



## بررسی و تعیین دمای دگرگونی $\alpha$ به $\alpha_2$ حین تغییر شکل داغ فشاری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb

حسین رضایی<sup>۱</sup>، مریم مرکباتی\*<sup>۲</sup>، امیر مومنی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشیار، دانشکده متالورژی و مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

\* نویسنده مکاتبه کننده: m\_morakabati@mut.ac.ir

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی وقوع دگرگونی  $\alpha$  به  $\alpha_2$  حین تغییر شکل داغ فشاری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb می‌باشد. به همین منظور آزمون فشار داغ نمونه‌های ترکیب بین فلزی فوق در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ثابت ۰/۰۱ بر ثانیه انجام شد. پس از تغییر شکل داغ در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، پیک‌های بلند فاز  $\gamma$  به همراه پیک‌های نسبتاً کوتاه فاز  $\alpha_2$  در نتایج آنالیز تفرق اشعه ایکس مشاهده شد. با افزایش دمای تغییر شکل به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، پیک‌های فاز  $\alpha_2$  از بین رفته و پیک‌های فاز  $\alpha$  پدیدار گردید. پس از تغییر شکل داغ در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، لایه‌های خمیده و شکسته شده به همراه تعدادی دانه تبلور مجدد یافته در ساختار مشاهده شد، درحالی‌که با افزایش دمای تغییر شکل داغ به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، آغاز دگرگونی سبب تجزیه فاز  $\alpha_2$  و ایجاد نواحی تجزیه شده غنی از  $\gamma$  و در نتیجه افزایش میزان این فاز در ساختار گردید. لذا بر اساس نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که دگرگونی منظم شدن در محدوده دمایی ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز و در محدوده دمایی ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تکمیل شده است.

**کلمات کلیدی:** ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb، دگرگونی  $\alpha_2$  به  $\alpha$ ، تبلور مجدد، خمش لایه‌ها

ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb یکی از ترکیبات خانواده آلیاژهای بر پایه آلومیناید تیتانیم است که به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی بسیار مناسب در صنایع هوافضا و موتورهای جت کاربرد دارد [۱]. این ترکیب با وجود داشتن خواصی مانند چگالی پایین و مقاومت حرارتی مطلوب، به دلیل شکنندگی و دشواری فرآوری با محدودیتهایی در کاربردهای دمای بالا مواجه است [۲]. وجود همزمان فازهای  $\gamma$  و  $\alpha_2$  سبب ایجاد ترکیبی از استحکام بالا و وزن سبک شده که این آلیاژ را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای دما بالا تبدیل می‌کند [۳]. فازهای کروم و نیوبیم در بهبود خواص مکانیکی و پایداری فازی این آلیاژ نقش دارند. کروم سبب کاهش اکسیداسیون و نیوبیم باعث بهبود استحکام در دماهای بالا می‌گردد [۴].

کارپذیری ترکیبات آلومیناید تیتانیم اساساً اندک است، بنابراین فرایندهای کار سرد و نیمه گرم را حتی با ساختار ریزدانه و یکنواخت نیز نمی‌توان انجام داد [۵]. تغییر شکل داغ با فعال‌سازی مکانیزم‌های تغییر شکل نظیر لغزش نابجایی‌ها و بازآرایی ساختارهای کریستالی منجر به کاهش استحکام سیلان و افزایش شکل پذیری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb می‌گردد [۶]. چن و همکاران [۷] دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه را شرایط بهینه برای تغییر شکل فشاری این ترکیب می‌دانند، اما شیخ و همکاران [۸] دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۰۲ بر ثانیه را شرایط بهینه تغییر شکل داغ این ترکیب می‌دانند. با این حال اوستا و همکاران [۹] معتقدند امکان تکمیل تبلور مجدد ساختار حین تغییر شکل داغ برای این ترکیب وجود نداشته و همواره مقداری دانه/کولونی تغییر شکل یافته در ساختار باقی می‌ماند.

فاز  $\alpha_2$  دارای ساختار HCP بوده و به عنوان یک فاز تقویت کننده در دماهای میانی شناخته می‌شود. این فاز به دلیل نظم و ترتیب معین و وجود پیوندهای قوی بین اتم‌های تیتانیم و آلومینیم، خواص مکانیکی مناسبی دارد. فاز  $\alpha$  نیز تیتانیم خالص دارای ساختار HCP است که به دلیل نظم کمتر در توزیع اتم‌ها، استحکام کمتری نسبت به فاز  $\alpha_2$  دارد [۲]. فاز  $\alpha$  معمولاً شکل‌پذیری بهتری نسبت به فاز  $\alpha_2$  دارد، اما مقاومت به خزش آن به دلیل شکسته شدن پیوندهای فلزی قوی با افزایش دما کمتر است [۱۰]. با افزایش دما، دگرگونی فاز منظم  $\alpha_2$  به فاز  $\alpha$  با نظم کمتر انجام می‌شود. افزایش تحرک اتم‌ها در دمای بالا و تمایل به حضور در موقعیت‌های نامنظم و از بین رفتن نظم اتمی در دماهای بالا از دلایل وقوع این دگرگونی هستند [۱۱]. افزودنی‌های آلیاژی نیز بر وقوع این دگرگونی تاثیر دارند، نیوبیم تمایل به پایداری فاز  $\alpha_2$  دارد، در حالیکه کروم باعث تسریع دگرگونی به

$\alpha$  می‌شود. وقوع این دگرگونی سبب افزایش شکل‌پذیری، کاهش مقاومت به خزش و بهبود خواص مکانیکی دما بالا می‌گردد [۱۲].

هدف از پژوهش حاضر تعیین دمای تقریبی دگرگونی  $\alpha_2$  به  $\alpha$  در ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb حین تغییر شکل داغ فشاری و همچنین بررسی تغییرات ریزساختاری ناشی از وقوع این دگرگونی می‌باشد.

## روش انجام آزمایش

در این پژوهش از شمش ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb تولید شده به روش ریخته‌گری با فرایند ذوب دومرحله‌ای تحت خلاء (VAR) استفاده شد. ترکیب آلیاژ مورد بررسی بر اساس نتایج آنالیز EDX در جدول ۱ نمایش داده شده است. به منظور از بین رفتن اثرات ریخته‌گری در ساختار، شمش آلیاژ در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در خلاء همگن سازی شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش آلیاژ مورد استفاده بر حسب درصد اتمی.

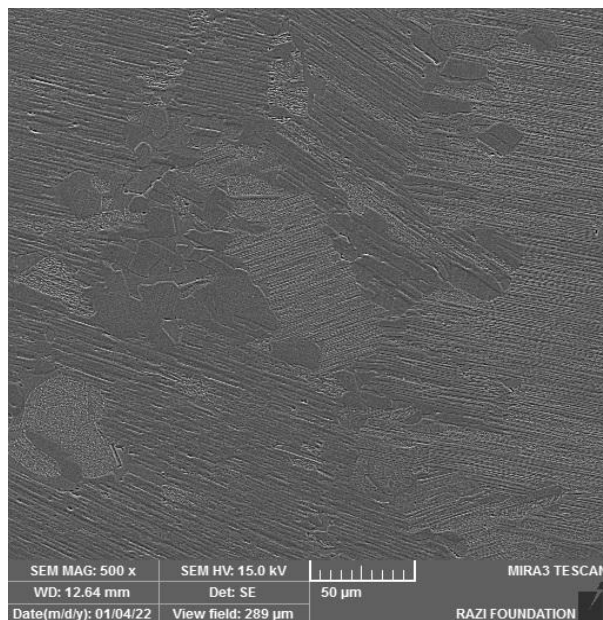
تیتانیوم	آلومینیم	کروم	نیوبیم	اکسیژن، کربن و آهن
باقیمانده	$47/8 \pm 0/004$	$1/9 \pm 0/05$	$2/0 \pm 0/05$	کمتر از ۲۰۰ Wt.ppm

آزمون فشار داغ نمونه‌های ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ثابت ۰/۰۱ بر ثانیه تا حدود ۵۰ درصد (کرنش حقیقی ۰/۷) با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک Instron 8502 مجهز به کوره مقاومتی انجام شد. نمونه‌های فشار گرم با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ مطابق با استاندارد ASTM E209 تهیه شدند. قبل از انجام آزمون، تمامی نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در محیط آزمون پیشگرم شدند. در این آزمون از آب به عنوان محیط سردکننده استفاده شد. سپس نمونه‌های آزمایش فشار داغ در جهت اعمال نیرو برش خورده و تحت بررسی‌های ریزساختاری قرار گرفتند. در همه آزمون‌ها از مخلوط پودر گرافیک و آب برای روان کاری دو سطح تماس نمونه با فک‌های دستگاه استفاده شد.

به منظور آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی، ابتدا سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ضد آب با مش ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ سائیده و پولیش شدند. سپس نمونه‌های پولیش شده توسط محلولی شامل یک درصد حجمی HF، دو درصد  $\text{HNO}_3$  و شش درصد آب [۱۳] حکاکی شدند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX 51 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-XMU و شناسایی فازهای موجود از طریق آزمون تفرق اشعه ایکس با استفاده از دستگاه DX-2700BH مجهز به نرم‌افزار Highscore و بانک اطلاعاتی PDF-2 انجام گرفت. کسر حجمی فازها با استفاده از شدت پیک‌های آزمون تفرق اشعه ایکس محاسبه گردید. برای تعیین کسر حجمی فازها از داده‌های پراش اشعه ایکس، ابتدا شدت پیک‌های مشخص و ترجیحا بدون هم‌پوشانی مربوط به هر فاز بلوری اندازه‌گیری شد. این شدت‌ها با در نظر گرفتن ضرایب ساختاری، ضریب لورنتس-پولاریزاسیون، ضریب جذب و سایر عوامل اصلاح شده تا مقایسه‌ی دقیقی بین فازها فراهم شود. سپس نسبت شدت‌های اصلاح شده به یکدیگر محاسبه شده و با استفاده از ضرایب تصحیح و دانسیته‌های هر فاز، کسر وزنی و در نهایت کسر حجمی هر فاز به دست آمد. پس از تهیه تصاویر ریزساختاری مناسب، میانگین اندازه دانه با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر ImageJ Version 7.0 بر اساس استاندارد ASTM E112 به دست آمد.

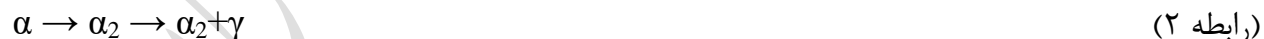
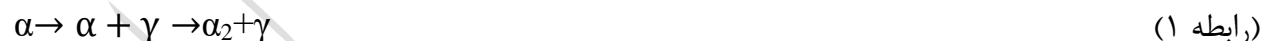
## نتایج و بحث

ریزساختار اولیه ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb قبل از تغییر شکل داغ در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار از نوع دوگانه شامل دانه‌های  $\gamma$  (ناحیه تیره رنگ) به همراه کولونی‌های لایه‌ای فاز  $\gamma$  و  $\alpha_2$  می‌باشد. ناحیه لایه‌ای شامل چیدمان نسبتاً منظمی از دو فاز  $\gamma$  و  $\alpha_2$  است که به شکل خطوط موازی در کنار یکدیگر کشیده شده‌اند. میانگین اندازه دانه برابر ۱۱۶۰ میکرون است.

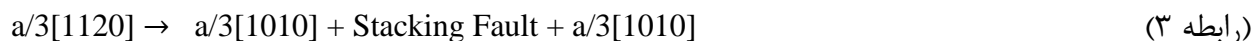


شکل ۱- ریزساختار اولیه ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb

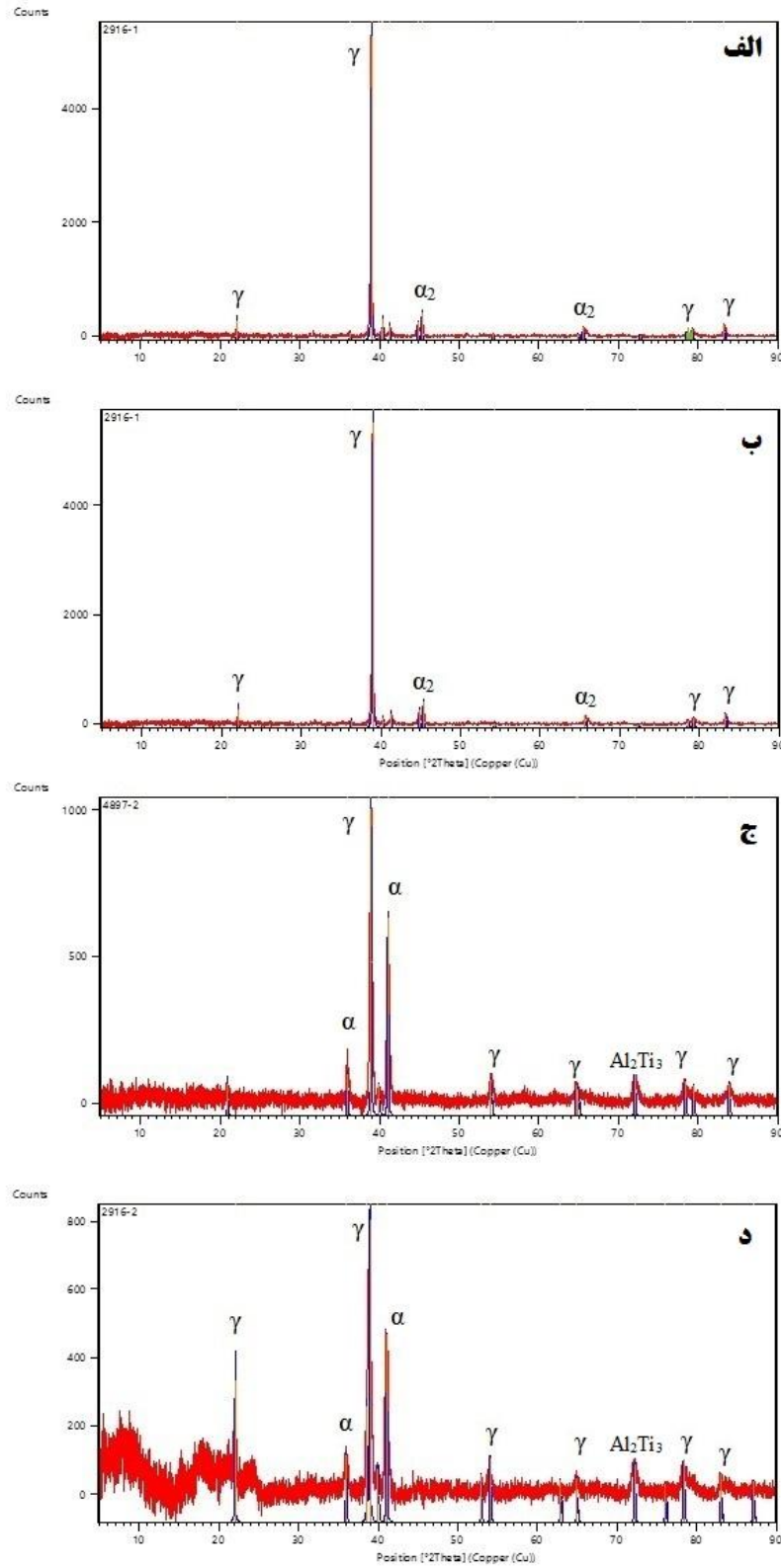
نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس نمونه‌های تغییرشکل داغ‌یافته با ساختار اولیه دوگانه در دماهای ۱۰۵۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۲ نشان داده است. وجود پیک‌های بلند فاز  $\gamma$  به همراه پیک‌های نسبتاً کوتاه فاز  $\alpha_2$  در نتایج آنالیز تفرق اشعه ایکس در دماهای ۱۰۵۰ و ۱۰۰۰ قابل مشاهده است. همچنین پیک بلندی از فاز  $\alpha$  در نمودار مشاهده نمی‌شود. با افزایش دمای تغییرشکل به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، پیک‌های فاز  $\alpha_2$  از بین رفته و پیک‌های فاز  $\alpha$  پدیدار می‌شوند. در تمامی دماهای مورد بررسی، پیک‌های بسیار کوچکی از فاز  $Al_2Ti_3$  نیز در ساختار وجود دارد. ارتفاع این پیک‌ها بسیار کوتاه و مقدار این فاز در محدوده کمتر از سه درصد در حال نوسان است. دگرگونی منظم شدن و تجزیه فاز  $\alpha$  مطابق روابط ۱ و ۲ انجام می‌شود [۱۴]:



مطالعات [۱۴] نشان داده است که دگرگونی ایجاد ریزساختار لایه‌ای شامل واکنش یک نابجایی کامل  $a/3[1120]$  و تبدیل آن به دو نابجایی جزئی شاکلی در مرز نقایص چیدمان مطابق رابطه ۳ می‌باشد.

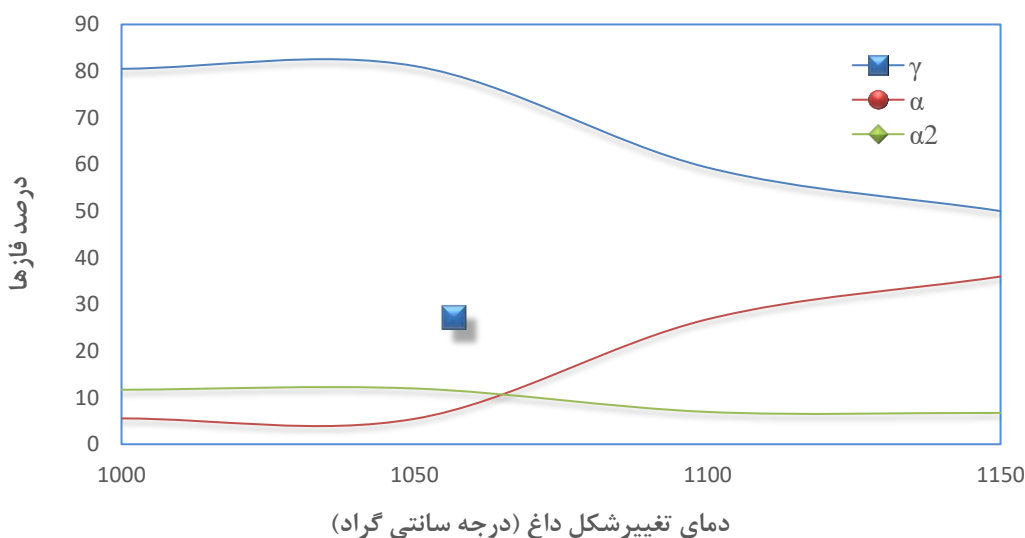


تان و همکاران [۱۵] معتقدند شکل‌گیری لایه‌ها به نقایص چیدمان بستگی دارند، زیرا فازهای جدید ترجیحاً در نقاط دارای عیب مانند نقایص چیدمان جوانه‌زنی و رشد می‌کنند.



شکل ۲- نتایج آنالیز تفرق اشعه ایکس نمونه های تغییرشکل داغ یافته با ساختار اولیه دوگانه در دماهای الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۰۵۰، ج) ۱۱۰۰ و د) ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد.

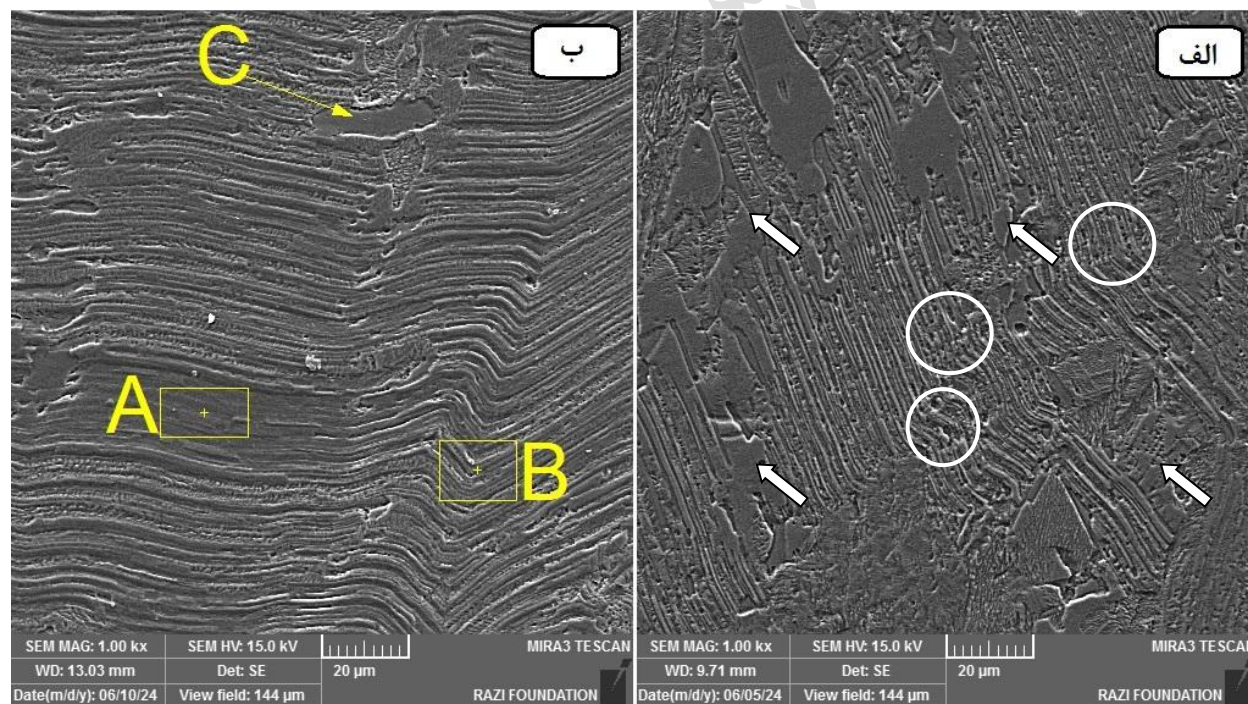
شکل ۳، تغییرات درصد فازهای مختلف را با تغییرات دمای تغییرشکل نمایش می‌دهد. مقدار فاز  $\alpha_2$  در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت و به ترتیب برابر ۱۱/۷ و ۱۲ درصد است. مقدار فاز  $\alpha$  نیز در هر دو دما حدود ۵ درصد و مقدار فاز  $\gamma$  به ترتیب برابر ۸۰/۵ و ۸۱ درصد محاسبه شده است. با توجه به ثابت بودن مقدار فازهای اصلی، به نظر می‌رسد دگرگونی‌ای بین دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ نداده است. با افزایش دمای تغییرشکل به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد فاز  $\alpha$  به ۲۷ درصد افزایش و درصد فاز  $\alpha_2$  به ۷ درصد کاهش یافته است. با افزایش بیشتر دمای تغییرشکل تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، روند تغییرات ادامه یافته و درصد فاز  $\alpha$  به ۳۶ درصد افزایش و درصد فاز  $\alpha_2$  به ۶/۷ درصد کاهش یافته می‌یابد. لذا به نظر می‌رسد دگرگونی منظم شدن در محدوده دمایی ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شده و در محدوده دمایی ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تکمیل می‌شود. وقوع این دگرگونی توسط سایر پژوهشگران نیز در دماهای ۱۱۲۰ [۱۶] و ۱۱۲۵ [۱۷] درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. محققان [۱۲] معتقدند تغییرشکل داغ با افزایش تحرک اتمی، تولید و تحرک نابجایی‌ها و تسریع فرایندهای ترمیم مانند تبلور مجدد سبب تسریع و تسهیل وقوع این دگرگونی می‌گردد.



شکل ۳- تغییرات درصد فازهای مختلف با تغییرات دمای تغییرشکل داغ.

تصاویر ریزساختار ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از تغییرشکل داغ در دماهای ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از تغییرشکل داغ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (بخش بالایی

ناحیه دوفازی  $\gamma$  و  $\alpha_2$ ، وجود لایه‌های خمیده و شکسته شده به همراه تعدادی دانه تبلور مجدد یافته در ساختار مشهود است. نمونه‌هایی از خمش لایه‌ها با دایره‌های سفید رنگ و نمونه‌هایی از دانه‌های تبلور یافته با پیکان‌های سفید رنگ در شکل ۴-الف متمایز شده‌اند. کسر حجمی دانه‌های تبلور یافته برابر ۱۷ درصد و میانگین اندازه دانه‌های تبلور یافته ۱۵ میکرومتر است. هر چند توزیع اندازه دانه‌های تبلور یافته نرمال نبوده و دانه‌هایی با اندازه کمتر از ۴ میکرومتر و بالاتر از ۴۰ میکرومتر همزمان در ساختار وجود دارند. میانگین ضخامت لایه‌ها پس از تغییر شکل در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۰/۹ میکرومتر است. موارد فوق در تطابق کامل با نتایج حاصل از آزمون تفرق اشعه ایکس می‌باشند. اپل و همکاران [۱۸] معتقدند حین تغییر شکل داغ ترکیبات آلومیناید تیتانیوم، تغییرات ریزساختاری فقط از طریق مکانیزم‌های مرسوم ترمیم مانند تبلور مجدد دینامیکی انجام نمی‌شود، بلکه ترکیبی از عوامل و مکانیزم‌های مختلف تعیین‌کننده ریزساختار نهایی پس از تغییر شکل خواهند بود. بر اساس نتایج پژوهش دیگری از این محقق [۱۹] انتظار می‌رود تبلور مجدد فازهای منظم در تمامی ترکیبات بین فلزی به صورت ذاتی به دو دلیل دشوار باشد، نخست اینکه نواحی منظم باید ترمیم شوند و دوم اینکه کاهش شدیدی در تحرک مرزهای دانه وجود دارد.



شکل ۴- ریزساختار ترکیب  $Ti-48Al-2Cr-2Nb$  پس از تغییر شکل داغ در دماهای الف) ۱۰۵۰ و ب) ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش ثابت ۰/۰۱ بر ثانیه.

با افزایش دمای تغییرشکل داغ به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۴-ب)، مکانیزم‌های نرم شدگی غالب تغییر می‌کنند. اگرچه کماکان لایه‌های خمیده شده در ساختار حضور دارند، اما تبلور مجدد دانه‌های جدید به شدت کاهش یافته است. با توجه به اینکه این دما در محدوده وقوع دگرگونی منظم شدن ( $\alpha_2$  به  $\alpha$ ) قرار دارد، بنابراین بخشی از انرژی ساختار صرف وقوع این دگرگونی می‌گردد. وجود مناطق لایه‌ای تجزیه شده مانند نقطه A در شکل ۴-ب تأییدکننده وقوع این دگرگونی است. جدول ۲ نتایج آنالیز EDS نمونه تغییرشکل یافته در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (نقاط مشخص شده در شکل ۴-ب) را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این آنالیز، نواحی A و B دارای ساختار  $\gamma$  می‌باشند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که وقوع دگرگونی  $\alpha_2$  به  $\gamma$  در این محدوده دمایی سبب تجزیه فاز  $\alpha_2$  در بین لایه‌های  $\gamma$  و در نتیجه پدیدار شدن نواحی غنی از  $\gamma$  می‌گردد. پهنای این نواحی تجزیه شده گاهی تا ۲۵ میکرومتر نیز توسعه می‌یابد، به نحوی که در برخی از نقاط می‌توان مناطقی عاری از فاز  $\alpha_2$  را مشاهده نمود که شبیه به دانه‌های تبلور یافته به نظر می‌رسند. همچنین در این ریزساختار، دانه‌های متفاوتی نیز در بین لایه‌ها مشاهده می‌شوند (نقطه C). با توجه به نتایج آنالیز EDS، این دانه‌ها دارای ترکیب  $Al_2Ti_3$  هستند که پیشتر نیز وجود این فاز با مقادیر کمتر از سه درصد در آنالیز تفرق اشعه ایکس تأیید شده بود. ایجاد این فاز (حتی در مقادیر بسیار اندک) پس از تغییرشکل داغ ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb، مورد انتظار نبوده و در پژوهش‌های مشابه نیز گزارش نشده است. ژانگ و همکاران [۱۲] معتقدند حتی در دماهای نزدیک به دمای دگرگونی فاز  $\alpha$  نیز ممکن است تشکیل فاز  $\alpha$  آغاز شده و تبلور مجدد فاز  $\gamma$  را دشوار سازد. این دگرگونی بر اثر تغییرشکل تسریع شده و باعث افزایش مقادیر فاز  $\alpha$  در ساختار می‌شود. همچنین مقادیری از فاز  $\alpha_2$  نیز همچنان در ساختار وجود خواهد داشت. مطابق نتایج پژوهش هو و همکاران [۲۰]، در شرایطی که وقوع تبلور مجدد از طریق جوانه‌زنی دانه‌های جدید در فاز  $\gamma$  دشوار شود، ممکن است نایبایی‌ها پشت مرزهای لایه‌های خمیده شده تجمع نمایند. در این شرایط امکان تجزیه فاز  $\alpha_2$  فراهم شده و نواحی تبلور یافته و نواحی تجزیه شده غنی از فاز  $\gamma$  در این مناطق ایجاد می‌شود. پژوهشگران [۲۱، ۲۲] معتقدند مکانیزم انحلال فاز  $\alpha_2$  به شدت پیچیده است، زیرا نه تنها ترتیب چیدمان باید تغییر کند، بلکه ترکیب شیمیایی موضعی باید با نفوذ بلند دامنه تنظیم شود. این فرایند به گسترش برآمدگی‌های عمودی در سطوح مشترک لایه‌ها و افزایش نفوذ در خود در امتداد هسته‌های نایبایی‌های غیرمتجانس در دماها و کرنش‌های بالا نسبت داده می‌شود. هر چند در برخی ترکیبات ممکن است این برآمدگی‌ها به جای انحلال به مکان‌هایی مرجح برای کروی شدن فاز  $\alpha_2$  تبدیل شوند.

جدول ۲- نتایج آنالیز EDS نمونه تغییرشکل داغ یافته در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه (شکل ۵-ب).

نیوبیم (درصد اتمی)	کروم (درصد اتمی)	آلومینیم (درصد اتمی)	تیتانیوم (درصد اتمی)	محل بررسی
۱/۹۱	۱/۸۹	۴۴/۳۸	۴۸/۵۱	نقطه A
۱/۴۷	۱/۹۲	۴۳/۵۸	۴۹/۰۰	نقطه B
۲/۰۱	۲/۴۳	۳۶/۹۹	۵۸/۵۷	نقطه C

### نتیجه‌گیری

۱- پس از تغییرشکل داغ در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، نتایج آنالیز تفرق اشعه ایکس نشانگر وجود پیک‌های بلند فاز  $\gamma$  به همراه پیک‌های نسبتاً کوتاه فاز  $\alpha_2$  است. با افزایش دمای تغییرشکل به ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، پیک‌های فاز  $\alpha_2$  از بین رفته و پیک‌های فاز  $\alpha$  پدیدار می‌شوند.

۲- مقدار فاز  $\alpha_2$  در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت و به ترتیب برابر ۱۱/۷ و ۱۲ درصد و مقدار فاز  $\alpha$  در هر دو دما حدود ۵ درصد است. با افزایش دمای تغییرشکل به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد فاز  $\alpha$  به ۲۷ درصد افزایش و درصد فاز  $\alpha_2$  به ۷ درصد کاهش می‌یابد.

۳- دگرگونی منظم شدن در محدوده دمایی ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شده و در محدوده دمایی ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تکمیل می‌شود.

۴- پس از تغییرشکل داغ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (بخش بالایی ناحیه دوفازی  $\gamma$  و  $\alpha_2$ )، لایه‌های خمیده و شکسته شده به همراه تعدادی دانه تبلور مجدد یافته در ساختار مشاهده می‌شود.

۵- با افزایش دمای تغییرشکل داغ به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، آغاز دگرگونی سبب تجزیه فاز  $\alpha_2$  و ایجاد نواحی تجزیه شده غنی از  $\gamma$  و در نتیجه افزایش میزان این فاز در ساختار می‌گردد.

### مراجع

- [1] Clemens, H. and S. Mayer, *Advanced Intermetallic TiAl Alloys*. Materials Science Forum, 2017. **879**: p. 113-118.
- [2] Bewlay, B.P., et al., *TiAl alloys in commercial aircraft engines*. Materials at High Temperatures, 2016. **33**: p. 549-559.
- [3] Kothari, K., R. Radhakrishnan, and N.M. Wereley, *Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques*. Progress in Aerospace Sciences, 2012. **55**: p. 1-16.
- [4] Chen, Y.Y., et al., *Research on the Hot Precision Processing of TiAl Alloys*. Materials Science Forum, 2009. **620**: p. 407-412.

- [5] Lapin, J., *TiAl-based alloys: Present status and future perspectives*, in *Metals*. 2009: Hradec nad Moravicí.
- [6] Paul, J.D.H. and F. Appel, *Work-hardening and recovery mechanisms in gamma-based titanium aluminides*. *Metall Mater Trans A* 2003. **34**: p. 2103-2111.
- [7] Chen, X., et al., *Dynamic recrystallization behavior of the Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy during isothermal hot deformation*. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2019. **29**: p. 587-594.
- [8] Shih, D. and G. Scarr, *High-Temperature Deformation Behavior of the  $\gamma$  Alloy Ti-48Al-2Cr-2Nb*. *MRS Online Proceedings Library*, 1990. **213**: p. 727-732.
- [9] Usta, M., et al., *Thermo-mechanical grain refinement in gamma (g) based TiAl intermetallics*. *Materials Science and Engineering: A*, 2003. **359**: p. 168-177.
- [10] Tian, S., et al., *Investigation on the microstructure evolution and dynamic recrystallization mechanisms of TiAl alloy at elevated temperature*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021. **14**: p. 968-984.
- [11] Wang, Y., et al., *Grain refinement of a TiAl alloy by heat treatment through near gamma transformation*. *Journal Of Materials Science*, 2001. **36**: p. 4465 – 4468.
- [12] Zhang, S.Z., et al., *Phase transformation and microstructure evolution of differently processed Ti-45Al-9Nb-Y alloy*. *Intermetallics*, 2012. **31**: p. 208-216.
- [13] Voort, G.F.V., *Handbook metallography and microstructures* Vol. 9. 2004, USA: ASM International.
- [14] B.H.Li, et al., *Microstructure and mechanical properties of as-cast Ti-43Al-9V-0.3Y alloy*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009. **473**(1-2): p. 123-126.
- [15] Tan, Y., et al., *Effect of Solution Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of the Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy Prepared by Electron Beam Smelting*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021. **31**: p. 1387–1396.
- [16] Duan, B., et al., *History and development of  $\gamma$ -TiAl alloys and the effect of alloying elements on their phase transformations*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022. **909**.
- [17] Genc, O. and R. Ünal, *Development of Gamma Titanium Aluminide ( $\gamma$ -TiAl) Alloys: A Review*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022. **929**.
- [18] Appel, F., et al., *Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys*. *Advance Engineering Materials*, 2000. **3**: p. 699-720.
- [19] Baker, I., *Recovery, recrystallization and grain growth in ordered alloys*. *Intermetallics*, 2000. **8**(9-11): p. 1183-1196.
- [20] Hu, Q., et al., *Hot deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy with near- $\gamma$  microstructure*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023. **945**.
- [21] Appel, F., *Mechanistic understanding of creep in gamma-base titanium aluminide alloys*. *Intermetallics*, 2001. **9**(10-11): p. 907-914.
- [22] Appel, F., *Diffusion assisted dislocation climb in intermetallic gamma TiAl*. *Materials Science and Engineering: A*, 2001. **317**(1-2): p. 115-127.

## Investigation and Determining the Temperature of the $\alpha_2$ to $\alpha$ Transformation During Hot Deformation of Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic

Hossein Rezaei<sup>1</sup>, Maryam Morakabati<sup>2\*</sup>, Amir Momeni<sup>3</sup>

1. PhD Student in Materials Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistance Professor, Faculty of Metallurgy and Material Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

\* Corresponding author: m\_morakabati@mut.ac.ir

### Abstract:

The aim of the present study is to investigate the occurrence of the  $\alpha_2$  to  $\alpha$  phase transformation during hot compressive deformation of Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic. To this end, hot compression tests were performed on samples of the intermetallic at temperatures of 1000, 1050, 1100, and 1150°C, with a constant strain rate of 0.01 s<sup>-1</sup>. After hot deformation at 1000 and 1050°C, tall peaks of the  $\gamma$  phase, along with relatively shorter peaks of the  $\alpha_2$  phase, were observed in the X-ray diffraction analysis results. With the increase in deformation temperature to 1100 and 1150°C, the  $\alpha_2$  phase peaks disappeared, and peaks of the  $\alpha$  phase emerged. After hot deformation at 1000 and 1050°C, bent and broken lamellae, along with some recrystallized grains, were observed in the microstructure. However, with the increase in hot deformation temperature to 1100°C, the onset of transformation led to the decomposition of the  $\alpha_2$  phase, creating decomposed regions rich in the  $\gamma$  phase, thus increasing the amount of this phase in the microstructure. Therefore, based on the above results, it can be concluded that the ordering transformation begins in the temperature range of 1050 to 1100°C and completes in the range of 1100 to 1150°C.

**Keywords:** Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic,  $\alpha_2/\alpha$  Transformation, bending Lamellae, recrystallization