

# دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی

12th International Conference on Materials Science and Metallurgical Engineering 2023

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران، ایران



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی و علم مواد



بدون سله کو اهی می شود مقاله با عنوان  
تحولات ریزساختاری آنیازشبه آلفا Ti-811 باریزساختار لایه ای در حین فشار کرم  
توسط نویسندگان

فاطمه زر قانی، غلامرضا اراتیمی، حمیدرضا عزت پور

در دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی (iMat2023) مورخ ۷ و ۸ آذر ۱۴۰۲ پذیرفته و به صورت پوستر ارائه شده است.

توفیق روز افزون شمارا در راه پیشبرد علمی کشور عزیزمان ایران از درگاه ایزد منان خواستاریم.

دکتر شهرام رایگان  
عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مواد و دبیر علمی کنفرانس - عضو هیات علمی دانشکده مهندسی و علم متالورژی دانشگاه تهران

دکتر حمید خرسند  
معاون دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر مهدی خدایی  
دبیر اجرایی کنفرانس / دبیران دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی





## تحولات ریزساختاری آلیاژ شبه آلفا Ti-811 با ریزساختار لایه ای در حین فشار گرم

فاطمه زرقانی<sup>۱</sup>، غلامرضا ابراهیمی<sup>۲</sup>، حمیدرضا عزت پور<sup>۳</sup>.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.

۲- نویسنده مسئول مقاله، ستاد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

۳- دانشیار، گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.

ایمیل نویسنده مسئول مقاله Email: [r.ebrahimi@um.ac.ir](mailto:r.ebrahimi@um.ac.ir)

### چکیده

آلیاژهای شبه آلفا تیتانیوم Ti-811 به دلیل خواص ویژه به طور گسترده برای ساخت پره های کمپرسور ها به کار گرفته می شود. فرآیند ساخت این پره ها آهنگری گرم و ریزساختار مطلوب آنها آلفای کرووی در زمینه ای از ساختار لایه ای است که به ترتیب تامین کننده خواص خستگی و خواص خزشی است. در این پژوهش آزمون فشار گرم به منظور شبیه سازی آهنگری گرم روی آلیاژ تیتانیوم Ti-811 با ساختار کاملاً لایه ای تحت وضعیت هم دما و با تغییر میزان کرنش، نرخ کرنش و زمان نگهداری پیش از تغییر شکل انجام شده است. نتایج ریزساختاری نشان داد که در حین تغییر شکل فاز آلفا به حالت کرووی تبدیل می شود که با افزایش میزان کرنش میزان کرووی شدن فاز آلفا افزایش یافته است. مکانیزم کرووی شدن فاز آلفا شامل شکافته شدن مرز و برش خوردن لایه های آلفا و تشکیل مسیرهای نفوذی و در نهایت تشکیل گلبول های فاز آلفا است.

کلمات کلیدی: تیتانیوم، آلیاژ شبه آلفا، مکانیزم کرووی شدن

### ۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم با نسبت استحکام به وزن مطلوب در دماهای نسبتاً بالا، به عنوان یک جایگزین برای مواد سنگین وزن نظیر فولادها در صنعت هوافضا مطرح هستند. آلیاژهای تیتانیوم در سازه های بسیار مهم صنایع هوافضا (بدنه و موتور هواپیماها) مانند هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ کاربرد دارند به طوریکه حدود ۵۰٪ از تیتانیوم تولیدی در این راه مصرف میشود [۱]. آلیاژ شبه آلفای Ti-811 با دمای کاری °C ۴۵۰ بالاترین استحکام کششی بین آلیاژهای دوفازی [۲] و بهترین ترکیب از مقاومت به خستگی در تعداد سیکل کم و در تعداد سیکل بالا خواص مورد نیاز برای ساخت تیغه های کمپرسورهای فشار بالا را دارا بوده و عموماً بهترین گزینه برای ساخت آنها است [۳]. خواص خستگی و خزشی به شدت تحت تاثیر تحولات ریزساختاری و ریزساختار نیز به شدت تحت تاثیر پارامترهای آهنگری است. تیغه های کمپرسور باید دارای ساختاری شامل آلفای هم محور اولیه در زمینه ای از بتای تغییر یافته به حالت لایه ای باشد که مقاومت به خزش ساختار لایه ای در کنار مقاومت به خستگی آلفای هم محور به طور همزمان ایجاد شود [۴]. مطالعات متعددی کرووی شدن فاز آلفا در ساختار لایه ای و نیز مکانیزم های کرووی شدن را مورد بررسی قرار داده است. شی و همکاران [۵] تحولات ریزساختاری آلیاژ Ti-811 در شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی قرار داده و ریزساختار شامل آلفای اولیه ترکیب با آلفای لایه ای را به جهت بهترین ... حرارتی و خواص خزشی همچنین استحکام دمای بالا و استحکام دمای اتاق خوب به عنوان ریزساختار مطلوب گزارش کرده اند. در این پژوهش مکانیزم رشد آلفای کرووی مورد بررسی قرار گرفته و مکانیزم گردنبندی شدن<sup>۱</sup> و تشکیل آلفای شانه ای<sup>۲</sup> به عنوان مکانیزم های رشد آلفای لایه ای گزارش شده است. ما و همکاران [۶]

<sup>1</sup> necklace" feature

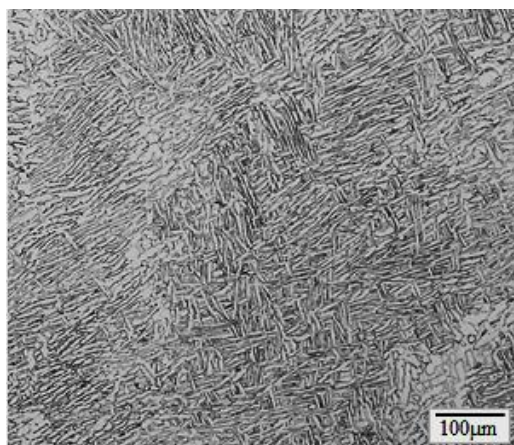
<sup>2</sup> comb feature



مکانیزم کروی شدن دینامیکی فاز آلفا در یک ساختار لایه ای آلیاژ BT25 در حین تغییر شکل گرم را مطالعه و گزارش داده اند که با کاهش نرخ کرنش و افزایش دما از ۹۴۰ به ۱۰۰۰°C کسر حجمی فاز آلفای کروی افزایش می یابد. هه و همکاران [۷] تحولات ریزساختاری و رفتار تغییر شکل گرم در یک آلیاژ دو فازی تیتانیوم را مورد مطالعه قرار داده مکانیزم کروی شدن آلفا را ناشی از تجمع نبعجایی هایی با علامت یکسان دانسته اند که کنار یکدیگر یک مسیر نفوذی را تشکیل می دهند که منجر به نفوذ فاز بتا به داخل لایه های آلفا و جداسدن گلبول هایی از فاز آلفا می شود. در نهایت گلوبول ها با هدف کاهش انرژی سطحی به حالت کروی تبدیل می شوند. در بررسی رفتار تغییر شکل آلیاژ Ti-55511 با یک ساختار سبدي محققین پدیده کروی شدن آلفای لایه ای را گزارش کرده و بیان کرده اند که با کاهش نرخ کرنش و نیز افزایش کرنش حقیقی کسر حجمی آلفای کروی شده افزایش می یابد. در حالیکه افزایش نرخ کرنش شرایط برای وقوع تبلور مجدد فاز بتا را فراهم می کند [۸]. لین و همکاران [۹] گزارش کرده اند که لایه های آلفا در ابتدا دچار تغییراتی مانند شکستن، موجی شدن و خم شدن می شوند که در نهایت منجر به کروی شدن لایه های آلفا است. هر چه میزان نرخ کرنش پایینتر باشد میزان کروی شدن لایه های آلفا بیشتر می شود. زهانگ و همکاران [۱۰] در یک تحقیق مروری انواع مکانیزم ها برای کروی شدن آلفای لایه را گردآوری کرده و مکانیزم برش خوردن لایه های آلفا، تبلور مجدد هندسی و شکافتن لایه ها را توضیح داده اند. با توجه به بخش ابتدایی که عنوان شد ساختار اولیه آلیاژ به حالت لایه ای است و نیاز است که در این ساختار لایه ای، آلفای هم محور نیز تشکیل شود بنابراین هدف از این پژوهش بررسی شرایطی است که در آن لایه های آلفا به حالت کروی تبدیل شود که تامین کننده خواص مورد نظر باشد.

## ۲- روش پژوهش

آلیاژ شبه آلفا Ti-811 (Al ۳۵٪، Mo ۷۵٪، V ۷۵٪، Fe ۳٪ و C ۰.۸٪ و باقی مانده تیتانیوم) با ساختار اولیه لایه ای (شکل ۱) به عنوان آلیاژ پایه استفاده شد. نمونه های استوانه ای شکل با قطر و ارتفاع به ترتیب برابر با ۸ و ۱۲ میلی متر تحت آزمون فشار گرم قرار گرفتند. با توجه به تحقیقات پیشین [۱۱] دمای تغییر شکل ثابت و برابر با ۱۰۰۰°C و نرخ کرنش برابر با ۰.۰۱ و  $0.1 s^{-1}$  انتخاب شد. پارامتر کرنش در مقادیر ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸ و نیز زمان نگهداری پیش از تغییر شکل در دو زمان ۱۰ و ۱۵ دقیقه تغییر داده شد. پس از تغییر شکل نمونه ها سریعاً در آب کویچ شده و بعد از برش در راستای محور تغییر شکل و پولیش کاری با محلول (مخلوطی از  $HNO_3$ ، HF و  $H_2O$ ) با نسبت های ۱، ۳ و ۶ درصد حجمی [۱۲] 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، ساخت شرکت Phenom استفاده شده است.



شکل ۱- ریزساختار اولیه آلیاژ که با عملیات حرارتی بتا آنیل ایجاد شده است.

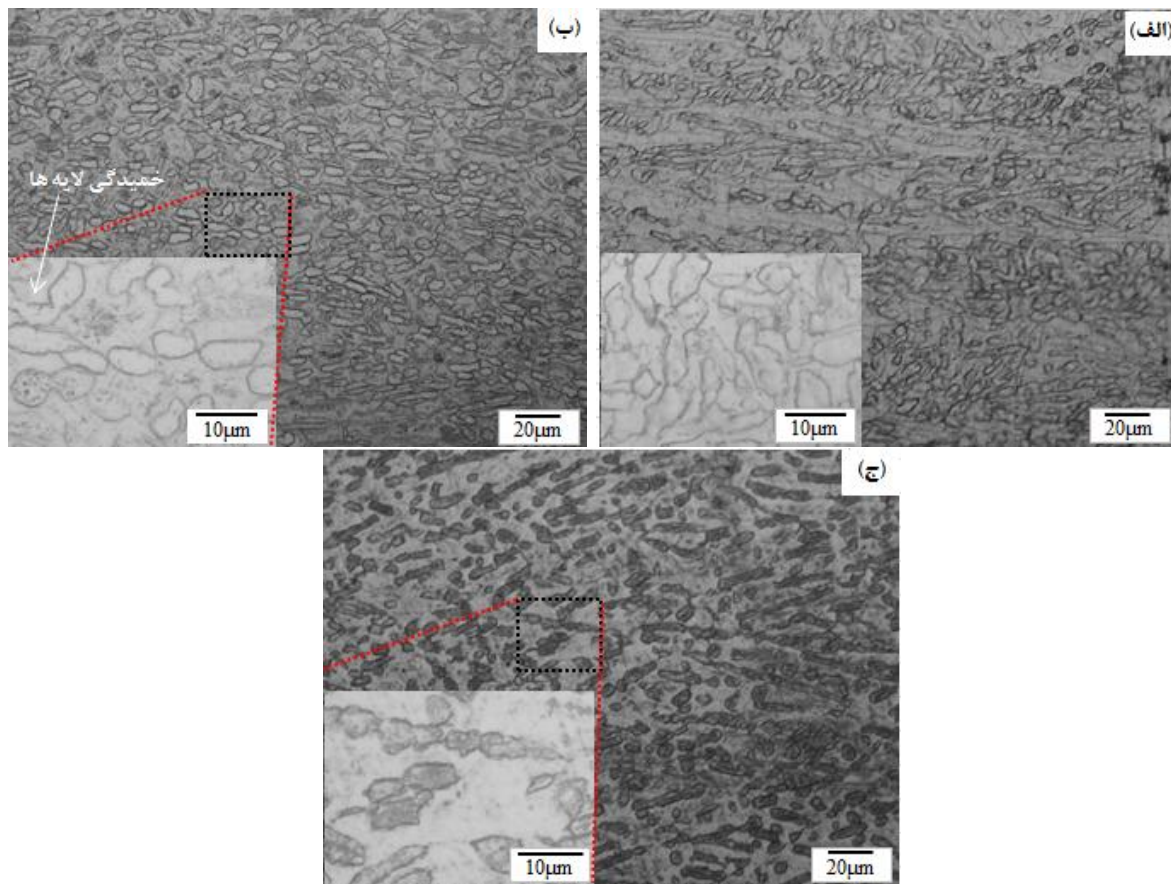


## ۳- نتایج، بحث و نتیجه گیری

## ۳-۱ تاثیر پارامترهای تغییرشکل بر تحولات ریزساختاری

بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات اولیه روی تغییرشکل تک‌پاس آلیاژ Ti-811 [۱۱] مشخص شد که فاز آلفای لایه‌ای در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و دو نرخ کرنش  $0.001/\text{s}$  و  $0.1/\text{s}$  به حالت کروی تبدیل می‌شود. همچنین هر چه نرخ کرنش کمتر باشد کسر حجمی آلفای کروی بیشتر است. در این پژوهش نیز اثر دیگر پارامترهای تغییر شکل بر میزان کروی شدن مورد بررسی قرار گرفته که نتایج در ادامه آورده شده است. شکل ۲ تصاویر ریزساختار آلیاژ تغییر داده شده در کرنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. نرخ کرنش و دمای تغییر شکل ثابت و به ترتیب برابر با  $0.001/\text{s}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  است. در تمام تصاویر جهت عمودی نشان دهنده جهت بارگذاری یا محور فشار است. در شکل ۲(الف) کسر کمی از آلفای کروی رانشان می‌دهد و بیشتر شواهدی نظیر شکسته شدن و خمیدگی در لایه‌های آلفا قابل مشاهده است. شکسته شدن لایه‌ها به قطعات کوچکتر و خمیده شدن لایه‌ها به عنوان مراحل مقدماتی برای کروی شدن فاز آلفا هستند. در حالیکه وقتی کرنش به میزان  $0.6$  افزایش یافته است کسر حجمی فاز آلفای کروی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. اما بیشتر فاز آلفا هنوز به حالت گلبولی است و کاملاً به حالت کروی تبدیل نشده است همچنین در برخی لایه‌ها خمیدگی مشاهده می‌شود اما گلبولی شدن و یا کروی شدن اتفاق نیفتاده است. در حقیقت می‌توان گفت مراحل مقدماتی برای کروی شدن فاز آلفا انجام شده اما تمام لایه‌ها به حالت کروی تبدیل نشده‌اند. با افزایش بیشتر کرنش به  $0.8$  شکل کروی در لایه‌ها به طور واضح دیده می‌شود ضمن اینکه اندازه فاز آلفای کروی نیز افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش کرنش ارتباط جهت‌گیری برگر از فصل مشترک  $\beta/\alpha$  شکسته می‌شود که کروی شدن فاز آلفا را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه افزایش کرنش به معنای ماندن بیشتر در شرایط تغییرشکل است جوانه‌های آلفای کروی ایجاد شده در اثر به هم پیوستن و نفوذ عناصر رشد می‌کنند که همین عامل سبب افزایش اندازه آلفای کروی است. نتیجه مشابه در تحقیقات لین و همکاران [۸] گزارش شده است.

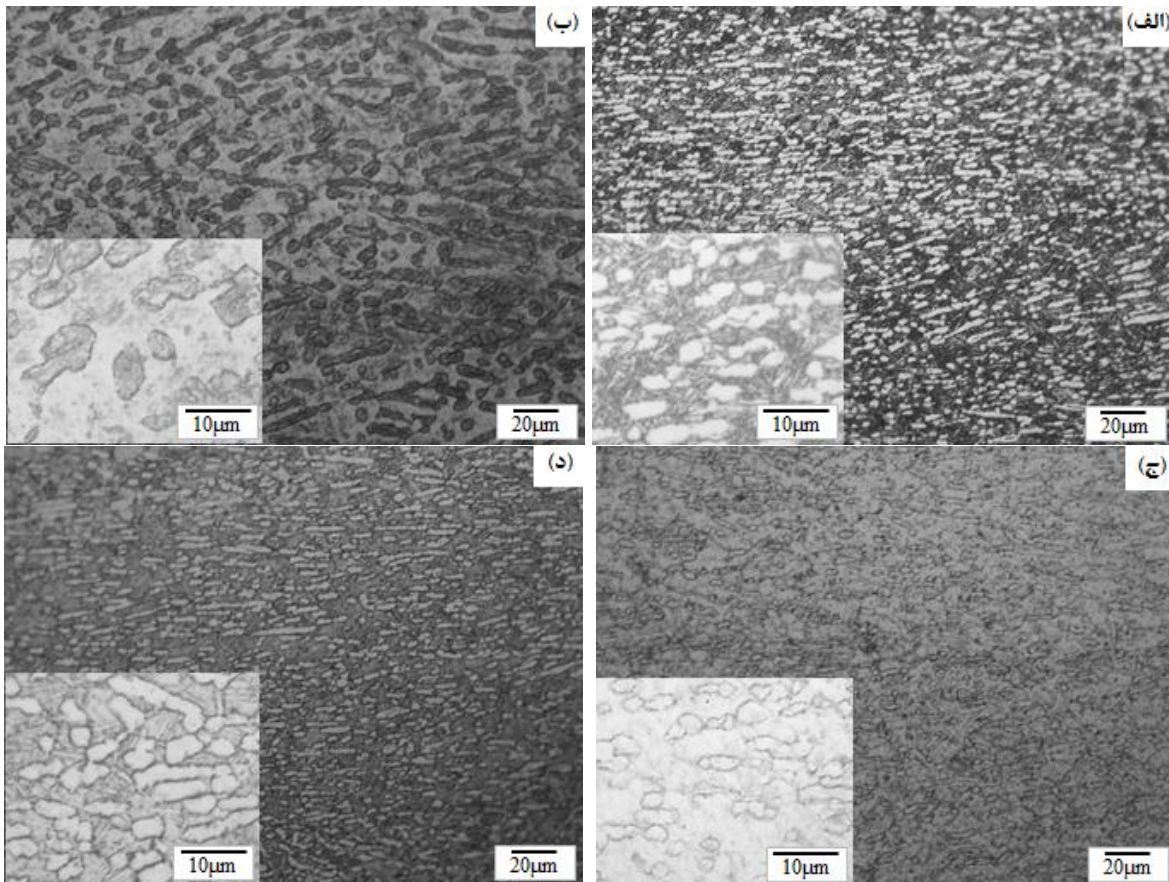
یکی دیگر از متغیرهای مورد بررسی زمان نگهداری پیش از تغییرشکل است که در دو زمان ۱۰ و ۱۵ دقیقه تغییر داده شد. شکل ۳ تصاویر ریزساختار در کرنش ثابت با تغییر زمان نگهداری پیش از تغییر شکل را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان تاثیر همزمان تغییر نرخ کرنش و زمان نگهداری بر میزان کروی شدن فاز آلفا را مشاهده کرد. از مقایسه شکل ۳(الف) و (ج) و شکل ۳(ب) و (د) می‌توان دریافت که نرخ کرنش بر کسر حجمی فاز آلفای کروی و نیز اندازه فاز آلفا تاثیر گذار است. کاهش نرخ کرنش عاملی است که میزان کروی شدن فاز آلفا و نیز اندازه فاز آلفای کروی شده را افزایش می‌دهد. ضمن اینکه در نرخ کرنش کمتر (شکل ۳(الف) و (ب)) فاز آلفا حالت کروی بیشتری دارد در حالیکه در نرخ کرنش بالاتر (شکل ۳(ج) و (د)) فاز آلفا تا حدودی به حالت گلبولی است. در تاثیر زمان نگهداری پیش از تغییر شکل نیز بر اساس شکل ۳(الف) و (ب) می‌توان بیان کرد هر چه زمان نگهداری پیش از تغییرشکل بیشتر باشد کسر فاز آلفای کروی شده و همگنی در ساختار بیشتر است. این در حالی است که اندازه فاز آلفا در زمان نگهداری ۱۰ دقیقه در مقایسه با زمان ۱۵ دقیقه کوچکتر است. با توجه به اینکه فرآیند‌های نفوذ عناصر وابسته به گرما و زمان هستند قرار گرفتن آلیاژ در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  شرایط دمایی برای نفوذ عناصر را فراهم می‌کند، حال هر چه مدت زمان ماندن در این دما بیشتر باشد نفوذ بیشتر شده که در نهایت افزایش ضخامت لایه‌های آلفا را به دنبال دارد. به همین جهت در نهایت وقتی زمان نگهداری کمتر است لایه‌ها نازکتر و اندازه فاز آلفا کوچکتر است.



شکل ۲- ریزساختار پس از تغییر شکل در دمای ثابت  $1000^{\circ}\text{C}$ ، نرخ کرنش ثابت  $0.001\text{s}^{-1}$  و دمای نگهداری پیش از تغییر شکل ۱۵ دقیقه در کرنش متغیر (الف)  $0.14$  و (ب)  $0.16$  و (ج)  $0.18$ .

### ۲-۳ مکانیزم های کروی شدن

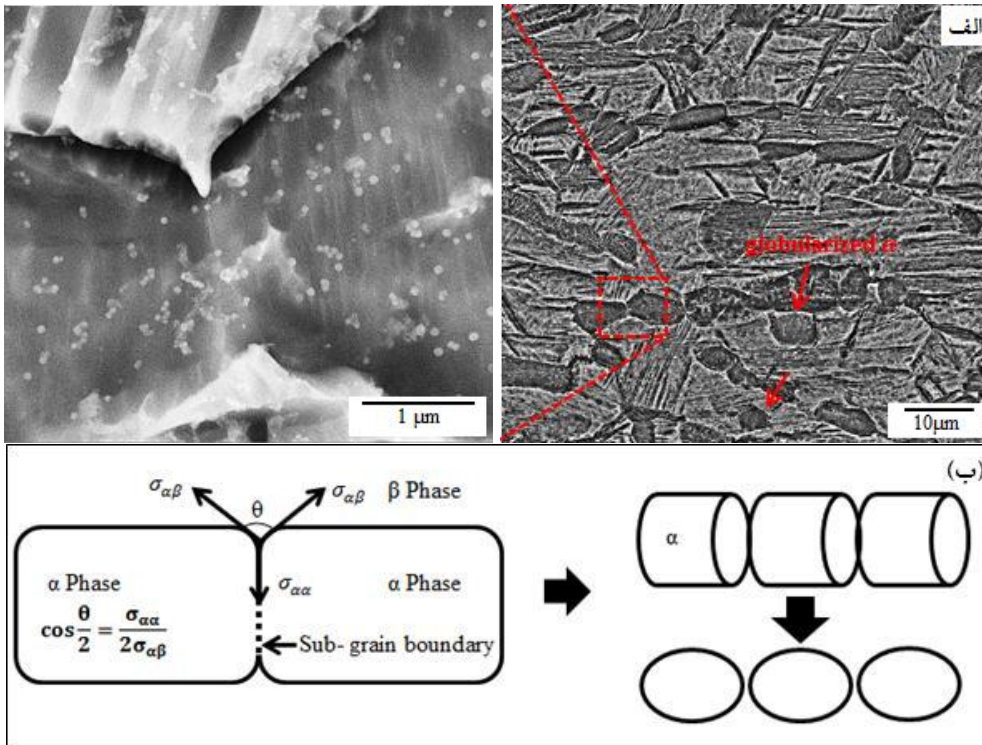
برای کروی شدن فاز آلفا چندین مکانیزم شامل تبلور مجدد، شکافته شدن مرز، برش خوردن لایه های آلفا و مکانیزم های ترکیبی از برش و نفوذ گزارش شده است [۱۰] که در پژوهش حاضر مکانیزم شکافتن مرز و برش لایه های آلفا مشاهده شده است. در شکل ۴ (الف) ریزساختار نمونه تغییر شکل یافته که در آن مکانیزم شکافته شدن مرز عامل کروی شدن فاز آلفا است نشان داده شده است. بر اساس این شکل به نظر می رسد که فاز بتا به درون لایه های آلفا نفوذ کرده و منجر به شکافته شدن مرز می شود که در نهایت کروی شدن آلفای لایه های را به دنبال دارد. پس می توان مکانیزم کروی شدن در این دما را مکانیزم شکافته شدن مرز عنوان کرد. این مکانیزم که به صورت طرحواره در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است بر اساس تعادل انرژی کشش سطحی بین دو فاز مختلف تحت تعادل مطرح می شود، که  $\theta$  زاویه بین دو مرز فازی مجاور در نقطه اتصال در یک ساختار تحت تعادل است. این دو فاز تحت تعادل را می توان آلفای لایه های در زمینه ای از بتای تغییر یافته در نظر گرفت که در آن رابطه بین انرژی دو فاز به صورت  $\sigma_{\alpha\alpha} = 2\sigma_{\alpha\beta} \cos \frac{\theta}{2}$  برقرار است که در آن  $\sigma_{\beta\alpha}$  انرژی بین فاز آلفا و بتا و  $\sigma_{\alpha\alpha}$  انرژی مرز زیردانه آلفا-آلفا است. بر اساس این رابطه زمانی که زاویه دو سطحی زیرمرز  $90^{\circ}$  باشد زیر مرز ایجاد شده ناپایدار است و این یعنی اینکه آلفا به صورت لایه ای در زمینه ای از بتای تغییر یافته باقی می ماند. اما به منظور کاهش انرژی سطحی زاویه به



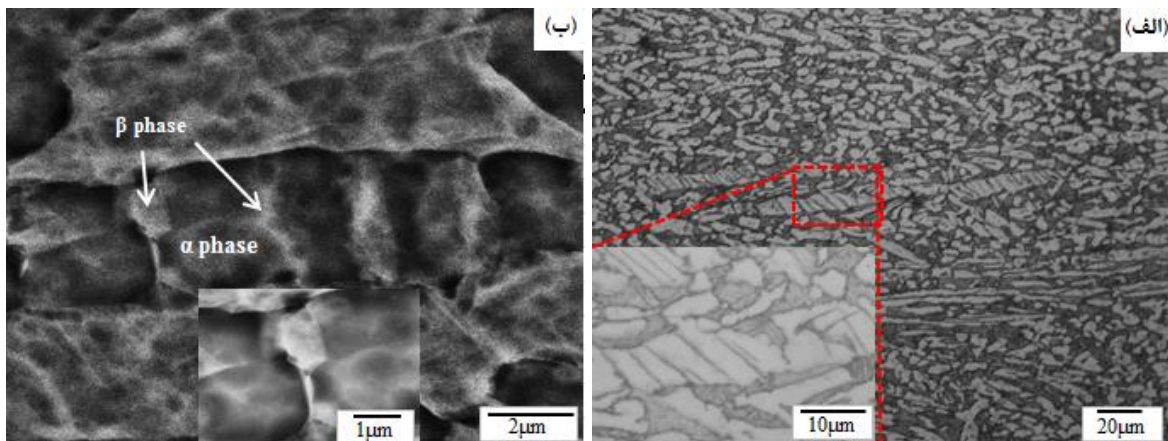
شکل ۳- ریزساختار آلیاژ تغییر شکل داده شده در کرنش ثابت ۰/۸ و (الف) نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه، (ب) نرخ کرنش  $0.01 \text{ s}^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۵ دقیقه، (ج) نرخ کرنش  $0.1 \text{ s}^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه و (د) نرخ کرنش  $0.1 \text{ s}^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۵ دقیقه.

تدریج کاهش می‌یابد و فاز بتا با ایجاد شیار به داخل مرز آلفا/آلفا نفوذ می‌کند و گلبول کروی آلفا از آلفای لایه‌ای جدا می‌شود. در آخر با توجه به تمایل مواد به داشتن کمترین انرژی سطحی شکل قطعات شکافته شده به صورت کروی تبدیل می‌شوند [۱۳]. سمیاتین و همکاران [۱۴] مکانیسم مشابهی برای کروی شدن در آلیاژ Ti-64 گزارش کرده‌اند.

یکی دیگر از مکانیزم‌های کروی شدن که در ریزساختارها این پژوهش مشاهده شد مکانیزم برش است که در آن تحت اثر کرنش برشی در لایه‌های با جهتگیری مرجح تغییر شکل برشی اتفاق می‌افتد در حالیکه در لایه‌هایی با جهتگیری غیرمرجح چرخش و خمیدگی در لایه‌ها اتفاق می‌افتد. در لایه‌هایی که تغییر شکل برشی اتفاق می‌افتد در اثر تجمع نابجایی‌ها در خط برش یک کانال نفوذی تشکیل می‌شود که فاز بتا با نفوذ در آن سبب جدا پش در لایه آلفا می‌شود. این جدایش در نهایت منجر به گلبولی شدن و کروی شدن فاز آلفا است. شکل ۵ مکانیزم برش در نمونه تغییر شکل یافته با پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس تصویر برش خوردن فقط در بعضی از لایه‌ها اتفاق افتاده که مشخص کننده لایه‌هایی با جهت مرجح هست و در سایر لایه‌ها خمیدگی و شکافتن مرز اتفاق افتاده است.



شکل ۴- الف) تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی که نشان دهنده مکانیزم شکافته شدن مرز برای کروی شدن فاز آلفا در ریزساختار آلیاژ تغییر شکل داده شده در نرخ کرنش  $10^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۵ دقیقه پیش از تغییر شکل و کرنش حقیقی  $0.16$ ، ب) طرحواره مکانیزم شکافته شدن مرز.



شکل ۵- الف) تصاویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده مکانیزم برش برای کروی شدن فاز آلفا در ریزساختار آلیاژ تغییر شکل داده شده در (الف) نرخ کرنش  $10^{-1}$  و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه پیش از تغییر شکل و کرنش حقیقی  $0.16$ ، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لایه برش خورده که نفوذ فاز بتا (رنگ روشن) به برش های ایجاد شده روی لایه آلفا (فاز تیره) و جدایش گلوبولی را نشان می دهد.



## نتیجه گیری

تحولات ریزساختاری و به ویژه کرووی شدن فاز آلفا از آلیاژ شبه آلفا Ti-811 در فشار گرم تحت تاثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مهمترین نتایج به صورت زیر است.

- ۱- هر چه نرخ کرنش پایینتر باشد کسر حجمی فاز آلفای کرووی شده بیشتر و نیز اندازه فاز آلفای کرووی بزرگتر است.
- ۲- با افزایش کرنش از ۰/۴ به ۰/۸ کسر حجمی بیشتری از فاز آلفای کرووی در ساختار مشاهده شد.
- ۳- مکانیزم شکافته شدن مرز و نیز برش در لایه های آلفا با جهتگیری مرجح به عنوان مکانیزم های منجر به کرووی شدن فاز آلفا در این پژوهش مشاهده شد.

## ۴- مراجع

- [1] . I. J. Polmear. Light Alloys From Traditional Alloy to Nanocrystals (book). Fourth Edition. Melbourne, Australia.200.
- [2] C. WELLS .The forging of compressor and turbine blades, *Applied Science Publishers Ltd* . pp. 207–228,1981.
- [3] B. Saha, B. Jana, J. S. Yadav, and C. H. R. Krishna, “Development and certification of Ti-8Al-1Mo-IV alloy for HP compressor blades for adour engine applications \*,” vol. 19, no. 4, 1996.
- [4] X. Wang, M. Jahazi, and S. Yue, “Investigation of  $\alpha$  platelet boundaries in a near- $\alpha$  titanium alloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 492, no. 1–2, pp. 450–454, 2008.
- [5] X. Shi, W. Zeng, Y. Long, and Y. Zhu, “Microstructure evolution and mechanical properties of near-  $\alpha$  Ti-8Al-1Mo-IV alloy at different solution temperatures and cooling rates,” *J. Alloys Compd.*, vol. 727, pp. 555–564, 2017.
- [6] X. Ma, W. Zeng, F. Tian, and Y. Zhou, “The kinetics of dynamic globularization during hot working of a two phase titanium alloy with starting lamellar microstructure,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 548, pp. 6–11, 2012.
- [7] D. He, J. C. Zhu, Z. H. Lai, Y. Liu, and X. W. Yang, “An experimental study of deformation mechanism and microstructure evolution during hot deformation of Ti – 6Al – 2Zr – 1Mo – 1V alloy,” vol. 46, pp. 38–48, 2013.
- [8] Y. C. Lin, G. Pang, Y. Jiang, X. Liu, X. Zhang, and C. Chen, “Hot compressive deformation behavior and microstructure evolution of a Ti- 55511 alloy with basket-weave microstructures,” *Vacuum*, vol. 169, no. July, p. 108878, 2019.
- [9] Y. C. Lin, Y. Xiao, Y. Jiang, G. Pang, and H. Li, “Materials Science & Engineering A Spheroidization and dynamic recrystallization mechanisms of Ti-55511 alloy with bimodal microstructures during hot compression in  $\alpha \beta \beta$  region,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 782, no. January, p. 139282, 2020.
- [10] J. Zhang, H. Li, and M. Zhan, “Review on globularization of titanium alloy with lamellar colony,” vol. 18, 2020.
- [11] F. Zarghani, G. Ebrahimi, A. Momeni, and H. Ezatpour, “Journal of Metallurgical and Materials,” pp. 35–50, 2023.
- [12] H. G. Wang, F. Wang, and Y. P. Song, “Effects of heat treatment on microstructures and properties of Ti811 alloys,” vol. 119, pp. 1032–1035, 2012.
- [13] I. Weiss , F.H. Froes “MECHANISMS OF MICROSTRUCTURE REANEMENT IN Ti-6Al-4V ALLOY, pp. 1503-1510, 1984.
- [14] N. Stefansson and S. L. Semiatin, “Mechanisms of globularization of Ti-6Al-4V during static heat treatment,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 34 A, no. 3, pp. 691–698, 2003.