous flow softening occurs, anyway, the flow softening amount show greater flow softening in the two phase region as compared to the single phase region. Mechanical testingand optical microscopy analyses indicate that dynamic recrystallization occurred, for single-phase  $\beta$  microstructure. However; a broad variety of microstructure formation mechanisms including allotropic phase transformations, platelet kinking and globularization occurred for two- phase  $\alpha + \beta$  region.

**Keywords:** Near-  $\alpha$  alloy Ti-811; Hot compression; Dynamic recrystallization; globularization.

مقدمه

آلیاژهای تیتانیم به طور خاص آلیاژهای شبهآلفا و آلیاژهای دوفازی به دلیل نسبت استحکام به وزن مطلوب در دمای بالا، تافنس شکست و شکل پذیری و استحکام خزشی بالا به طور گسترده در صنعت هوافضا استفاده مي شوند [٢و٢]. به طور كلي خواصي نظير نسبت استحکام ویژه بالا، انعطاف پذیری مطلوب و مقاومت به خوردگی بالا در تیتانیم و آلیاژهای آن سبب استفاده گسترده آن در صنعت شده است[۳]. در میان آلیاژ های تیتانیم، آلیاژ نزدیک آلفای -Ti-8Al 1MO-1V به اختصار (Ti-811) با خواص دانسیته پایین، مدول یانگ بالا، پایداری حرارتی و قابلیت جوشکاری خوب و بالاترین نسبت استحکام کششی به دانسیته به عنوان یکی از مهمترین مواد برای ساخت تيغههاي كمپرسورهاي موتور هواپيماهاي پيشرفته مورد استفاده است[۴]. اگرچه استحکام کششی آلیاژ برابر با آلیاژ -Ti-6Al 4V است اما استحكام دما بالا و مقاومت به خزش آلياژ Ti-811 از تمام آلیاژهای دوفازی تیتانیم بیشتر است. استحکام ویژه و استحکام خزشی بالا از این آلیاژ سبب به کارگیری آن در محدوده دمایی حدود  $\mathrm{C}^\circ$ ۴۵۰ شده است [۵]. آلیاژ Ti-811 با دارا بودن بهترین ترکیب از مقاومت به خستگی در تعداد سیکل کم و زیاد تمام خواص مورد نیاز برای ساخت تیغههای کمپرسورها و توربینهای بخار را دارا بوده و بهترین گزینه برای ساخت آنها محسوب می شود [۶]. با توجه به اینکه تیغههای توربینهای بخار دارای شکلهای متقارن هستند، بنابراین فرآیند آهنگری گرم که قابلیت تولید شکلهای پیچیده را دارد، فرآیند بهینه برای ساخت آن ها محسوب میشود [۷]. خواص مکانیکی از قطعات ساخته شده با فرآيندهاي ترمومكانيكال تحت تاثير ريزساختار قرار دارد؛ و برای آلیاژهای تیتانیم با توجه به وجود دو فاز آلفا و بتا پارامترهای تغییرشکل نظیر دما، نرخ کرنش و کرنش تاثیر قابل توجهی بر ریزساختار نهایی قطعه میگذارد[۸]، بنابراین درک درست از رفتار تغییر شکل گرم آلیاژها ضروری است. تحقیقات زیادی در مورد بررسی رفتار تغییرشکل گرم آلیاژهای تیتانیم و تاثیر پارامترها بر رفتار سیلان و تحولات ریزساختاری حاصل از تغییرشکل انجام شده است. ماتسوموتو و همکارانش[۹] قابلیت تغییرشکل آلیاژ Ti-64 در طی نورد گرم را مورد بررسی قرار داده و با کمک تصاویر ریزساختاری نشان دادهاند که وقوع تبلورمجدد پیوسته منجر به شکل گیری دانههای ریز و در نهایت دستیابی به آلیاژی ریزدانه با قابلیت تغییر شکل بالا می شود. ذاکاری و وو [۱۰] رفتار کشش گرم چند آلیاژ شامل Ti-811 و Ti-811 و Ti-153 تحت نرخ كرنش بالا را مورد بررسي قرار داده و تشكيل و عدم تشکیل باندهای برشی به ترتیب در آلیاژ Ti-811، Ti-64 و Ti-153 راگزارش کردهاند. جهازی و همکاران[۱۱] وقوع تبلور مجدد دینامیکی در آلیاژ IMI834 در رنج گسترده از دماها و نرخکرنشها مورد تحقیق قرار داده و بر اساس مشاهدات ریزساختاری قبل و بعد از تغییرشکل نتیجه گیری کردهاند که در ناحیه تک فاز تبلورمجدد در کنار بازیابی دینامیکی اتفاق می افتد؛ اما به خاطر کسر حجمی کم از دانههای تبلورمجدد تغییر پارامترهای دما و نرخ کرنش تاثیر زیادی بر میزان کسر

حجمی تبلور مجدد ندارد. لو و همکاران[۱۲] رفتار فورج گرم آلیاژ -Ti 64 را در ساخت تیغههای توربینها با کمک معادلات ریاضی شبیه سازی کرده و با تشخیص نواحی پایدار و ناپایدار برای تغییرشکل، پارامترهای بهینه برای مشاهده بهترین ریزساختار مورد نظر برای پره-های توربینها را گزارش کردهاند. مومنی و عباسی[۱۳] در بررسی تاثیر پارامترها بر رفتار سیلان آلیاژ Ti-64، تبلور مجدد دینامیکی و بازیابی را برای ناحیه تک فازی و کروی شدن آلفای لایهای و نیز تغییر فاز دینامیکی آلفا به بتا را برای ناحیه دو فازی به عنوان تحولات ریزساختاری بیان کردهاند. همچنین با تحلیلهای مکانیکی و کمک پارامترهای نرخ تغییرات کارسختی و پارامتر زنر هولمان وقوع تبلور مجدد به عنوان مکانیزم اصلی منجر به نرمی در ناحیه تک فاز را اثبات کردهاند. گو و همکاران[۱۴] در بررسی رفتار تغییر شکل کشش گرم آلیاژ (Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V (TA15 بیان داشتهاند که دانههای کوچک فاز بتا ناشی از تبلورمجدد در مرزدانهها و نیز در نقاطی که عیوبی نظیر حفره به وجود آمده تشکیل شدهاند. هر چند تحقیقات زیادی در مورد تغییرشکل گرم آلیاژهای تیتانیم انجام شده است، اما تحقیقات در مورد آلیاژ Ti-811 محدود است. به طور مثال شی و همکاران[۵] تاثير عمليات حرارتي پس از تغييرشكل بر ريزساختار و خواص مكانيكي و وضعیت شکست قطعات آلیاژ Ti-811 را مورد بررسی قرار داده و در نهایت پارامترهای بهینه برای دستیابی به ریزساختار بهینه که داری فاز آلفای کروی در زمینه فاز بتا باشد، را مشخص کردهاند. رفتار خستگی سیکل بالا از تینههای توربینها از آلیاژ Ti-811 توسط یانگ و همکاران تحقیق شده است[۱۵]. شنگ و همکاران[۱۶] به بررسی اثر رسوب Ti<sub>3</sub>Al در ریزساختار و اثر گذاری آن بر خواص خوردگی از قطعات ساخته شده از آلیاژ Ti-811 پرداختهاند و برای بهبود وضعیت خوردگی تغییر ریزساختار با کمک عملیات حرارتی را مناسب دانسته اند. با وجود اهمیت قابل توجه آلیاژ Ti-811 و کاربرد آن برای ساخت تیغههای توربینها و نیاز به شناخت رفتار آلیاژ در آهنگری گرم تحقیقات محدودی در این زمینه وجود دارد و رفتار تغییر شکل آن به خصوص در زمینه آهنگری گرم کاملا واضح نیست، بنابراین هدف از این پژوهش بررسی رفتار تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-811 تحت آزمایش فشار گرم و بررسى تحولات ريزساختارى است.

# مواد و روش ها

در این پژوهش، آلیاژ Ti-811 با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ به عنوان آلیاژ پایه انتخاب شد. این آلیاژ با دارا بودن حدود ۸ درصد وزنی آلومینیوم، ۱درصد وزنی وانادیم و ۱درصد وزنی مولیبدن در دسته آلیاژهای نزدیک آلفا قرار می گیرد. در حین فرآیند، آلومینیوم به عنوان پایدار کننده فاز آلفا و وانادیم و مولیبدن به عنوان پایدار کننده فاز بتا عمل می کنند و ریزساختار آلیاژ در دمای اتاق شامل فاز آلفا در زمینه ای از فاز بتا است[۱۲]. در این پژوهش نیز ابتدا با روش آنالیز حرارتی به کمک دستگاه STA 504 دمای استحاله بتا (دمای تبدیل فاز آلفا به فاز بتا) برابر با C

بتا، فرآیند سیکل عملیات حرارتی بتا آنیل طراحی که در طی آن آلیاژ  $m ^\circ C$  به دمایی بالاتر از دمای استحاله بتا گرم شده (در این پژوهش ۱۰۵۰) و برای اطمینان از حصول ساختار تک فاز بتا یک ساعت در این دما نگهداشته شده و سپس در حمام آب همدمای محیط فروبرده شده است. ریزساختار حاصل از این سیکل، دستههایی از فاز آلفای لایهای (رنگ تیره در تصاویر میکروسکوپ الکترونی) در زمینه ای از فاز بتا است که در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور شبیه سازی شرایط آهنگری گرم آزمایش فشار گرم به کار گرفته شد. برای آزمایش فشار در ابتدا استوانه های با ارتفاع و قطر به ترتیب ۱۲ و ۸ میلیمتر با استفاده از وايركات تهيه شدند. آزمون فشارگرم با دستگاه كشش- فشار زوئيك رول مدل Z250 با ظرفیت ۲۵ تن مجهز به کوره مقاومتی(حداکثر دما  $^{\circ}$  دما ) با دقت  $^{\circ}$  دقت  $^{\circ}$  دانجام شد. در این پژوهش برای کنترل دما از ترموکوپل نوع K، در تماس با نمونه و به منظور کاهش اثر اصطکاک در تغییرشکل دما بالا از روان کار پودر گرافیت استفاده شد. آزمون فشار در دماهای ۹۵۰، ۹۷۵، ۱۰۰۰، ۱۰۲۵، ۱۰۵۰ و C ۱۰۷۵ با نرخ کرنش اعمالی ۲۰۰۱۰- ۲/۰۰۱، ۲/۰ و<sup>1</sup>-۱۶ و کرنش حقیقی ۶/۶

انجام شد. برای اجرای آزمون ابتدا نمونهها به دمای تغییرشکل گرم شده و ۱۵ دقیقه در این دما نگهداشته شدند تا ساختار تعادلی ایجاد شود، سپس تغییرشکل انجام و پس از آن به منظور حفظ ساختار حاصل از تغییرشکل نمونهها فورا در حمام آب هم دمای محیط کوئینچ شدند. شکل (۲) طرحوارهای از فرآیند تغییرشکل را نشان میدهد. دادههای حاصل از آزمون فشار به صورت منحنیهای تنش حقیقی\_کرنش محقیقی است که قبل از تحلیل، اثر گرمای حاصل از تغییرشکل بر روی آنها اصلاح شده است. به منظور بررسی ریزساختاری، پس از انجام آماده سازی سطح در محلول (مخلوطی از HNO3 و اس از نسبتهای ۱، ۳و ۶ درصد حجمی)[۴] به مدت زمان ۴۰ تا ۶۰ ثانیه حکاکی شدند. برای تصاویر ریزساختاری از میکروسکوپ نوری مارک الیمپوس مدل GX51 مجهز به دوربین دیجیتال و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Prox



شکل ۱- ریزساختار آلیاژ بعد از کوئینچ از دمای بالاتر از استحاله بتا( C<sup>°</sup>(۱۰۵۰) ، (الف) تصویر میکروسکوپ نوری، (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی.

نتايج

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده

درصد وزنی	عنصر
پايە	Ti
٧/٣۵	Al
۰/۷۵	Мо
۰/۷۵	V
۰/٣	Fe
٠/٠٨	С



شکل۲- طرحواره سیکل اَزمون فشار در کنارعملیات حرارتی فلز یایه.

#### تحليل منحنىهاى سيلان

در تغییر شکل فشار گرم، بخشی از انرژی نغییر شکل به انرژی گرمایی تبدیل می شود، که منجر به افزایش دمای نمونه به خصوص در موادی با رسانایی حرارتی کم می شود. این تغییرات در دما سبب بروز خطاهایی در منحنی سیلان می شود. یکی از این خطاها کاهش قابل توجه سطح تنش پس از تنش حداکثری است. بنابراین منحنیهای سیلان حاصل از آزمایش نمی تواند منعکس کننده رفتار سیلان صحیح از مواد با شد. میزان افزایش دما نا شی از گرمای تغییر شکل به کمک رابطه ۱ محاسبه می شود.

 $\Delta T = \frac{\lambda \eta}{\rho C_p} \int \sigma d\varepsilon$ (١) که در این رابطه  $\Delta T$  افزایش دما،  $\eta$  فاکتور اصلاح آدیاباتیک،  $\sigma$  و  $\mathfrak{T}$ به ترتيب تنش حقيقى(MPa) و كرنش حقيقى، C ظرفيت حرارتي و دانسیته از مواد است  $\lambda$  [1۸].  $\lambda$  برابر با ۰/۹۵، کسر انرژی تغییرشکل hoکه به گرما تبدیل می شود [۱۹]. فاکتور اصلاح آدیاباتیک در نرخ کرنش-های ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰ و <sup>1</sup>-۱۶ به ترتیب تقریبا برابر با ۰، ۲۵/۰، ۵/۰ و ۰/۷۵ است[۲۰]. ظرفیت حرارتی و دانسیته از آلیاژ Ti-811 به ترتیب برابر با j/kg.k و ۴/۳۷ g/cm و ۴/۳۷ است[۱۷]. شکل ۳ میزان افزایش دما تحت اثر دمای تغییرشکل را نشان میدهد. بر اساس شکل در دمای ثابت با افزایش نرخ کرنش میزان تغییر دما افزایش می یابد. با توجه به اینکه، در نرخ کرنش بالا فرآیند تغییرشکل در زمان کوتاهی کامل شده و زمان کافی برای پخش شدن گرما وجود ندارد، میزان افزایش دما در نرخ کرنش های بالا بیشتر است. همچنین در نرخ کرنش ثابت با افزایش دمای تغییرشکل میزان تغییر دما کاهش مییابد. نتایج مشابه در تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-5.5Al-1Fe توسط کویکی[۲۱] گزارش شده است. با توجه به شکل۳ میزان افزایش دما در تغییرشکل آلیاژ -Ti 811 قابل توجه بوده و باید اثر آن بر نمودارهای سیلان اصلاح شود، اما در نرخ کرنش های ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ حداکثر تغییر دما برابر با ۵/۸ است بنابراین می توان از تاثیر گرمای تغییر شکل بر منحنی های سیلان در این نرخ کرنشها صرف نظر کرد. پس از محاسبه افزایش دما ناشی از گرمای تغییرشکل میتوان میزان تغییر تنش سیلان را با رابطه ۲ محاسبه کرد.

 $\Delta \sigma = \frac{Q}{n \alpha R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T}\right)$ (۲) که در این راب طه Q انرژی فعال سازی(KJ/mol)، R ثابت Q میزان افزایش گازها(۸/۳۱۴J/mol.K)، T دمای تغییرشکل،  $\Delta \sigma$  میزان افزایش دما، n توان تنشی و  $\alpha$  ثابت مواد هستند. نحوه اصلاح و محاسبه پارامترهای یاد شده به تفصیل در مرجع[۱۹] آورده شده است. با محاسبه پارامترهای به کار رفته در رابطه ۲ در نهایت اختلاف تنش منحنی در حالت ا صلاح نشده و ا صلاح شده محا سبه می شود. در منحنی در حالت ا صلاح نشده و ا صلاح شده محا سبه می شود. در تغییر شکل (ب) و (ج) منحنیهای سیلان قبل و بعد از اصلاح اثر گرمای سیلان اصلاح شده و منحنیهای حاصل از آزمایش تجربی، اختلاف سیلان اصلاح شده و منحنیهای حاصل از آزمایش تجربی، اختلاف نمی کند، بنابراین اصلاح دمای تغییرشکل، به خصوص در دماهای پایین می شود. علاوه بر این موقعیت تنش ماکزیمم(تنش پیک) تغییر نمی کند، بنابراین اصلاح دمای تغییرشکل قواعد ماکروسکوپی از

تغییرشکل را تغییر نمیدهد. در کرنشهای کم تفاوت دو منحنی بسیار کم است، اما با افزایش کرنش، منحنی اصلاح شده به طور قابل توجهی بالاتر از منحنی ا صلاح نشده قرار می گیرد. منحنی های تنش حقیقی- کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار برای دماهای مختلف و دو نرخ کرنش  $^{-1}$  د $^{-1}$  و  $^{-1}$  الله از اصلاح اثر گرمای تغییر شکل در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس شکلها، پارامترهای تغییرش\_کل بر منحنی های س\_یلان اثر گذار اس\_ت. به طور کلی، تنشهای سیلان با افزایش دمای تغییرشکل کاهش می یابد و با افزایش نرخ کرنش افزایش می یابد. کاهش تنش ســیلان با افزایش دما، را می توان به فعال سازی حرارتی که منجر به تسریع فرآیندهای نفوذ در دماهای بالا می شود نسبت داد [۲۲]. برای تمام و ضعیتهای تغيير شكل، در ابتداى آزمون فشار ، سطح تنش بدون تغيير قابل توجه در کرنش افزایش یافته و به یک مقدار تنش حداکثر میرسد. این افزایش سطح تنش با افزایش کرنش به اثر کرنش سختی نا شی از توليد و تجمع نابجاييها مرتبط است. تنش حداكثر در تمام وضعيتها در كرنشهايي كمتر يا برابر با ۰/۱ مشاهده مي شود. در ادامه فرايند و با افزایش کرنش، سطح تنش سیلان کاهش یافته و کار نرمی اتفاق می افتد و نمودار به یک حالت صاف و پایدار می رسد. نرمی سیلان به دلیل ترکیبی از اثر گرمای تغییر شکل و پدیدههای ریز ساختاری است، که در دماهای پایین مشهودتر است. با توجه به اینکه اثر گرمای تغییر شــكل از منحنی ها حذف شـده دلیل نرمی می تواند تحولات ریز ساختاری نظیر تغییر کاسر حجمی و مورفولوژی فاز آلفا برای ناحیه دو فازی و نیز پدیدهای بازیابی و تبلور مجدد فاز بتا برای ناحیه تک فازی با شد [۲۳]. یک تفاوت قابل توجه در شکل کلی از منحنیهای تنش-کرنش تفاوت مقدار نرمی سیلان است. نرمی سیلان که به صورت اختلاف تنش حالت پایدار با تنش پیک تعریف می شود برای همه وضعیتهای تغییرشکل بالای دمای استحاله بتا کمتر از مقدار نرمی سیلان برای وضعیتهای تغییر شکل پایینتر از دمای استحاله بتا است. منحنیهای سیلان برای تمام دماها و در نرخ کرنش<sup>1</sup>-۰/۰۰۱s دارای دندانههایی است که، نشان دهنده ناپایداری سیلان پلاستیک از مواد است. وجود این منحنیهای دندانهدار در تغییر شکل دمای اتاق و دمای بالا از سایر مواد نظیر آلومینیوم و فولاد [۲۴]و همچنین آلیاژهای تيتانيم IMI834[٢٥] و Ti-64 [٢٣] گزارش شده است. براي تحليل نمودار ها دو وضعیت تغییر شکل در ناحیه تک فاز بتا و تغییر شکل در ناحیه دوفازی در نظر گرفته می شود. در طول تغییر شکل در ناحیه تک فاز بتا و نرخ کرنش<sup>1</sup>-۰/۰۰۱۶ ، تمام منحنی های سیلان شامل یک نقطه حداکثری ه ستند که با ادامه تغییر شکل به حالت صاف و پایدار می رسد. به طور کلی، وجود این نقطه حداکثر در منحنی ها نشان دهنده پدیده تبلورمجدد در حین تغییر شکل است[۲۶]. مومنی و عبا سی[۱۳] در تغییر شکل آلیاژ Ti-64 نتیجه مشابه دررفتار سیلان گزارش کرده و وجود نقطه حداکثری را ناشی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی در فاز بتا دانستها ند. اما در نرخ کرنش برابر با ۱s<sup>-1</sup> منحنی های س\_یلان برخلاف منحنی ها در نرخ کرنش <sup>1</sup>-۰/۰۰۱،

بدون نقطه حداکثری ظاهر می شوند. صاف بودن منحنیها و عدم وجود نقطه تنش حداکثری نشان دهنده پدیده بازیابی دینامیکی فاز بتا در نرخ کرنشهای بالا است. اما در طول تغییر شکل در ناحیه دوفازی، تمام منحنی ها نقطه تنش حداکثری و به دنبال آن افت در تنش سیلان را نشان میدهند که با توجه به وجود دو فاز میتواند حاکی از فاز دینامیکی، تغییر مورفولوژی فاز آلفا نظیر کروی شدن و موجی شدن لایههای آلفا با شد. یک نکته قابل ذکر در مورد رفتار منحنیها در دمای  $\Omega^{\circ}$ ۰۰۰۰، تفاوت شکل منحنی در نرخ کرنش پایین و بالا است. بر اساس شکلها منحنی سیلان در دمای  $\Omega^{\circ}$ ۰۰۰۰ و نرخ کرنش <sup>1-</sup> ۲۰۰۰۰ دارای یک نقطه تنش حداکثری وا ضح است که با

افزایش کرنش نرمی سیلان اتفاق میافتد اما با افزایش نرخ کرنش به <sup>1</sup>-۱۵، این نقطه تنش حداکثری کاملا از بین رفته و ومنحنی م شابه با منحنیهای ناحیه تک فاز صاف است. این پدیده میتواند بیانگر تغییر فاز دینامیکی فاز آلفا به بتا و وقوع بازیابی دینامیکی در ریزساختار با شد. در پدیده تغییر فاز دینامیکی، به سبب کرنش دمای تغییر شکل افزایش یافته و شرایط برای تشکیل فاز پایدار در دمای بالا(فاز بتا) را فراهم می آورد[۲۲]. علاوه بر شکل ظاهری منحنیهای سیلان، بر اساس پارامترهای دیگری نظیر تغییرات نرخ کار سختی و نیز محاسبه تنش بحرانی میتوان وقوع پدیده های تبلورمجدد و بازیابی دینامیکی را مورد بررسی قرار داد که در ادامه آورده شده است.



شکل۳. الف) تغییرات دمایی ناشی از تغییرشکل در دماها و نرخکرنشهای مختلف، ب) تغییرات منحنی های سیلان بعد از اصلاح اثر گرمای تغییرشکل در دماهای مختلف و نرخکرنش ثابت<sup>1</sup> s ۱، ج) تغییرات منحنی های سیلان در نرخکرنشهای مختلف و دمای ثابت ℃ ۹۵۰.



شکل۴- منحنیهای تنش حقیقی- کرنش حقیقی برای آلیاژ Ti-811 در دو نرخ کرنش، الف) ۱۰۰/۰۰ و ب) ۱۶<sup>-۱</sup>.

# تحليل ترموديناميكي نتايج مكانيكي

تغییرات نرخ کارسختی (θ یا همان شیب منحنی تنش-کرنش) با کرنش در شکل (۵) می تواند وقوع یا عدم وقوع تبلور مجدد را مشخص کند. در شکل(۵) منحنیهای نرخ کارسختی بر حسب کرنش برای دمای °C ۱۰۷۵ به عنوان نماینده ناحیه تک فازی رسم شده است. بر اساس شکل برای تمام وضعیتها، مقدار پارامتر θ در ابتدا زیاد است که نشان دهنده غلبه کارسختی در مراحل اولیه تغییر شکل است، اما با افزایش کرنش نرخ کارسختی کاهش یافته و به صفر میرسد. کرنشی که در آن نرخ کارسختی برابر با صفر میشود به عنوان کرنش حداکثری تعریف میشود، که در شکل با فلشep مشخص شده است و نقطه آغازین نرمی سیلان است. در ادامه و با افزایش بیشتر کرنش، نرخ کارسختی همچنان کاهش یافته و منفی می شود که نشان دهنده وقوع پدیدههای ریزساختاری منجر به نرمی سیلان است. بر اساس نتایج ارائه شده در تحقیقات [۱۳] [۲۷] وقتی منحنیهای نرخ کارسختی در نرخ-کرنشهای مختلف همگی در یک کرنش تقریبا یکسان به صفر برسند، این عامل منعکس کننده کرنش حداکثری یکسان برای تمامی نرخ-كرنشها است. بنابراین، كرنش حداكثري براي شروع نرمي سيلان به نرخ کرنش و در نتیجه به پارامتر زنر هولمان وابسته نیست. چنین رفتاری در تضاد با آلیاژی است که تبلورمجدد در آن اتفاق میافتد. اما زمانیکه در ریزساختار تبلورمجدد دینامیکی اتفاق بیفتد منحنیهای نرخ کارسختی در کرنشهای مختلف به صفر میرسند، به عبارتی کرنش حداکثری وابسته به نرخ کرنش و در نتیجه وابسته به پارامتر زنر هولمان است. منحنی های نرخ کارسختی بر حسب کرنش برای دمای  $^\circ\mathrm{C}$ در کرنش های متفاوت به صفر رسیده است که نشان دهنده وقوع تبلور مجدد در ریزساختار است. همچنین می توان به کمک رابطه (۳) مقدار یارامتز زنر هولمان را محاسبه کرده و مقادیر یارامتر زنر بر حسب کرنش پیک را رسم کرد.

# $Z = \dot{\varepsilon} Exp(\frac{Q}{RT})$

(۳)

در این رابطه Q انرژی فعال سازی است که از داده های حاصل از منحنیهای سیلان محاسبه میشود، T دمای تغییرشکل بر حسب کلوین و R ثابت گازها است. مقادیر انرژی فعال سازی برای ناحیه

دوفازی و تک فازی متفاوت و به ترتیب برابر با ۷۳۰ و ۱۹۴۴ است که با جایگذاری این مقادیر و مقادیر نرخ کرنش در رابطه پارامتر زنر محاسبه میشود. شکل ۵(ب) وابستگی کرنش پیک به پارامتر زنر هولمان برای ناحیه دوفازی و تک فازی را نشان میدهد که بر اساس شکل مشخص است در ناحیه تک فازی بین کرنش حداکثری و پارامتر زنر هولمان رابطه برقرار است در حالی که در ناحیه دوفازی ارتباط وجود ندارد. بنابراین نرمی سیلان در ناحیه دو فازی ناشی از پدیدههایی جز ناحیه تک فازی مشاهده میشود ناشی از تبلور مجدد و بازیابی ناحیه تک فازی مشاهده میشود ناشی از تبلور مجدد و بازیابی دینامیکی حین تغییرشکل است. همانطور که در منحنیهای سیلان نیز مشاهده شد برای ناحیه تک فازی منحنیها در نرخ کرنش <sup>1-</sup>s دارای نقطه تنش حداکثری هستند که با افزایش نرخ کرنش به <sup>1-</sup>s منحنیها صاف و بدون نقطه حداکثری ظاهر میشوند که نشان دهنده غلبه بازیابی دینامیکی است.

در اخر رسم منحنیهای نرخ کارسختی و قرینه مشتق آن نسبت به تنش، به ترتیب وقوع بازیابی یا تبلور مجدد در ریزساختار و تنش بحرانی برای شروع آنها در ناحیه تک فازی و تایید گفتههای پیشین را مشخص می کند. در شکل (۶) منحنی تغییرات نرخ کارسختی بر حسب تنش برای دمای  $^{\circ}C$  ۱۰۵۰ و نرخ کرنش  $^{-1}$  s<sup>-1</sup> مشاهده می شود، منحنی از سه بخش تشکیل شده است که دو بخش آن تقریبا خطی و بخش سوم غیرخطی است. برای بخش خطی اول، در تنشهای کم با افزایش سطح تنش نرخ کار سختی با سرعت کاهش می یابد. به عبارتی شیب بخش اول با رسیدن به یک کرنش بحرانی کاهش یافته و بخش خطی دوم آغاز می شود. این کرنش، در حقیقت کرنشی است که تشکیل دانههای فرعی آغاز شده و بازیابی دینامیکی آغاز میشود که در شکل(۶) با فلش مشخص شده است. پس از این نقطه شیب منحنی همچنان کاهش می یابد تا در انتهای ناحیه خطی دوم و رسیدن به تنش بحرانی(oc)، تبلور مجدد دینامیکی آغاز شود. تنش بحرانی برای هر وضعیت تغییر شکل برابر با تنشی است که در آن منحنی قرینه مشتق نرخ کارسختی(منحنی نقطه چین) بر حسب تنش یک نقطه حداقل را نشان دهد.



شکل ۵- الف) منحنیهای نرخ کارسختی بر حسب کرنش در دمای C°<sup>۵٬</sup>۷۰ و ب) ارتباط بین کرنش حداکثری و پارامتر زنر هولمان.

پس از این نقطه، نرخ کار سختی دوباره با سرعت بیشتری کاهش یافته و به نقطه تنش حداکثری(op)، که در آن نرخ کارسختی برابر با صفر است، میرسد. در نهایت برونیابی از بخش خطی نمودار، محور تنش بر اساس این توضیحات اگر در ساختار تبلور مجدد دینامیکی اتفاق بیفتد، منحنی  $\sigma$ – $\theta$  در شکل(r) به صورت خط پر است، اما اگر بازیابی ديناميكي اتفاق بيفتد منحني به صورت خط چين است[٢٨]. منحنى-های تغییرات نرخ کارسختی بر حسب تنش در دماها و نرخ کرنشهای مختلف به صورت مجموع در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده میشود در تمامی دماها و در نرخ کرنشهای کمتر از ۱-۰/۱۶ شکل ظاهری منحنیها مشابه با منحنی وقوع تبلور مجدد است، اما با افزایش نرخ کرنش به <sup>-I</sup> s تغییر شیب منحنیها نشاندهنده رفتار بازیابی دینامیکی است. قابل ذکر است که با افزایش دما تمایل به بازیابی بیشتر و تبلور مجدد کمتر میشود. همچنین به طور کلی با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش(افزایش مدت زمان پخش حرارت) به دلیل کاهش چگالی نابجاییها در اثر بازآرایی و حذف، نرخ کارسختی کاهش می یابد. نتایج مشابه در تغییر شکل گرم آلیاژ Ti-64 توسط پورتانوید و همکاران [۲۹] گزارش شده است.

را در تنش اشباع(σ<sub>s</sub>)، که برای پیش بینی فرایند بازیابی به کار میرود، قطع می کند.



شکل۶- منحنیهای تغییرات نرخ کارسختی Ti-811 (منحنی خط پر) و مشتق آن (منحنی نقطه چین) نسبت به تنش حقیقی در دمای -C<sup>\*</sup>۱۰۵۰ و نرخ کرنش<sup>I-</sup>s ۰/۱



شکل ۷- تغییرات نرخ کارسختی آلیاژ Ti-811 در دماها و نرخ کرنشهای متفاوت.

### مشاهدات ريزساختاري

تحلیلهای مکانیکی به خوبی نشان داد که در ناحیه تک فاز بتا دو پدیده بازیابی و تبلورمجدد دینامیکی به ترتیب در نرخ کرنشهای بالا و پایین اتفاق میافتد، در ادامه تصاویر ریزساختاری نیز تایید کننده این پدیدهها در ناحیه تک فاز هستند. تصاویر ریزساختار ناحیه تک فاز بتا برای دمای  $^\circ$  ۲۰۵۰ و نرخ کرنش $^{-1}$ ۰/۰۰۱۰ در شکل (۸) نشان داده شده است. بر اساس شکل در نرخ کرنش ۰-۰ ۰/۰۰۱ ریزساختار شامل دانههای کشیده شده<sup>۲</sup> فاز بتا است که با دانههای کوچک حاصل از تبلور مجدد احاطه شدهاند. وجود اين ريز ساختار تاييد كننده وقوع تبلور مجدد در ناحیه تک فاز بتا است. قابل ذکر است که دانههای کوچک تبلورمجدد كسر حجمى كمى از ريزساختار را به خود اختصاص مىدهند که دلیل آن نرخ بالای بازیابی و نفوذ در خود سریع فاز بتا است[۲۵][۲۸]. ریزساختار برای دمای C ۱۰۷۵ در دو نرخ کرنش<sup>-</sup>s ۰/۰۰۱<sup>1</sup> و<sup>1-</sup>۱۶در شکل(۹) نشان داده شده است. بر اساس شکلها در نرخ کرنش<sup>1</sup>-۰/۰۰۱s ریزساختار شامل دانههای کوچک تبلورمجدد است که با افزایش نرخ کرنش به <sup>۱</sup> s<sup>-1</sup> تنها دانههای کشیده شده قابل مشاهده است که نشان از وقوع بازیابی دینامیکی است. دلیل این پدیده اثر زمان با تغییر نرخ کرنش است، در نرخ کرنش های پایین زمان کافی برای رشد دانه های تبلور مجدد وجود دارند اما در نرخ کرنش بالا هرچند چگالی نابجایی بالاتر است اما به دلیل زمان کوتاه تغییرشکل تنها

بازآرایی نابجاییها اتفاق میافتد و دانه های جدید ایجاد نمی شود یا در صورت ایجاد، فرصت کافی برای رشد ندارد. تحقیقات دیگر درزمینه تغییرشکل آلیاژهای تیتانیم در محدوده تک فاز بتا نیز هر چند وقوع تبلور مجدد دینامیکی را گزارش کردهاند اما بیان داشتهاند که دانههای حاصل از تبلور مجدد کسر کمی از ریزساختار را بعه خود اختصاص میدهند . جهازی و همکاران[۱۱] و وانجارا و همکاران[۳۰] در تغییرشکل گرم آلیاژ نزدیک آلفا IMI834 بازیابی دینامیکی در کنار تبلور مجدد جزئی را به عنوان مکانیزمهای تغییرشکل در دماهای بالاتر از استحاله بتا گزارش کردهاند. هان و همکاران[۳۱] در تغییرشکل آلیاژ نزدیک آلفا، Ti600 وقوع بازیابی دینامیکی در وضعیت بتا فورج را تاکید کردهاند. وقوع بازیابی به ساختار bcc و نیز انرژی نقص چیده شدن بالا از فاز بتا مربوط است[۳۲]. در ادامه شکل(۱۰) ریزساختار دماهای C °C، C، دماهای C °C، و C ۹۷۵ را نشان میدهد. همانطور که پیش از این گفته شد دمای استحاله بتا برای این آلیاژ برابر با  $^\circ$ ۱۰۳۰ پیش از این گفته شد دمای استحاله بتا برای این آلیاژ  $^\circ$ تخمین زده شد؛ بنابراین ریزساختار دمای  $^{\circ}C$  ۱۰۲۵ باید شامل دو فاز آلفا و بتا باشد اما مشاهدات ریزساختاری(شکل ۱۰ الف) برای این دما مشابه با دماهای ناحیه تک فاز بتا است. دلیل این پدیده تغییر فاز دینامیکی ناشی از کرنش است. در این پدیده گرمای حاصل از تغييرشكل

<sup>3</sup> Rex grain

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Elongated grain



شکل۸- ریزساختار دمای <sup>C</sup> ۱۰۵۰ و نرخ کرنش<sup>1</sup> ۲۰۱۰ ، حضور دانههای کشیده شده در جهت عمود بر محور فشار و دانههای کوچک تبلور مجدد روی مرزدانهها.



شکل۹- ریزساختار در دمای ℃۱۰۷۵ و نرخ کرنش الف) <sup>1</sup> s<sup>-1</sup>(۰۰٬۰۰۰، ب) s<sup>-1</sup> l s.

تغییرشکل منجر به افزایش دمای تغییرشکل به بالاتر از دمای استحاله بتا شده که در نتیجه آن فاز آلفا به فاز بتا تبدیل می شود و بعد از کوئینچ مشابه با وضعیت بتا آئیل ساختار لایهای مشاهده می شود. در مورد دمای  $\Omega^{\circ}N10$  این پدیده سبب شده که با افزایش دما به بالاتر از دمای استحاله تمام فاز آلفا به فاز بتا تبدیل شود که بعد از تغییرشکل و کوئینچ به صورت دانههای کشیده شده از فاز بتا مشاهده می شود. لازم به ذکر است که مشابه با ناحیه تک فاز بتا در نرخ کرنش<sup>1</sup>-۷۰۰۱۶ تبلورمجدد است که مشابه با ناحیه تک فاز بتا در نرخ کرنش<sup>1</sup>-۱۰۱۵ تبلورمجدد انواق افتاده و منحنی سیلان نیز نقطه حداکثری را نشان می دهد و در بدون نقطه حداکثری ظاهر شده است (شکل ۲۰). شکل (۱۰ ب و چ) نشان دهنده ریزساختار ناحیه دو فازی برای دو دمای  $\Omega^{\circ} 0.00$  و  $\Omega^{\circ}$ بدون نقطه حداکثری ظاهر شده است (شکل ۲۰). شکل (۱۰ ب و چ) مشان دهنده ریزساختار ناحیه دو فازی برای دو دمای  $\Omega^{\circ} 0.00$  و  $\Omega^{\circ}$ بدان دهنده ریزساختار ناحیه دو فازی برای دو دمای  $\Omega^{\circ} 0.000$  و  $\Omega^{\circ}$ بدان دمای  $\Omega^{\circ} 0.000$  و آلفای لایه ای به عنوان اصلی ترین پدیده مطرح است که با عنوان تبلور مجدد هندسی نیز شناخته می شود. در دمای  $\Omega^{\circ} 0.0000$  که در است (آلفا کامل و واضح است ام با

کاهش دما از ۱۰۰۰ به  $\tilde{D}^{\circ}$ ۹۵۰ تنها موجی شدن لایههای آلفا که به عنوان مراحل مقدماتی برای کروی شدن به شمار می روند، مشاهده می شوند. همچنین کاهش کسر حجمی فاز آلفا با افزایش دما نشان از تغییر فاز دینامیکی فاز آلفا به بتا در حین تغییر شکل است. محاسبات نشان داد که کسر حجمی فاز آلفا برای دمای  $\tilde{D}^{\circ}$ ۹۵۰ برابر با ۸۱٪ است که با افزایش دما به  $\tilde{D}^{\circ}$ ۱۰۰۰ به ۲۱٪ کاهش می یابد. در تحلیل منحنی های سیلان گفته شد که در دمای  $\tilde{D}^{\circ}$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش<sup>1-</sup>۵۶، منحنی صاف و بدون افت در تنش است، که دلیل آن افزایش قابل کرنش کسر فاز بتا در اثر تغییر فاز دینامیکی است به طوریکه در این نرخ کرنش کسر فاز بتا برابر با ۸۸٪ محاسبه شد. بر اساس نتایچ ارائه شده برای پرههای توربینها و کمپرسور ها دمای  $\tilde{D}^{\circ}$ ۰۰۰ می تواند دمای مناسب برای تغییر شکل باشد. در ساخت این پرهها نیاز به ساختار بایمودال از فاز آلفا و بتا است که ساختار لایهای تامین کننده مقاومت

به خزش بالا و فاز آلفای هم محور تامین کننده مقاومت به خستگی سیکل بالا است که این مهم در ریزساختار دمای C°۲۰۰۰ محقق شده

است و فاز آلفای هم محور در زمینه ای از فاز بتای لایه ای قرار گرفته است.



شکل۱۰− ریزساختار حاصل از تغییرشکل در نرخ کرنش ثابت <sup>1</sup>-۱۰ ۲۵ ۲۰۰۰ و دماهای ، الف) C °C (۰۰ ۲۰۰۰ ، ب) C °C ۹۷۵.

### نتيجه گيري

در این پژوهش رفتار تغییرشکل گرم آلیاژ Ti-811 با استفاده از آزمون فشار گرم در محدوده دمایی °۵۰ تا °۱۰۲۵۰ و نرخ کرنش ۰۰۰۰۱ تا<sup>۱</sup>-۱۶ تحت کرنش ثابت ۶/۶ مورد مطالعه قرار گرفت. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق را میتوان به صورت زیر عنوان نمود.

 منحنی های سیلان نشان داد که برای تمامی دماها پس از نقطه حداکثر تنش نرمی سیلان اتفاق می افتد، که با توجه به حذف اثر گرمای تغییر شکل از منحنی ها تحولات ریز ساختاری سبب این پدیده است.

۲) تمامی دماهای ناحیه تک فاز در نرخ کرنش<sup>1</sup> s ۰/۰۰۱ نقطه تنش حداکثری را در کرنش هایی کمتر از ۰/۱ نشان دادند که پس از آن منحنی دچار افت تنش شده و در نهایت به حالت پایدار تبدیل می شود که این نشانه ها مشابه با وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ریزساختار است.

۳) تحلیلهای مکانیکی نظیر منحنی ¬های نرخ کارسختی بر حسب کرنش نشان داد که کرنش حداکثری برای دماهای ناحیه تک فاز متفاوت و وابسته به پارامتر زنر هولمان است در حالیکه برای دماهای ناحیه دو فازی کرنش حداکثری تقریبا ثابت است که این موضوع تایید کننده وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه تک فاز بتا و وقوع تحولاتی غیر تبلور مجدد در ناحیه دو فازی است.

-۴) منحنیهای نرخ کارسختی بر حسب تنش نشان داد که برای ناحیه تک فازی در نرخ کرنشهای کمتر از <sup>۱</sup>-۱۰ تبلور مجدد دینامیکی و در نرخ کرنشهای بالاتر از <sup>۱</sup>-۱/۱۶ بازیابی دینامیکی اتفاق می<sup>¬</sup>افتد.

۵) در ناحیه دو فازی پدیده کروی شدن و وموجی شدن لایه های آلفا در کنار تغییر فاز دینامیکی ناشی از کرنش مهمترین پدیده های ریزساختاری هستند. References:

[1] L. J. Huang, L. Geng, A. B. Li, X. P. Cui, H. Z. Li, and G. S. Wang, "Characteristics of hot compression behavior of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy with an equiaxed microstructure," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 505, pp. 136–143, 2009.

[2] Z. Ding, Z. Jiao, Metallic Materials for Making Multi-Scaled Metallic Parts and Structures, *Elsevier Ltd.* vol. 1, pp. 1-20, 2020.

[3] I. J. Polmear, Light Alloys, 4<sup>th</sup>ed. Melbourne, Australia, 2006.

[4] H. G. Wang, F. Wang, and Y. P. Song, "Effects of heat treatment on microstructures and properties of Ti811 alloys," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 119, pp. 1032–1035, 2012.

[5] X. Shi, W. Zeng, Y. Long, and Y. Zhu, "Microstructure evolution and mechanical properties of near- a Ti-8Al-1Mo-1V alloy at different solution temperatures and cooling rates," *J. Alloys Compd.*, vol. 727, pp. 555–564, 2017.

[6] B. Saha, B. Jana, J. S. Yadav, and C. H. R. Krishna, "Development and certification of Ti-8AI-1Mo-IV alloy for HP compressor blades for Adour engine applications," *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 19, pp. 661 669, 1996.

[7] G. S. Prabhunandan and H. V Byregowda, "Study on Ti-8Al-1Mo-1VAlloy (Near Alpha Alloy) Steam Turbine Rotor Blade using FEA," *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Multidisciplinary Research & Practice (41CMRP-2017)*, India. vol. 3, pp. 28–30, 2017.

[8] G. J. Tchein *et al.*, "Analytical modeling of hot behavior of Ti-6Al-4V alloy at large strain," *Mater. Des.*, vol. 161, pp. 114–123, 2019.

[9] H. Matsumoto, K. Yoshida, S. H. Lee, Y. Ono, and A. Chiba, "Ti-6Al-4V alloy with an ultrafine-grained microstructure exhibiting low-temperature-high-strain-rate superplasticity," *Mater. Letters.*, vol. 98, pp. 209–212, 2013.

[10] M. Zakaria and X. Wu, "Response of titanium alloys to high strain rate deformation," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 225–231, 2005.

[11] P. Vo, M. Jahazi, and S. Yue, "Recrystallization during thermomechanical processing of IMI834," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39, pp. 2965–2980, 2008.

[12] S. Luo, D. Zhu, L. Hua, D. Qian, S. Yan, and F. Yu, "Effects of Process Parameters on Deformation and Temperature Uniformity of Forged Ti-6Al-4V Turbine Blade," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, pp. 4824–4836, 2016.

[13] A. Momeni and S. M. Abbasi, "Effect of hot working on flow behavior of Ti-6Al-4V alloy in single phase and two-phase regions," *Mater. Des.*, vol. 31, pp. 3599–3604, 2010.

[14] X. Zhou, K. Wang, S. Lu, X. Li, R. Feng, and M. Zhong, "Flow behavior and 3D processing map for hot deformation of Ti-2.7Cu alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 2652–2661,2020.

[15] K. Yang *et al.*, "Very high cycle fatigue behaviors of a turbine engine blade alloy at various stress ratios," *Int. J. Fatigue*, vol. 99, pp. 35–43, 2017.

[16] S. Cao, C. Voon, S. Lim, B. Hinton, and X. Wu, "Cracking properties of a Ti-8Al-1Mo-1V alloy," *Corro. Sci.*, vol.7, pp. 1–12, 2016.

[17] R. Boyer and G. Welsch, *Materials Properties Handbook* : *Titanium Alloys*, 4<sup>th</sup>ed, 2007.

[18] H. Monajati, M. Jahazi, S. Yue, and A. K. Taheri, "Deformation Characteristics of Isothermally Forged UDIMET 720 Nickel-Base Superalloy," *Metall. Mater. Trans A*, vol. 36, pp. 895–905, 2005.

[19] Y. Ma, F. Zhao, J. He, and J. Wang, "Correction of Flow Stress for Hot Compression of INCO718 Alloy," *International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2015)*, China, pp. 1431–1436, 2015.

[20] B. Guo, S. L. Semiatin, J. J. Jonas, and S. Yue, "Dynamic transformation of Ti–6Al–4V during torsion in the two-phase region," *J. Mater. Sci.*, vol. 53, pp. 9305–9315, 2018.

[21] J. Koike, Y. Shimoyama, T. Okamura, and K. Maruyama, "Superplasticity assisted by stress-induced phase transformation in Ti-5.5AI-1Fe alloy," *Mater. Sci. Forum*, vol. 304–306, pp. 183–188, 1999.

[22] Y. Su, F. Kong, F. You, X. Wang, and Y. Chen, "The high-temperature deformation behavior of a novel near- $\alpha$  titanium alloy and hot- forging based on the processing map," Vacuum, Vol. 173, PP.1-30, 2019.

[23] Z. X. Zhang, S. J. Qu, A. H. Feng, J. Shen, and D. L. Chen, "Hot deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy: Effect of initial microstructure," *J. Alloys Compd.*, vol. 718, pp. 170–181, 2017.

[24] P. Vo, "Flow and microstructure development of a near-alpha titanium alloy during thermomechanical processing," *Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*, Canada, 2009.

[25] P. Wanjara, M. Jahazi, H. Monajati, S. Yue, and J. P. Immarigeon, "Hot working behavior of near-α alloy IMI834," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 396, pp. 50–60, 2005.

[26] R. Amirarsalani, M. Morakabati, and R. Mahdavi "Evaluating Hot Deformation Behavior of W360 Tool Steel By Hot Compression Test," *J. Adv. Mater. Eng.*, vol. 40, pp. 113-131, 2021.

[27] A. Momeni, H. R. Ezatpour, M. Jahazi, P. Bocher, and G. R. Ebrahimi, "Dynamic recrystallization in Monel400 Ni-Cu alloy: Mechanism and role of twinning", *Mater. Sci. Eng. A*, vol.744, pp. 376-385, 2018.

[28] S. M. Abbasi, A. Momeni, Y. C. Lin, and H. R. Jafarian, "Dynamic softening mechanism in Ti-13V-11Cr-3Al beta Ti alloy during hot compressive deformation" *Mater. Sci. Eng. A*, vol.665, pp. 154-160, 2016.

[29] J. Porntadawit, V. Uthaisangsuk, and P. Choungthong, "Modeling of flow behavior of Ti-6Al-4V alloy at elevated temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 599, pp. 212–222, 2014.

[30] P. Wanjara, M. Jahazi, H. Monajati, and S. Yue, "Influence of thermomechanical processing on microstructural evolution in near-α alloy IMI834," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 416, pp. 300–311, 2006.

[31] Y. Han, W. Zeng, Y. Qi, and Y. Zhao, "Optimization of forging process parameters of Ti600 alloy by using processing map," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 52, pp. 393–400, 2011.

[32] G. Lianggang, F. Xiaoguang, Y. Gaofeng, and Y. He, "Microstructure control techniques in primary hot working of titanium alloy bars : A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol.1, pp. 1-11, 2015.