



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## ارزیابی تاثیر عملیات حرارتی بر تحولات ساختاری و خواص مکانیکی 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 تاثیر چرخه‌های متفاوت عملیات حرارتی بر تحولات ساختاری و خواص مکانیکی ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb است. در این پژوهش ابتدا شمش تولید شده تحت عملیات همگن سازی در خلاء در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. سپس نمونه‌هایی از شمش همگن سازی شده در محدوده دمایی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، سبب ایجاد ساختار دوگانه شامل دانه‌های  $\gamma$  به همراه کولونی‌های لایه‌ای فاز  $\gamma$  و  $2\alpha$  با میانگین اندازه دانه ۱۱۶۰ میکرومتر شد. انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه باعث ایجاد ساختار شبه‌لایه‌ای از فازهای  $\gamma$  و  $2\alpha$  با اندازه دانه ۱۳۰۰ میکرومتر گردید. با افزایش زمان نگهداری به ۶۰ دقیقه، ساختار کاملاً لایه‌ای با میانگین اندازه دانه ۱۱۲۰ میکرومتر ایجاد شد. کاهش اندازه دانه در زمان نگهداری بیشتر به تکمیل فرایند تبلور همراه با ایجاد کولونی‌های جدید لایه‌ای و از بین رفتن دانه‌های گامای باقیمانده نسبت داده می‌شود. انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه نیز سبب تشکیل ساختار کاملاً لایه‌ای با اندازه دانه ۹۵۰ میکرومتر شد، اما توزیع اندازه دانه در این حالت یکنواخت‌تر از ساختار لایه‌ای تشکیل شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. با افزایش کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای، سختی ترکیب افزایش یافت. سختی ساختار دوگانه برابر ۲۸۲ ویکرز و ساختار شبه لایه‌ای برابر ۳۲۰ ویکرز اندازه گیری شد. نتایج آزمایش گسیختگی تنش نشان داد عمر گسیختگی ساختار لایه‌ای (عملیات حرارتی شده در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه) در دما و تنش ثابت برابر ۱۱۵ ساعت بوده است، درحالی که عمر گسیختگی ساختار دوگانه (عملیات حرارتی شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) برابر ۲۲ ساعت است. این اختلاف به فاصله اندک بین لایه‌ها نسبت داده می‌شود. وجود لایه‌ها سبب کاهش طول لغزش موثر نابجایی‌ها و دوقلوبی‌ها می‌شود و افزایش مقاومت خزشی می‌گردد.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

### واژه‌های کلیدی:

ترکیب بین‌فلزی  
Ti-48Al-2Cr-2Nb  
عملیات حرارتی،  
ساختار دوگانه،  
ساختار لایه‌ای،  
سختی،  
عمر گسیختگی خزشی.

### ارجاع به این مقاله:

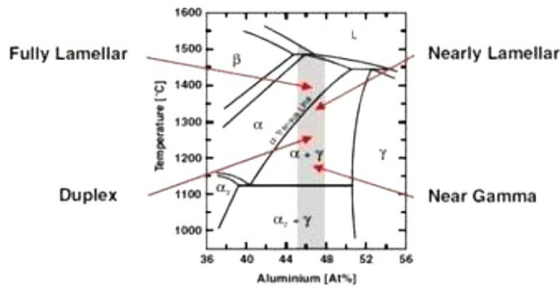
حسین رضایی، مریم مرکباتی، امیر مومنی، ارزیابی تاثیر عملیات حرارتی بر تحولات ساختاری و خواص مکانیکی ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۲، صفحات ۱۲۵-۱۳۲.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.384529.1173

### ۱- مقدمه

شدن بحرانی بالا به وجود می‌آیند [۱، ۲]. این آلیاژها تا نزدیکی دمای ذوب خود در حدود ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد نظم خود را از دست نمی‌دهد. دمای کاری مورد انتظار برای این آلیاژها در محدوده ۶۰۰ تا ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد [۳]. ساختار این ترکیبات در دمای محیط معمولاً از دو فاز  $\alpha_2$  و  $\gamma$  تشکیل می‌شود.

ترکیبات بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم از خواص ترموفیزیکی مناسبی مانند دمای ذوب بالا، چگالی پایین، مدول الاستیک بالا و پایداری ساختاری خوب برخوردار هستند. این خواص به دلایل مختلفی مانند طبیعت منظم ماده، پیوندهای قوی و دمای منظم



شکل ۱- ساختارهای منتج از عملیات حرارتی در دماهای مختلف آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb [۸].

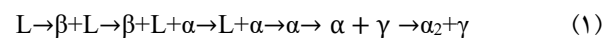
تاکنون تحقیقات متعددی با هدف شناسایی سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف برای دستیابی به ساختارهای دوگانه و لایه‌ای در ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Al انجام شده است. فوجز [۱۰] عملیات حرارتی دومرحله‌ای برای دستیابی به ساختار دوگانه در ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Al پیشنهاد داده است. مرحله اول این فرایند شامل آنیل در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت و مرحله دوم شامل آنیل در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت است. پس از این مراحل، ریزساختار شامل ترکیبی از دانه‌های کوچک  $\gamma$ ، لایه‌های  $\alpha_2/\gamma$  و دانه‌های هم‌محور بسیار کوچک  $\alpha_2$  در مرزهای سه‌گانه است. شارپنتیر و همکاران [۱۱] با بررسی پارامترهای مختلف عملیات حرارتی معتقدند حین سرد کردن این ترکیب از ناحیه تک‌فاز  $\alpha$  با سرعت‌های کمتر از ۵۰ درجه کلون بر ثانیه ساختار لایه‌ای تشکیل می‌شود، اما گائو و همکاران [۱۲] اعتقاد دارند زمان نگهداری اولیه در ناحیه تک‌فاز نیز بر ساختار نهایی تاثیرگذار است. در صورتیکه زمان نگهداری اندک باشد، انتظار می‌رود ساختار نهایی به شبه‌لایه‌ای متمایل گردد. علیرغم اینکه در هر دو پژوهش فوق بر لزوم عملیات حرارتی از ناحیه تک‌فاز تاکید شده است، اما یو و همکاران [۱۳] با انجام عملیات حرارتی دو مرحله‌ای در ناحیه دوفازی بر روی ترکیب بین‌فلزی مشابه Ti-47Al-2Cr-2Nb نیز دستیابی به ساختار کاملاً لایه‌ای را گزارش نموده‌اند. در این پژوهش هر کدام از مراحل در محدوده دمایی ۱۲۰۰ تا ۱۲۹۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های طولانی (حداقل ۴ ساعت برای هر مرحله) انجام شده است.

هدف از پژوهش حاضر بررسی امکان دستیابی به ساختارهای مختلف در ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb توسط کنترل پارامترهای عملیات حرارتی و همچنین تاثیر این ساختارها بر سختی و خواص گسیختگی تنش آلیاژ است.

شود. فاز  $\alpha_2$  دارای ساختار کریستالی هگزاگونال منظم D019 می‌باشد. توالی چیدمان این فاز به شکل ABAB بوده و ترکیب استوکیومتری آن  $Ti_3Al$  است [۴، ۵]. فاز  $\gamma$ ، ساختار تتراگونال با وجوه مرکزدار L10 دارد. توالی چیدمان آن به شکل ABCABC بوده و ترکیب استوکیومتری آن TiAl است [۵].

ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb از آلیاژهای میان رده این خانواده است که در حالت ریخته‌گری شده، استحکام تسلیم کششی دمای محیط آن ۳۰۰ مگاپاسکال و استحکام کششی نهایی آن ۴۸۰ مگاپاسکال است [۱]. خواص مکانیکی این ترکیب به ریزساختار آن وابسته است. تشکیل دو ریزساختار دوگانه<sup>۱</sup> و لایه‌ای<sup>۲</sup> بر اساس تاریخچه تولید آن محتمل است. ریزساختار لایه‌ای شامل صفحات متوالی  $\gamma$  و  $\alpha_2$  است که در لایه‌های مختلف قرار گرفته‌اند. دوقلویی‌ها و نابجایی‌ها در فصل مشترک لایه‌ها ایجاد شده و باعث ارتقای استحکام دما بالا، چقرمگی شکست و مقاومت خزشی می‌شوند. ساختار دوفازی ترکیبی از دانه‌های هم‌محور  $\gamma$  و کولونی‌های لایه‌ای است. پارامترهایی مانند فاصله لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، کسر حجمی ریزساختارها و اندازه دانه‌ها بر خواص مکانیکی آلیاژ اثرگذار هستند. با ایجاد ریزساختار لایه‌ای بین دانه‌های کوچک  $\gamma$ ، انعطاف‌پذیری افزایش یافته و مقاومت به خزش و استحکام دما بالا نیز با اضافه شدن ریزساختار لایه‌ای بهبود می‌یابند [۶، ۷].

عملیات حرارتی یکی از مهمترین مراحل در فرایند تولید ترکیبات بین فلزی آلومیناید تیتانیوم است. در ترکیباتی با حدود ۴۸ درصد آلومینیم از دماهای بالاتر از دمای ذوب تا دمای محیط، تشکیل سه فاز جامد اصلی و وقوع دو استتال پریکتیک محتمل است. توالی رخدادها در فرایند سرمایش به شکل رابطه (۱) خواهد بود [۸]:



در آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb، ممکن است حین سرمایش مقادیر اندکی از فاز  $\beta$  نیز ایجاد شود، مخصوصاً به این دلیل که کروم به شکل‌گیری و پایداری این فاز کمک می‌کند [۹]. ساختارهای منتج از عملیات حرارتی در دماهای مختلف این آلیاژ در شکل (۱) نشان داده شده است. هرچند بسته به نرخ سرمایش و زمان نگهداری ممکن است ریزساختار حاصله متفاوت باشد.

<sup>2</sup> Lamellar

<sup>1</sup> Duplex

## ۲- مواد و روش تحقیق

ذوب اولیه و ریخته‌گری شمش ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb مورد استفاده در این پژوهش با فرآیند ذوب قوسی تحت خلاء (VAR<sup>۱</sup>) انجام شده و سپس به منظور کاهش جدایش‌ها و ناخالصی‌ها، این شمش تحت فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء قرار گرفت. ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده بر اساس نتایج آنالیز EDS<sup>۲</sup> در جدول (۱) نمایش داده شده است. شمش تولید شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت در محیط خلاء همگن‌سازی شد. نمونه‌های جدا شده از این شمش با هدف دستیابی به ساختار لایه‌ای تحت عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد (ناحیه تکفاز  $\alpha$ ) به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه به همراه سرمایش در کوره تا دمای محیط قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ی دیگری با هدف دستیابی به ساختار لایه‌ای ریزدانه در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتیگراد (نیمه پایینی ناحیه تکفاز  $\alpha$  و نزدیک به محدوده دمایی ورود به ناحیه دوفازی) به مدت ۴۵ دقیقه به همراه سرمایش در کوره تا دمای محیط عملیات حرارتی شد. به دلیل کاهش اثرات مخرب اکسیداسیون دما بالا (مشاهده شده در نمونه‌های قبلی)، در این چرخه عملیات حرارتی از اتمسفر گاز آرگون استفاده شد. نمونه‌های عملیات حرارتی شده توسط محلول کروم<sup>۳</sup> [۱۴] حکاکی شدند. به منظور بررسی‌های تکمیلی، آزمایش خزش در دمای ۷۶۰ درجه سانتیگراد و تنش ۲۵۰ مگاپاسکال بر روی دو نمونه با ریزساختارهای اولیه متفاوت انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-XMU و میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX 51 انجام گرفت. همچنین ارزیابی سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده توسط دستگاه سختی‌سنجی به روش ویکرز و طبق استاندارد ASTM 384 [۱۵] و محاسبه اندازه دانه بر اساس استاندارد ASTM E112 [۱۶] انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) ریزساختار نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتیگراد (ناحیه دوفازی  $\alpha+\gamma$ ) به مدت ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. همچنین نتایج آنالیز EDS برای شناسایی فازهای ایجاد شده در نقاط مشخص شده بر حسب مقدار درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده در جدول (۲) نشان داده شده است. مقدار آلومینیم در نقطه A بیشتر از نقطه B است، این میزان در نقطه A نزدیک به مقدار آلومینیم در فاز  $\gamma$  و در نقطه B نزدیک به مقدار آلومینیم در فاز  $\alpha$  است.

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

Ti	Al	Cr	Nb
باقیمانده	۴۷/۸	۱/۹	۲

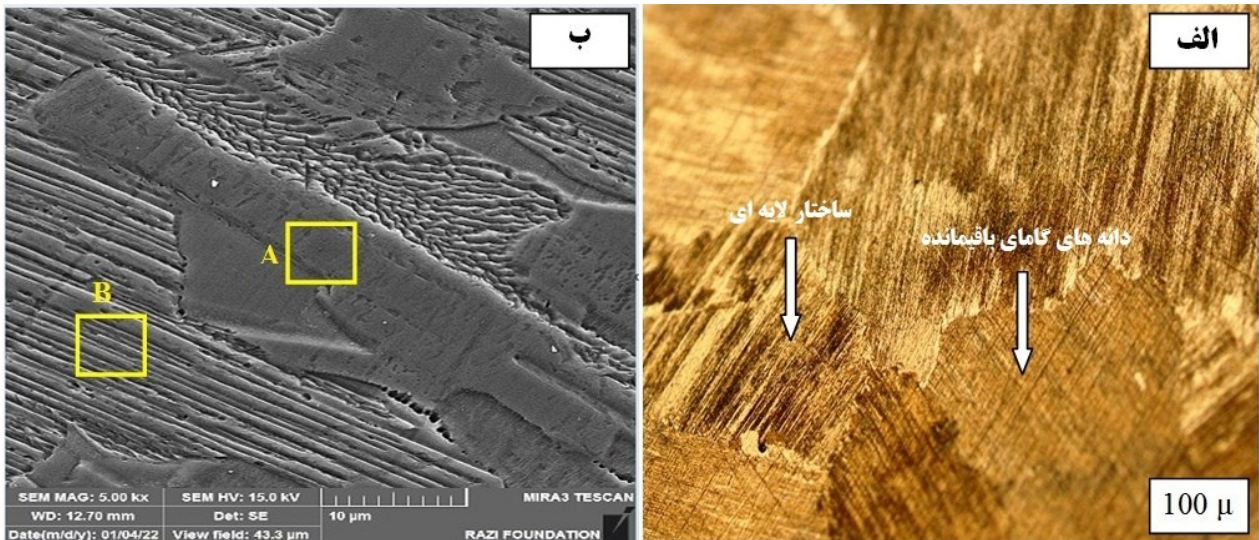
جدول ۲- آنالیز EDS نقاط مشخص شده در تصویر SEM پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت.

نام عنصر	نقطه A (درصد اتمی)	نقطه B (درصد اتمی)
آلومینیم	۴۶/۳	۲۶/۹۵
تیتانیوم	۴۸/۴۵	۶۴/۲۸
کروم	۱/۱۸	۴/۸۴
نیوبیوم	۴/۳۴	۳/۹۳

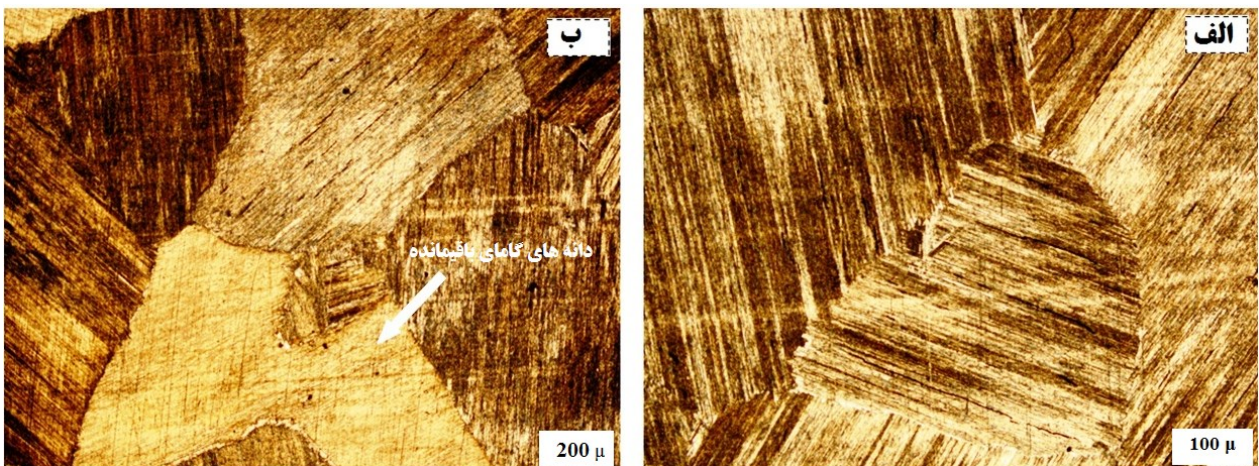
مقدار نیوبیم در هر دو فاز تقریباً یکسان است، اما مقدار کروم در نقطه B بسیار بیشتر از نقطه A است. هلوپیک [۱۷] معتقد است نفوذپذیری نیوبیم در فازهای  $\gamma$  و  $\alpha_2$  برابر است، در حالی که ضریب تفکیک<sup>۴</sup> کروم در دو فاز متفاوت بوده و امکان وجود آن در فاز  $\alpha_2$  بیشتر از فاز  $\gamma$  است [۱۸]. با توجه به مقدار درصد اتمی عناصر در ساختار و مشاهدات میکروسکوپ نوری در شکل (۲-الف) می‌توان نتیجه گرفت ساختار حاصل از نوع دوگانه شامل دانه‌های  $\gamma$  به همراه کولونی‌های لایه‌ای فاز  $\gamma$  و  $\alpha_2$  است. 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 میکرومتر است.

در شکل (۳)، تصاویر ریزساختار ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد (ناحیه تک‌فاز  $\alpha$ ) به مدت ۳۰ دقیقه نمایش داده شده است. علیرغم اینکه کولونی‌های لایه‌ای در بخش عمده‌ای از ریزساختار ایجاد شده‌اند (شکل ۳-الف)، اما کماکان دانه‌های  $\gamma$  نیز در ساختار باقیمانده‌اند. نمونه‌ای از این دانه‌ها در شکل (۳-ب) با فلش سفیدرنگ نشان داده شده است. بنابراین به نظر می‌رسد پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه، ساختار شبه لایه‌ای ایجاد می‌شود. اندازه دانه میانگین برابر ۱۳۰۰ میکرومتر است. زمانبر بودن انحلال دانه‌های گاما باعث می‌شود تا در عملیات حرارتی با زمان اندک، امکان ایجاد ساختار کاملاً لایه‌ای وجود نداشته باشد [۱۹]. ریزساختار حاصل به پارامترهای عملیات حرارتی مانند دما و زمان وابسته است. با افزایش دمای انحلال، اندازه دانه بزرگ‌تر شده و فاصله بین لایه‌ها نیز افزایش می‌یابد [۲۰].

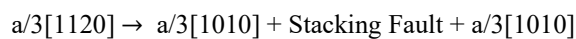
<sup>3</sup> Kroll<sup>4</sup> Partitioning Coefficient<sup>1</sup> Vacuum Arc Remelting<sup>2</sup> Energy Dispersive Spectroscopy



شکل ۲- (الف) تصاویر میکروسکوپ نوری و (ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت.



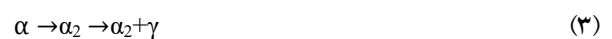
شکل ۳- (الف) تصاویر میکروسکوپ نوری ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و (ب) دانه‌های گامای باقیمانده در همان شرایط عملیات حرارتی.



(۴)

شکل‌گیری لایه‌ها به نقایص چیدمان بستگی دارند، زیرا فازهای جدید ترجیحاً در نقاط دارای عیب مانند نقایص چیدمان جوانه زنی و رشد می‌کنند. نقایص چیدمان در شبکه  $\alpha$  به عنوان هسته های جوانه‌زنی فاز  $\gamma$  هستند که به شکل جانبی در طول صفحات رابط (۰۰۱) توسط مکانیزم نفوذ کوتاه دامنه گسترش یافته و ساختار لایه‌ای ایجاد می‌کنند [۲۱]. استحاله لایه‌های  $\alpha$  به  $\gamma$  در نواحی غنی از آلومینیم آسان‌تر رخ می‌دهد، دلیل این موضوع به انرژی آزاد شیمیایی بیشتر ایجاد شده توسط آلومینیم نسبت داده می‌شود که به عنوان نیرو محرکه استحاله عمل می‌کند [۲۳].

گزارش شده است که پس از همگن‌سازی در دمای ۱۳۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، ساختار از حالت دوتایی خارج شده و فقط شامل کولونی‌های لایه‌ای خواهد بود [۲۱]. مطابق روابط ۲ و ۳، ریزساختار لایه‌ای استحاله فازهای  $\alpha$  یا  $\alpha_2$  تشکیل می‌شود [۲۲]:



مطالعات [۲۲] نشان داده است که استحاله ایجاد ساختار لایه‌ای شامل واکنش یک نابجایی کامل  $a/3[1120]$  و تبدیل آن به دو نابجایی جزئی شاکلی<sup>۱</sup> در مرز نقایص چیدمان مطابق رابطه (۴) است.

<sup>۱</sup> Shockley

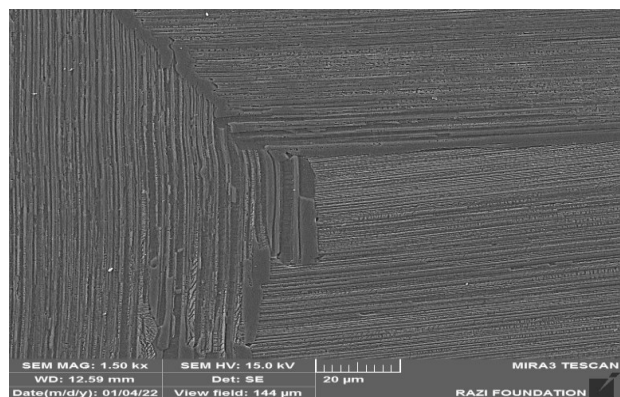
است. هر چند اندازه کولونی‌ها اندکی کمتر (حدود ۱۷۰ میکرومتر) از اندازه کولونی‌ها در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه است، اما توزیع اندازه‌ها یکنواخت‌تر می‌باشد. به همین دلیل به نظر می‌رسد هر چند جوانه‌زنی و تبلور مجدد کولونی‌های لایه‌ای به طور کامل انجام شده، اما دما و زمان عملیات برای وقوع پدیده رشد دانه کافی نبوده است.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه تحت اتمسفر آرگون.

تغییرات سختی ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb بر اساس پارامترهای عملیات حرارتی گوناگون (ساختارهای مختلف) در شکل (۶) نشان داده شده است. کمترین سختی در ریزساختار دوگانه مشاهده شده است. با افزایش کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای، سختی افزایش می‌یابد، به طوری که سختی ساختار برابر ۲۸۲ ویکرز، ساختار شبه‌لایه‌ای برابر ۳۲۰ ویکرز و دو ساختار کاملاً لایه‌ای ۳۹۳ و ۳۸۰ ویکرز اندازه‌گیری شده است. دلیل این موضوع به افزایش میزان فاز  $\alpha_2$  در ساختار لایه‌ای نسبت داده می‌شود. این لایه‌ها مانعی برای حرکت نابجایی‌ها هستند، لذا نابجایی‌ها در مسیر حرکت به موانع کمتری برخورد کرده و درگیری و قفل شدن کمتری را تجربه می‌کنند، به همین دلیل سختی ساختار لایه‌ای از ساختار دوگانه بیشتر می‌شود [۲۱]. در ساختار دوگانه وجود دانه‌های  $\gamma$  به دلیل نبود لایه‌های  $\alpha_2$ ، سبب افزایش مسیر آزاد تحرک نابجایی‌ها و در نتیجه افت سختی و استحکام می‌گردد. همچنین اختلاف بین سختی دو ساختار کاملاً لایه‌ای را نیز می‌توان به فاصله لایه‌های  $\gamma$  و  $\alpha_2$  از یکدیگر نسبت داد [۲۶]. در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه، فاصله لایه‌ها به دلیل دما و زمان بیشتر فرایند عملیات حرارتی افزایش یافته و به حدود ۱۰ میکرومتر رسیده است. افزایش ضخامت لایه‌ها به معنای افزایش فاصله طی شده نابجایی‌ها تا زمان برخورد به موانع بوده و لذا سختی را کاهش می‌دهد.

در شکل (۴)، تصویر ریزساختار ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه نمایش داده شده است. پس از عملیات حرارتی در شرایط مذکور، تمامی ساختار پوشیده از کولونی‌های لایه‌ای فازهای  $\gamma$  و  $\alpha_2$  است. اندازه این کولونی‌ها ۱۱۲۰ میکرومتر محاسبه شده است. اندازه دانه به نسبت عملیات حرارتی در همین دما و زمان کمتر (۳۰ دقیقه)، اندکی کاهش داشته است. این کاهش اندازه دانه به تکمیل تبلور مجدد و ایجاد ساختار لایه‌ای در تمامی ساختار نسبت داده می‌شود. توزیع اندازه دانه در این شرایط نرمال نیست، یعنی دانه‌هایی با اندازه حداقل ۴۶۰ میکرومتر و حداکثر ۲۳۰۰ میکرومتر نیز در تصاویر ریزساختاری قابل مشاهده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت علی‌رغم اینکه کولونی‌هایی که در ابتدای استحاله تشکیل شده‌اند، به مرحله رشد دانه رسیده‌اند، اما همچنان جوانه‌زنی و ایجاد کولونی‌های جدید نیز در حال انجام است. قابلیت نفوذ بالای عناصر و همچنین نبود ذرات فاز دوم در دمای بالا، دلایل اصلی رشد سریع دانه‌ها هستند [۱۳]. با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد از ۳۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه، ساختار حاصل از شبه لایه‌ای به کاملاً لایه‌ای تبدیل می‌شود. افزایش زمان عملیات حرارتی سبب افزایش کسر حجمی ناحیه لایه‌ای و همچنین افزایش ضخامت لایه‌ها می‌شود [۲۴]. وجود دانه‌های با اندازه اندک هم‌زمان با وجود کولونی‌های رشد یافته در ساختار آلیاژهای تیتانیوم گاما در سایر پژوهش‌های مشابه [۲۵] نیز گزارش شده است.

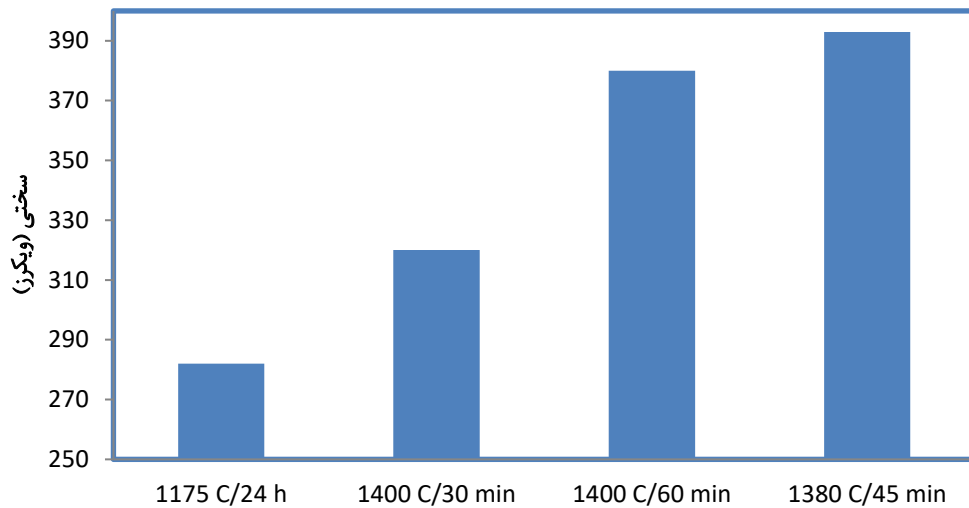


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه.

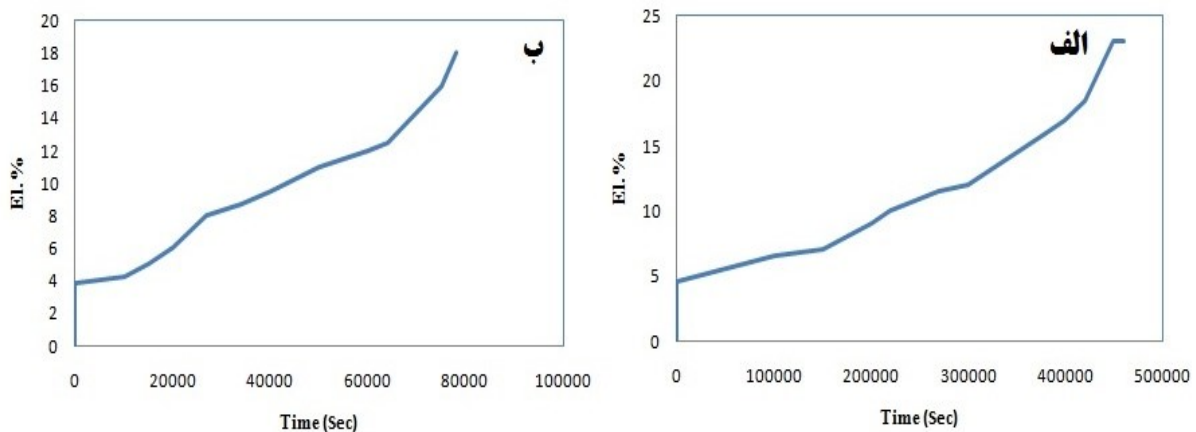
در شکل (۵)، ریزساختار ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه در محیط آرگون نشان داده شده است. ساختار حاصل پوشیده از کولونی‌های لایه‌ای فازهای  $\gamma$  و  $\alpha_2$  است. میانگین اندازه کولونی‌ها در این ساختار برابر ۹۵۰ میکرومتر محاسبه شده

به وجود لایه‌ها و فاصله اندک بین آنها در ساختار کاملاً لایه‌ای نسبت داده می‌شود. از آنجا که حرکت نابجایی‌ها در دمای بالا تسهیل می‌شود، وجود لایه‌ها سبب کاهش طول لغزش موثر نابجایی‌ها و دوقلوبی‌ها می‌شود، به همین دلیل مقاومت ترکیب به تغییر شکل خزشی بیشتر است [۲۸]. اما با افزایش دانه‌های گامای باقیمانده بین لایه‌ها، مانعی برای حرکت نابجایی‌ها وجود نداشته و نرخ خزش ساختار دوگانه افزایش می‌یابد [۳۰]. نرخ خزش کمتر آلیاژهای لایه‌ای نتیجه وجود تنش‌های محدودکننده در فصل مشترک لایه‌ها است. به همین دلیل کاهش فاصله بین لایه‌ها در ساختارهای کاملاً لایه‌ای مقاومت خزشی را بهبود می‌بخشد [۳۱].

شکل (۷-الف) نتایج آزمایش گسیختگی تنشی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۲۵۰ مگاپاسکال را با ریزساختار اولیه کاملاً لایه‌ای و شکل (۷-ب) همین نتایج را برای ترکیبی با ساختار دوگانه نشان می‌دهد. عمر گسیختگی و مقاومت خزشی ساختار لایه‌ای (عملیات حرارتی شده در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه) در دما و تنش ثابت از ساختار دوگانه (عملیات حرارتی شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) بیشتر است. شکست خزشی در ساختار لایه‌ای پس از ۱۱۵ ساعت رخ می‌دهد، در حالی که تحمل خزشی ساختار دوگانه ۲۲ ساعت است. منابع متعددی [۲۴، ۲۷-۲۹] لغزش نابجایی‌ها را مکانیزم کنترل‌کننده خزش در محدوده دما و تنش آزمون فوق دانسته‌اند. این موضوع



شکل ۶- تغییرات سختی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی با پارامترهای مختلف.



شکل ۷- نتایج آزمایش گسیختگی تنشی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد با تنش ۲۵۰ مگاپاسکال برای ساختارهای: الف) لایه‌ای و ب) دوگانه.

## ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- ریزساختار ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات همگن سازی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، دوگانه (Duplex) شامل دانه‌های  $\gamma$  به همراه کولونی‌های لایه‌ای از فازهای  $\alpha_2$  و  $\gamma$  است.
- ۲- پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (ناحیه تکفاز  $\alpha$ ) به مدت ۳۰ دقیقه، ساختار دوتایی به ساختار شبه‌لایه‌ای تبدیل می‌شود. افزایش زمان نگهداری تا ۶۰ دقیقه سبب تشکیل ساختار کاملاً لایه‌ای با اندازه دانه ۱۱۲۰ میکرومتر خواهد شد.
- ۳- با کاهش دما و زمان عملیات حرارتی در ناحیه تک‌فاز  $\alpha$  (دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه)، ساختار کاملاً لایه‌ای با اندازه دانه میانگین ۹۵۰ میکرومتر تشکیل می‌شود. هر چند ساختار تشکیل شده مشابه نتایج عملیات در دمای بالاتر و زمان بیشتر (دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه) است، اما توزیع دانه‌بندی پس از عملیات حرارتی مذکور، یکنواخت‌تر بوده و کولونی‌های رشد یافته در ریزساختار مشاهده نمی‌شود.
- ۴- با افزایش کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای، سختی ترکیب افزایش می‌یابد. سختی ساختار دوگانه برابر ۲۸۲ ویکرز و ساختار شبه لایه‌ای برابر ۳۲۰ ویکرز است، در حالیکه ساختار کاملاً لایه‌ای سختی ۳۸۰ تا ۳۹۰ ویکرز خواهد داشت. افزایش میزان فاز  $\alpha_2$  در ساختار لایه‌ای، مانعی برای حرکت نابجایی‌ها است. در ساختار دوگانه وجود دانه‌های  $\gamma$  به دلیل نبود لایه‌های  $\alpha_2$ ، سبب افزایش مسیر آزاد تحرک نابجایی‌ها و در نتیجه افت سختی می‌گردد.
- ۵- عمر گسیختگی خزشی ساختار لایه‌ای در دما و تنش ثابت (۱۱۵ ساعت) از ساختار دوگانه (۲۲ ساعت) بیشتر است. این موضوع به فاصله اندک بین لایه‌ها نسبت داده می‌شود. وجود لایه‌ها سبب کاهش طول لغزش موثر نابجایی‌ها و دوقلوبی‌ها می‌شود.

## مراجع

- [1] Chen Y.Y., et al., Research on the hot precision processing of TiAl alloys, Materials Science Forum, 2009, 620, 407-412.
- [2] Lütjering G., Williams J.C., Titanium, 1st, ed. E.M.a. Processes, Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [3] Matthew J., Donachie J., Titanium - a technical guide, 2000, United States of America ASM International.
- [4] Appel F., Paul J.D.H., Oehring M., Gamma titanium aluminide alloys, Germany, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011.
- [5] Liu C.T., Stiegler J.O., ASM handbook online-titanium aluminides, titanium aluminides, ASM International, 2002.
- [6] Clemens, H., Mayer S., Intermetallic gamma-titanium aluminide based alloys from a metallographic point of view - a continuation, Praktische Metallographie, 2011, 48(2) 64-100.
- [7] Takeyama M., Kobayashi S., Physical metallurgy for wrought gamma titanium aluminides: Microstructure control through phase transformations, Intermetallics, 2005, 13(9) 993-999.
- [8] Franzén S.F., Karlsson J., Titanium aluminide manufactured by electron beam melting, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden, 2010.
- [9] Hu D., Botten R., Phase transformations in some TiAl-based alloys, Intermetallics, 2002, 10(7) 701-715.
- [10] Fuchs E., Thermo-Mechanical processing (TMP) of Ti-48Al-2Nb-2Cr based alloys, in Materials and Processes. 1995: United States.
- [11] Charpentier M., Hazotte A., Daloz D., Lamellar transformation in near-Gamma TiAl alloys-Quantitative analysis of kinetics and microstructure, Materials Science and Engineering A, 2008, 491, 321-330.
- [12] Gao Z., et al., A Newly generated nearly lamellar microstructure in cast Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy for high-temperature strengthening, Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50, 5839-5852.
- [13] Yu W., et al., Effects of heat treatments on microstructures of TiAl alloys, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 11, 1158-1178.
- [14] Voort G.F.V., Handbook metallography and microstructures Vol. 9. 2004, USA: ASM International.
- [15] ASTM E384-Standard test method for microindentation hardness of materials, 2017.
- [16] ASTM E 112: Standard test methods for determining average grain size, 2004.
- [17] Hellwig A., Palm M., and Inden G., Phase equilibria in the Al-Nb-Ti system at high temperatures, Intermetallics, 1998, 6(2) 79-94.
- [18] Kainuma R., et al., Phase equilibria among  $\alpha$  (hcp),  $\beta$  (bcc) and  $\gamma$  (L10) phases in Ti-Al base ternary alloys, Intermetallics, 2000, 8(8) 855-867.
- [19] Qin G., Wang J., Hao S., Discontinuous coarsening of primary  $\alpha_2/\gamma$  lamellae at colony boundaries in  $\gamma$ -TiAl-based alloys. Intermetallics, 1999, 7(1) 1-4.
- [20] Lu Z., et al., Microstructure and mechanical properties of intermetallic Al3Ti alloy with residual aluminum, Materials and Design, 2016, 110, 466-474.
- [21] 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, 1387-1396.
- [22] Li B.H., et al., Microstructure and mechanical properties of as-cast Ti-43Al-9V-0.3Y alloy, Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1-2) 123-126.
- [23] Huang H., et al., Phase transformation and microstructure evolution of a beta-solidified gamma-TiAl alloy, Journal of Alloys and Compounds, 2020, 860, 158082.
- [24] Ott E.A., Pollock T.M., Microstructural development and creep deformation in equiaxed  $\gamma$ ,  $\gamma+\alpha_2$  and  $\gamma + \alpha_2 + B_2$  titanium aluminides, Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29, 965-978.
- [25] Wang Y., et al., Grain refinement of a TiAl alloy by heat treatment through near gamma transformation, Journal of Materials Science, 2001, 36, 4465-4468.
- [26] Cao S., et al, Phase transformations of the L12-Ti3Al phase in  $\gamma$ -TiAl alloy, Materials & Design, 2017, 121, 61-68.
- [27] Kim Y.K., et al., High-temperature creep behavior of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by

- [30] Maziasz P.J., Liu C.T., Development of ultrafine lamellar structures in two-phase  $\gamma$ -TiAl alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1998, 29, 105-117.
- [31] Bartholomeusz M.F., Wert J.A., Modeling creep deformation of a two-phase TiAl/Ti3Al alloy with a lamellar microstructure, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, 25, 2161-2171.
- electron beam melting, *Materials Science & Engineering A*, 2019, 763.
- [28] Viswanathan G.B., et al., Creep properties of a fully-lamellar Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2001. 319, 833-837.
- [29] Zhang W.J., Deevi S.C., The controlling factors in primary creep of TiAl-base alloys, *Intermetallics*, 2003, 11(2) 177-185.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Evaluation of the Effect of Heat Treatment on Structural Changes and Mechanical Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic

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

1. PhD Student, 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. Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Material Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

\* Corresponding author: [m\\_morakabati@mut.ac.ir](mailto:m_morakabati@mut.ac.ir)

#### Paper history:

Received: 04 February 2023  
Accepted: 25 April 2023

#### Keywords:

Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic,  
Heat treatment,  
Duplex microstructure,  
Lamellar microstructure,  
Hardness,  
Stress rupture.

#### Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of different heat treatment cycles on structural changes and mechanical properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic compound. In this research, first, the produced ingot was homogenized in a vacuum at a temperature of 1175 degrees Celsius for 24 hours. Then samples of homogenized ingots were subjected to heat treatment in the temperature range of 1380 to 1400 degrees Celsius for 30 to 60 minutes. Heat treatment at 1175°C for 24 hours resulted in the formation of a duplex structure including  $\gamma$  grains along with colonies of  $\gamma$  and  $\alpha_2$  layers with an average grain size of 1160 micrometers. Heat treatment at 1400°C for 30 minutes created a near lamellar structure of  $\gamma$  and  $\alpha_2$  phases with a grain size of 1300 micrometers. By increasing the time to 60 minutes, a fully lamellar structure with an average grain size of 1120 micrometers was created. The decrease in grain size with increasing the heat treatment time is mostly attributed to the completion of the recrystallization process along with the creation of new lamellar colonies and the destruction of the remaining gamma grains. Heat treatment at a temperature of 1380 degrees Celsius for 45 minutes resulted in the formation of a completely fully lamellar structure with a grain size of 950 micrometers, but the grain size distribution in this case is more uniform than the lamellar structure formed at a temperature of 1400 degrees. By increasing the volume fraction of layered colonies, the hardness of the alloy increased. The hardness of the duplex structure was measured as 282 Vickers and the near lamellar structure was 320 Vickers. The results of the stress rupture test showed that the creep rupture life of the lamellar structure (heat treated at 1380 degrees Celsius for 45 minutes) at constant temperature and stress was 115 hours, while the life of the duplex structure (heat treated at a temperature of 1175 degrees Celsius for 24 hours) was 22 hours. This difference is attributed to the small distance between the layers. The presence of layers reduces the effective slip length of dislocations and twins and increases the creep resistance.

#### Please cite this article using:

Hossein Rezaei, Maryam Morakabati, Amir Momeni, Evaluation of the Effect of Heat Treatment on Structural Changes and Mechanical Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic, in Persian, *Founding Research Journal*, 2022, 6(2) 125-132.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.384529.1173