Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.3/ 47-57

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.3.4.0

Development of a Novel Heat Treatment Method to Achieve a Fine-grained Near Lamellar Microstructure in Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic

Hossein Rezaei[1], Maryam Morakabati[2*], Amir Momeni[3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

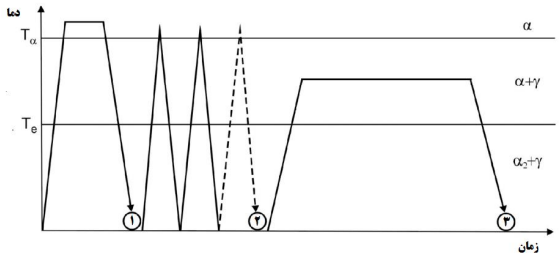
[2] Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

[3] Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Material Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

HIGHLIGHTS

- Three-stage heat treatment
- First step: single-phase annealing at 1400 °C for one hour and cooling in the furnace.
- Second stage: Cyclic heat treatment (five cycles) and cooling in air
- Third step: annealing at 1225°C for one hour and cooling in air

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 3 May 2024

Received in revised form: 23 May 2024

Accepted: 1 June 2024

Available online: 6 June 2024

*Correspondence:

m_morakabati@mut.ac.ir

How to cite this article:

H. Rezaei. M. Morakabati, A. Momeni. Development of a novel heat treatment method to achieve a fine-grained near lamellar microstructure in Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(3):47-57.

Keywords:

Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic

Cyclic Heat Treatment

Lamellar Microstructure

Grain Refinement

ABSTRACT

The aim of the current research is to achieve a fine grain structure (less than 200 micrometers) in Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic by a three-step heat treatment and to investigating the parameters affecting this process. For this purpose, after the homogenization at 1175 C for 24 hours for eliminating the cast structure, three-stage heat treatment including the first stage (single-phase annealing at 1400 C for one hour with cooling in furnace and air environments), the second stage (cyclic operations including repeated heating up to 1400 C for three, five and ten cycles and cooling in air and water environments) and the third stage (Two-phase annealing at temperatures of 1175, 1225 and 1275 C for one hour) was performed. Finally, single-phase annealing at 1400°C for one hour and cooling in the furnace, then cyclic heat treatment with five cycles at the same temperature with cooling in air and annealing at 1225°C for one hour is suggested as the optimal process to create a semi-lamellar structure with the smallest colony size.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۳/ صفحه ۴۷-۵۷

نشریه مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.3.4.0

توسعه یک روش عملیات حرارتی جدید برای دستیابی به ریزساختار شبه‌لایه‌ای ریزدانه در ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb

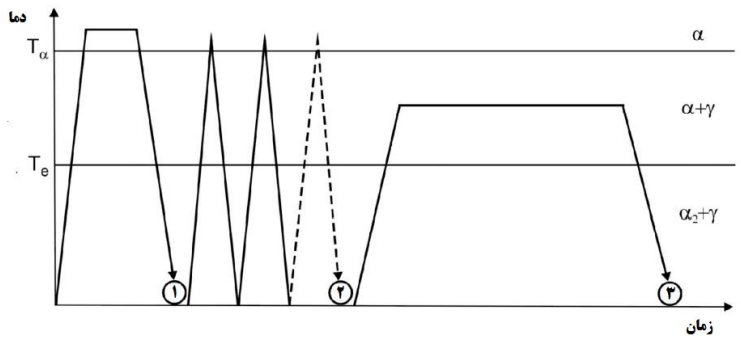
حسین رضایی[۱]، مریم مرکباتی[۲*]، امیر مؤمنی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[۲] دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[۳] دانشیار، دانشکده متالورژی و مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- عملیات حرارتی سه مرحله‌ای
- مرحله اول: آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در کوره
- مرحله دوم: عملیات حرارتی چرخه‌ای به تعداد پنج چرخه سرمایش در هوا
- مرحله سوم: آنیل در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت

چکیده

هدف از پژوهش حاضر دستیابی به ساختار ریزدانه (کمتر از ۲۰۰ میکرومتر) در ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb از طریق عملیات حرارتی سه‌مرحله‌ای و بررسی پارامترهای مؤثر بر این فرایند می‌باشد. به همین منظور پس از عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت با هدف از بین بردن ساختار ریختگی، عملیات حرارتی سه مرحله ای شامل مرحله اول (آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت با سرمایش در محیط‌های کوره و هوا)، مرحله دوم (عملیات چرخه‌ای شامل گرمایش مکرر تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به تعداد سه، پنج و ده چرخه و سرمایش در محیط‌های آب و هوا) و مرحله سوم (آنیل دوفازی در دماهای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت) انجام پذیرفت. در نهایت انجام عملیات آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در کوره به همراه عملیات حرارتی چرخه‌ای به تعداد پنج چرخه در همان دما با سرمایش در هوا و نهایتاً آنیل در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت به عنوان فرایند بهینه برای ایجاد ساختار شبه‌لایه‌ای با کمترین اندازه کولونی، پیشنهاد می‌شود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷

*نویسنده مسئول:

m_morakabati@mut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb

عملیات حرارتی چرخه‌ای

ساختار لایه‌ای

ریزدانگی

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) توزیع‌شده است.

© نویسندگان

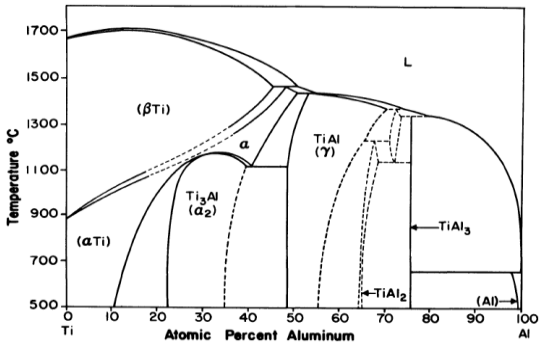
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

ترکیبات بین فلزی آلومیناید تیتانیوم به دلیل استحکام دمابالای مناسب و چگالی اندک به‌عنوان یکی از جایگزین‌های بالقوه برای سوپرآلیاژها در کاربردهای صنایع هوایی، هوافضا و نیروگاهی شناخته می‌شوند، هرچند کاربری تجاری آنان در صنعت به دلیل کارپذیری اندک محدود می‌گردد [۱]. دمای کاری مورد انتظار این ترکیبات بین ۶۰۰ تا ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است [۲]. آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb یکی از ترکیبات میان رده این خانواده است که برای ارتقای خواص مکانیکی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به اکسیداسیون آلیاژ Ti-48Al-1V توسعه یافت [۳]. در این ترکیبات امکان تشکیل ساختارهای هم‌محور، لایه‌ای و دوگانه وجود دارد [۴]. ریزساختار هم‌محور شامل دانه‌های تک‌فاز γ است که مدول الاستیک مناسب و خواص دمابالای بهبودیافته‌ای در مقایسه با آلیاژهای مرسوم تیتانیوم دارد[۵]. ریزساختار لایه‌ای شامل صفحات متوالی γ با ترکیب TiAl و α_2 با ترکیب Ti_3Al است که در لایه‌های مختلف قرارگرفته‌اند، این ریزساختار استحکام دمابالای بهتری نسبت به ساختار هم‌محور دارد [۶]. ساختار دوگانه ترکیبی از دانه‌های هم‌محور γ و کولونی‌های لایه‌ای است. پارامترهایی مانند فاصله لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، کسر حجمی ریزساختارها و اندازه دانه‌ها بر خواص مکانیکی آلیاژ اثرگذار هستند [۷]. علاوه بر ترکیب شیمیایی، پارامترهای عملیات حرارتی مانند دما و نرخ سرمایش نیز بر شرایط پایداری هر یک از این فازها و همچنین خواص مکانیکی آلیاژ مؤثر هستند [۸]. هان و همکاران [۹] معتقدند آنیل این ترکیب ریختگی در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه سبب ایجاد ساختار لایه‌ای درشت‌دانه شده و استحکام تسلیم آن را از ۳۱۲ مگا پاسکال به ۳۶۰ مگا پاسکال افزایش می‌دهد. همچنین پژوهشگران [۱۰] معتقدند با کنترل شرایط عملیات حرارتی می‌توان سختی نمونه‌های همگن‌سازی شده را از ۲۵۰ ویکرز به ۳۵۰ ویکرز افزایش داد.

تاکنون تحقیقات متعددی با هدف شناسایی سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف برای دستیابی به ساختارهای دوگانه و لایه‌ای در ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Al انجام‌شده است. شارپنتیر و همکاران [۱۱] و گائو و همکاران [۱۲] در پژوهش‌های جداگانه با سرمایش ترکیب از ناحیه تک‌فاز α با نرخ‌های سرمایش و زمان‌های نگهداری متفاوت به ساختار لایه‌ای با اندازه دانه بیش از ۱۱۰۰ میکرومتر دست یافتند. هرچند ساختار لایه‌ای سبب افزایش سختی و بهبود خواص خزشی این ترکیب می‌شود [۱۳]، اما کارپذیری داغ آن اندک بوده و انجام فرایندهایی برای ارتقای قابلیت شکل‌پذیری این ترکیب را ضروری می‌سازد [۱۴]. ایجاد توازن بهینه بین مقاومت به خزش و مقاومت به ترک و همچنین استحکام و شکل‌پذیری مناسب را می‌توان از طریق ساختارهای لایه‌ای یا شبه لایه‌ای ریزدانه به دست آورد [۱۵]. این ساختارها از طریق تغییرشکل داغ یا فرایندهای عملیات حرارتی کنترل‌شده قابل‌دستیابی هستند [۱۶].

یکی از روش‌های ریزدانه کردن این ترکیبات، انجام عملیات حرارتی چرخه‌ای است. این عملیات در آلیاژهای تیتانیوم گاما شبیه به عملیات حرارتی چرخه‌ای فولادها و بر مبنای وقوع استحاله‌های فازی متعدد حین سرمایش و گرمایش انجام می‌گیرد [۱۷]. دمای این عملیات بر مبنای دماهای T_α (دمای ورود به ناحیه تک‌فاز α) و T_e (دمای استحاله فاز α به α_2 در ناحیه دوفازی) طراحی می‌شود که دیاگرام فازی Ti-Al در شکل **۱** نشان داده‌شده است.



شکل (۱): دیاگرام فازی تیتانیوم-آلومینیوم [۲۳].

با استفاده از چرخه‌های توسعه‌یافته، ریزساختارهای دوفازی ریزدانه متنوعی قابل‌دستیابی است. با افزایش تعداد چرخه‌ها، یکنواختی و کروی بودن فازهای ساختار افزایش‌یافته و با تغییرات دما و زمان چرخه‌ها می‌توان به ریزساختارهای دوفازی با کسرهای حجمی مختلفی از

ساختار لایه‌ای دست یافت [۱۸]. از مزایای این فرایند می‌توان به عدم نیاز به عملیات مکانیکی، اعمال بر روی شکل‌های پیچیده ریخته‌گری‌شده و سادگی تجهیزات مورداستفاده و از معایب آن به مصرف بالای انرژی و امکان جوانه‌زنی ترک حین فرایند اشاره نمود [۱۹]. پژوهشگران [۱۰ و ۲۰] با هدف ریزدانه کردن ساختار به‌منظور ارتقای کارپذیری ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Al، انجام عملیات حرارتی سه مرحله‌ای شامل آنیل ناحیه تک‌فاز، چرخه‌های گرمایش و سرمایش سریع و نهایتاً آنیل در ناحیه دوفازی به ساختار لایه‌ای با اندازه کولونی حدود ۱۰۰ میکرومتر دست یافتند. ایم و همکاران [۲۱] عملیاتی چرخه‌ای چهارمرحله‌ای را برای ریزکردن دانه‌بندی ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb شامل عملیات انحلالی، عملیات چرخه‌ای، آنیل، عملیات حرارتی کوتاه‌مدت و پیرسازی پیشنهاد نموده‌اند. اندازه دانه این آلیاژ پس از عملیات انحلالی از ۱۱۰۰ به ۱۹۱ میکرومتر کاهش‌یافته است. بیبهانشو و همکاران [۲۲] با توسعه روش عملیات حرارتی چرخه‌ای، فرایند جدید برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb پیشنهاد کرده‌اند. در این روش انجام چرخه‌های گرمایش و سرمایش مکرر در دمای ۱۵ درجه بیشتر و کمتر از دمای یوتکتیک، سبب کروی شدن ذرات فاز α_2 در ساختار می‌گردد.

هدف از پژوهش حاضر دستیابی به ساختار شبه لایه‌ای ریزدانه (کمتر از ۲۰۰ میکرومتر) از طریق عملیات حرارتی سه‌مرحله‌ای و بررسی پارامترهای مؤثر بر این فرایند بر اساس الگوی اولیه از نتایج پژوهش‌های اشکلی‌نیارز [۲۰] و کوشیلنا و همکاران [۱۰] است. در این پژوهش بر پارامترهایی از فرایند عملیات حرارتی چرخه‌ای مانند محیط سرمایش مراحل مختلف، تعداد چرخه‌ها و دمای آنیل مرحله سوم تمرکز شده که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است.

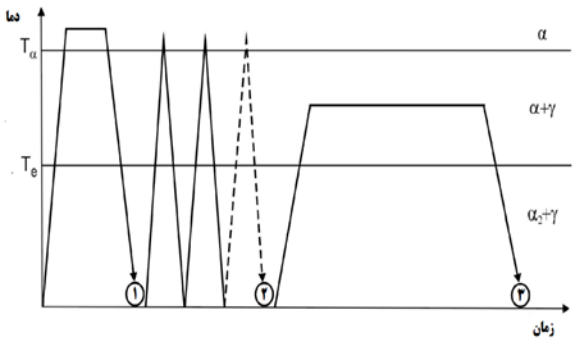
۲- روش انجام پژوهش

ذوب اولیه و ریخته‌گری شمش ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb مورداستفاده در این پژوهش با فرآیند ذوب قوسی دومرحله‌ای تحت خلأ انجام‌شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ مورداستفاده بر اساس نتایج آنالیز EDS در جدول **۱** نمایش داده‌شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ موردبررسی برحسب درصد اتمی.

Nb	Cr	Al	Ti
۲	۱/۹	۴۷/۸	باقیمانده

شمش تولیدشده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در محیط خلأ همگن‌سازی شد. عملیات حرارتی سه مرحله‌ای برای دستیابی به ساختار لایه‌ای ریزدانه طراحی شد که شماتیک آن در شکل **۲** نشان داده‌شده است.



شکل (۲): شماتیک عملیات حرارتی انجام‌شده در این پژوهش.

مرحله اول شامل آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سپس سرمایش در محیط‌های هوا و کوره تا دمای اتاق می‌باشد. در مرحله دوم، عملیات حرارتی چرخه‌ای شامل گرمایش مکرر تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری در همان دما به مدت ۵ دقیقه و سپس سرمایش در محیط‌های هوا و آب به تعداد ۳، ۵ و ۱۰ چرخه متناوب انجام شد. مرحله سوم شامل آنیل در ناحیه دوفازی در دماهای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت می‌باشد. نمونه‌های عملیات حرارتی‌شده توسط محلولی شامل یک درصد حجمی HF، دو درصد HNO_3 و شش درصد آب [۲۴] حکاکی شدند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX 51 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-XMU انجام گرفت. همچنین محاسبه اندازه دانه بر اساس استاندارد ASTM E112 [۲۵] انجام شد.

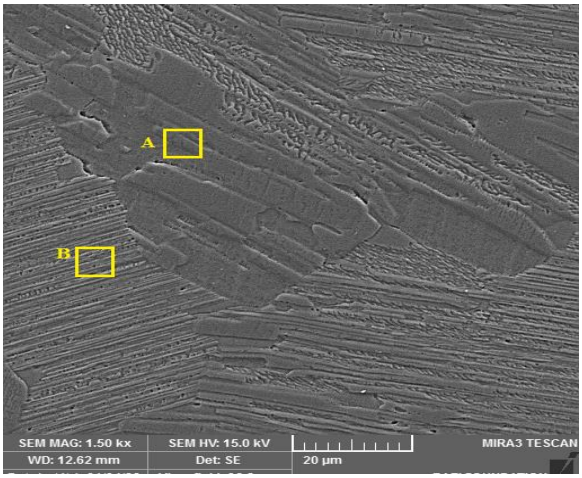
۳- نتیجه‌گیری و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار اولیه آلیاژ

شکل **۳** ریزساختار اولیه نمونه استفاده شده در این پژوهش پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. همگن سازی معمولا با هدف حذف اثرات ریزجدایش‌های دندریتی در ساختار آلیاژهای ریختگی در محدوده دمایی دوفازی یا تک‌فاز α انجام می‌شود [۲۰]. نتایج آنالیز EDS برای شناسایی فازهای ایجاد شده در نقاط مشخص بر حسب مقدار درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده در جدول **۲** نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج آنالیز EDS نقاط مشخص شده در تصویر میکروسکوپ الکترونی پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت.

نام عنصر	نقطه A (درصد اتمی)	نقطه B (درصد اتمی)
آلومینیوم	۴۶/۳	۲۶/۹
تیتانیوم	۴۸/۴	۶۴/۳
کروم	۱/۲	۴/۸
نیوبیوم	۴/۳	۳/۹

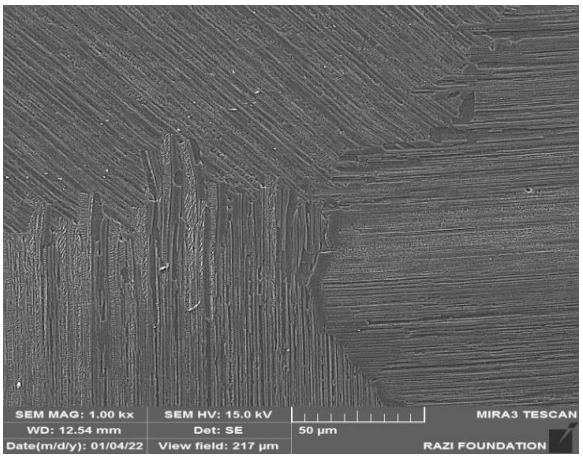


شکل (۳): شماتیک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت.

با توجه به مقدار درصد اتمی عناصر در ساختار می‌توان نتیجه گرفت ساختار حاصل از نوع دوگانه شامل دانه‌های γ به همراه کولونی‌های لایه‌ای فاز γ و α_2 می‌باشد. ناحیه لایه‌ای شامل چیدمان نسبتا منظمی از دو فاز γ و α_2 است که به شکل خطوط موازی در کنار یکدیگر کشیده شده‌اند. میانگین اندازه دانه برابر ۱۱۶۰ میکرومتر است.

۳-۲- تاثیر محیط سرمایش آنیل تک‌فاز بر ریزساختار

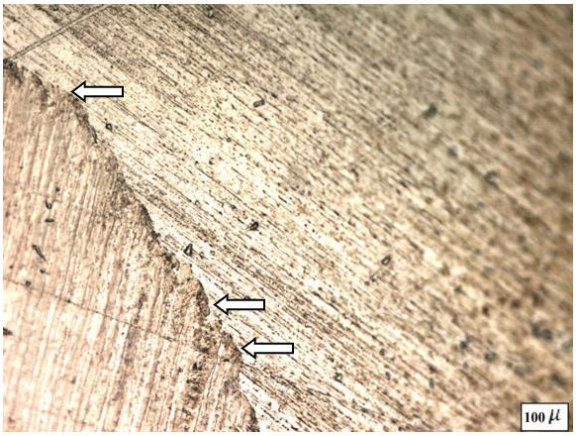
محیط‌های سرمایش مختلف پس از آنیل تک‌فاز سبب ایجاد ساختارهای مختلفی (پس از پایان مرحله اول) می‌گردند. شکل **۴** ریزساختار ترکیب فوق را پس از آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در کوره (نرخ سرمایش ۰/۲ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه) و شکل **۵** ریزساختار ترکیب را پس از آنیل در شرایط مشابه و سرمایش در هوا (نرخ سرمایش حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه) نشان می‌دهد.



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در محیط کوره.

ساختار حاصل پس از سرمایش در کوره شامل کولونی‌های لایه‌ای تشکیل‌شده از فازهای γ و α_2 با اندازه کولونی ۱۲۲۰ میکرومتر می‌باشد. ساختار لایه‌ای با رسوب صفحات دارای جهت کریستالوگرافی فاز γ از فاز α ایجاد می‌شود [۲۶]. اما پس از آنیل این ترکیب در شرایط مشابه و سرمایش در محیط هوا، فاز α تا دمای محیط در ساختار باقی می‌ماند [۲۷]. اگرچه به نظر می‌رسد مقادیر بسیار اندکی از ساختار لایه‌ای در مرز دانه‌های α وجود دارد که در شکل ۵ با

فلش‌های سفید رنگ متمایز شده‌اند، اما مقدار آن‌ها ناچیز است. شارپنتیر [۱۱] معتقد است کسر تعادلی فاز α_2 فقط در نرخ‌های سرمایش کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حاصل می‌شود. در این شرایط وقوع فرایندهای تکمیلی مانند بازپخت برای ایجاد ساختار لایه‌ای ضرورت می‌یابد [۲۱]. این اختلاف ایجاد شده در ساختار پس از همگن سازی، نقش اساسی در تحولات ساختاری بعدی هنگام عملیات حرارتی سیکلی ایفا می‌کند. با توجه به نتایج حاصل، کوره به عنوان محیط بهینه برای سرمایش آنیل تک‌فاز انتخاب شد.

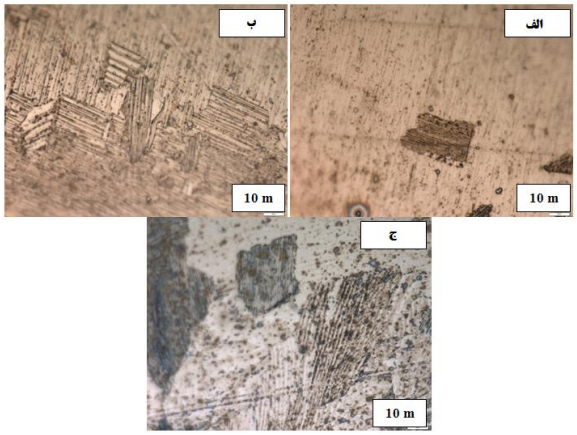


شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری از ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در هوا.

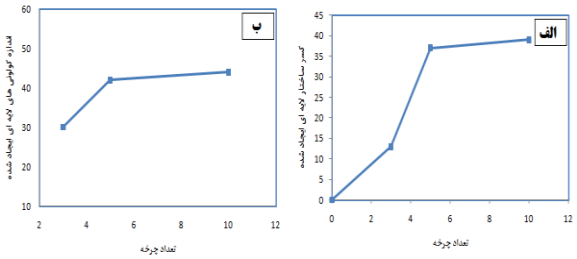
۳-۳- تاثیر تعداد چرخه‌ها بر ریزساختار

تاثیر تعداد چرخه‌های مرحله دوم بر ریزساختار ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb (پس از سرمایش مرحله اول و دوم در محیط هوا و آنیل مرحله سوم در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل **۶** نشان داده شده است. با افزایش تعداد چرخه‌ها از صفر تا ۳ و ۵ چرخه، کسر ساختار لایه‌ای به ترتیب به ۱۳ و ۳۷ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۷-الف). اما با افزایش تعداد تکرار مراحل به ۱۰ چرخه، تغییر چندانی در کسر حجمی ساختار لایه‌ای ایجاد نشده و این مقدار تقریبا ثابت (۳۹ درصد) باقی می‌ماند. به نظر می‌رسد پتانسیل حداکثری جوانه زنی ساختار لایه‌ای پس از ۵ چرخه بروز می‌نماید. روند مشابهی در اندازه کولونی‌های تشکیل‌شده با تعداد چرخه‌ها نیز مشاهده می‌شود (شکل **۷**).

با اعمال ۳، ۵ و ۱۰ چرخه، اندازه کولونی‌های لایه‌ای ایجاد شده به ترتیب از ۳۰ به ۴۲ و ۴۴ میکرومتر افزایش یافته است. هر چند مقدار این اختلاف چندان زیاد نیست، اما می‌توان آن را به کم بودن جوانه‌های تشکیل‌شده و کاهش میانگین اندازه این جوانه‌ها پس از سه چرخه نسبت داد، در حالیکه در تعداد چرخه‌های بیشتر با مواجهه بیشتر ساختار با دمای بالا، امکان رشد برای این کولونی‌های کوچک فراهم شده است [۱۰]. هرچند با افزایش بیشتر چرخه‌ها (بیشتر از پنج)، میانگین اندازه تقریبا ثابت باقی مانده است، اما توزیع اندازه دانه در ساختار نرمال‌تر شده و امکان مشاهده دانه‌های بزرگتر از اندازه میانگین کاهش می‌یابد. بنابراین تعداد ۵ چرخه برای مرحله دوم به عنوان شرایط بهینه پیشنهاد می‌گردد.



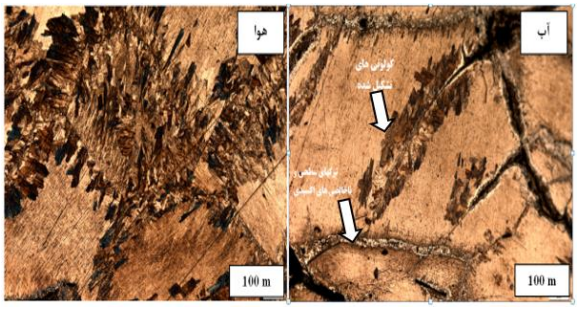
شکل (۶): ریزساختار ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از سرمایش مرحله اول در محیط هوا و عملیات حرارتی چرخه‌ای به تعداد: الف) سه؛ ب) پنج؛ ج) ده چرخه؛ به همراه آنیل مرحله سوم در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت.



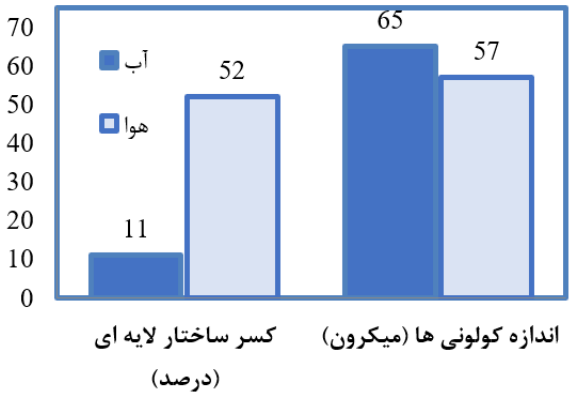
شکل (۷): الف) تاثیر تعداد چرخه مرحله دوم بر کسر ریزساختار لایه‌ای؛ ب) اندازه کولونی‌های لایه‌ای.

۳-۴- تاثیر محیط سرمایش چرخه‌ها بر ریزساختار

ریزساختار نمونه‌های آنیل تک‌فاز شده با سرمایش در هوا پس از عملیات چرخه‌ای به تعداد پنج چرخه و سرمایش در محیط‌های آب و هوا در شکل **۸** و تاثیر آن بر کسر ساختار لایه‌ای و اندازه کولونی‌ها در شکل **۹** نشان داده شده‌اند.



شکل (۸): ریزساختار نمونه‌های آنیل تک‌فاز با سرمایش در هوا پس از عملیات حرارتی چرخه‌ای به تعداد پنج چرخه و سرمایش در محیط‌های: الف) آب؛ ب) هوا.

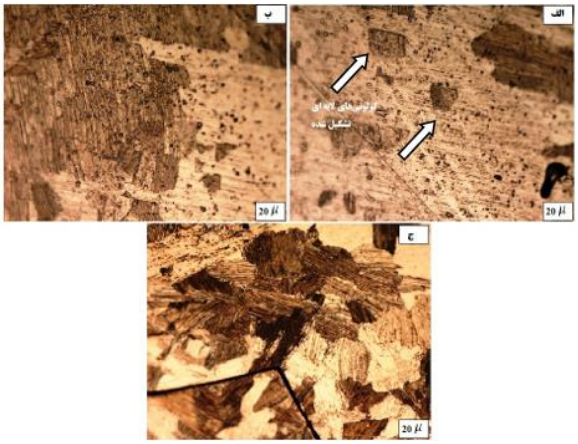


شکل (۹): تاثیر محیط سرمایش چرخه‌ها بر کسر ساختار لایه‌ای و اندازه کولونی‌های لایه‌ای با آنیل تکفاز و سرمایش در محیط هوا.

پس از سرمایش در آب، کولونی‌های لایه‌ای یازده درصد ساختار را شامل می‌شوند، اما با استفاده از محیط هوا (نرخ سرمایش کمتر)، زمان بیشتری برای جوانه زنی وجود داشته و ساختار لایه ای ۵۲ درصد ساختار را در بر می‌گیرد. پژوهشگران [۱۰] معتقدند در نرخ‌های سرمایش بالا مانند هوا (نسبت به آب) نیز دانه‌های جدید ایجاد می‌شود، اما فرصت کافی برای درشت‌شدن آن‌ها وجود ندارد و ممکن است مانند حلقه‌ای به دور مرزهای اولیه قرار بگیرند، به همین دلیل در مجموع باعث کاهش چندانی در میانگین اندازه دانه نمی‌گردند. اندازه دانه تشکیل‌شده در محیط آب اندکی از محیط هوا بیشتر است. هرچند این اختلاف اندک است، اما می‌توان آن را افزایش جوانه زنی ساختار لایه‌ای و در نتیجه برخورد کولونی‌های تشکیل‌شده در محیط هوا با یکدیگر و ممانعت آن‌ها از رشد یکدیگر نسبت داد [۲۸]. لذا سرمایش در هوا پس از انجام چرخه‌های متناوب مرحله دوم به عنوان شرایط بهینه پیشنهاد می‌گردد.

۳-۵- تاثیر دمای آنیل مرحله سوم بر ریزساختار

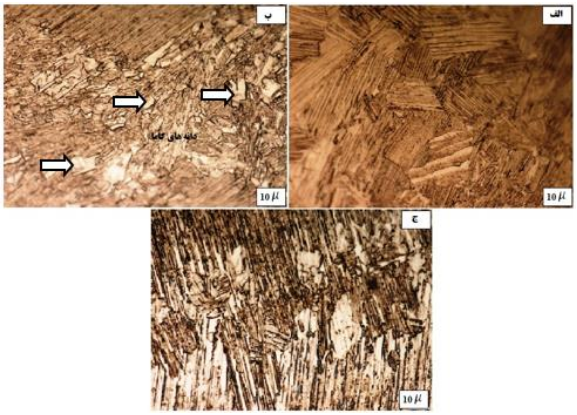
ریزساختار نمونه‌های آنیل شده در دماهای ۱۱۷۵، ۱۲۲۵ و ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد پس از سرد شدن مرحله اول در هوا (آنیل تک‌فاز) و اعمال پنج چرخه در مرحله دوم در شکل **۱۰** و پس از سرد شدن مرحله اول در محیط کوره (با سایر پارامترهای مشابه) در شکل **۱۱** نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۰): ریزساختار نمونه‌های ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از سرمایش مرحله اول در هوا، تعداد پنج چرخه در مرحله دوم و آنیل مرحله سوم به مدت یک ساعت در دمای الف)۱۱۷۵، ب) ۱۲۲۵ و ج) ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد.

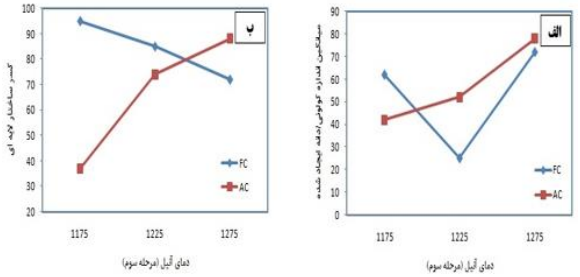
در نمونه‌هایی که سرمایش پس از آنیل تک‌فاز مرحله اول آن‌ها در محیط هوا انجام شده است، کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای و میانگین اندازه کولونی‌ها با افزایش دمای آنیل مرحله سوم رابطه مستقیم دارد (شکل **۱۲ الف** و **ب**)، به طوریکه با افزایش دمای آنیل مرحله سوم از ۱۱۷۵ به ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای از ۳۷ به ۸۸ درصد و میانگین اندازه این کولونی‌ها از ۴۲ به

۷۸ میکرون افزایش می‌یابد. حین عملیات حرارتی چرخه‌ای، کولونی‌های لایه‌ای کوچک ایجاد شده که در شکل **۱۰ الف** با فلش‌های سفید رنگ نشان داده شده‌اند. این کولونی‌ها حین آنیل نهایی (مرحله سوم) با مصرف فاز α زمینه رشد کرده و فضای بیشتری از ساختار را در بر می‌گیرند. در پژوهش‌های مشابه[۲۰] نیز گزارش شده است که افزایش دمای آنیل سبب تسهیل رشد این کولونی‌ها می‌گردد.



شکل (۱۱): ریزساختار نمونه‌های ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از سرمایش مرحله اول در کوره، تعداد پنج چرخه در مرحله دوم و آنیل مرحله سوم به مدت یک ساعت در دمای الف)۱۱۷۵، ب) ۱۲۲۵ و ج) ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد.

نمونه‌هایی که سرمایش پس از آنیل تک‌فاز مرحله اول آن‌ها در محیط کوره انجام شده است، رفتار متفاوتی دارند. با توجه به این که به دلیل سرعت تعادلی سرمایش پس از آنیل تک‌فاز، بخش عمده زمینه از ساختار لایه‌ای تشکیل شده است، انجام آنیل در دمای پایین سبب تکمیل ساختار لایه‌ای و افزایش اندازه کولونی‌ها می‌گردد. پس از آنیل در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد، کسر ساختار لایه‌ای برابر ۹۵ درصد و اندازه کولونی‌های لایه‌ای برابر ۶۲ میکرون است. با افزایش بیشتر دمای آنیل تا ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، دانه‌های γ به تدریج در مرز لایه‌ها شروع به جوانه‌زنی کرده و سبب کاهش میانگین اندازه دانه/کولونی می‌گردد. این دانه‌ها در شکل **۱۱ ب** با فلش‌های سفید رنگ متمایز شده‌اند. شارپنتیر [۱۱] معتقد است حین آنیل در دماهای بیشتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، امکان تشکیل ساختار لایه‌ای وجود نخواهد داشت. این پدیده سبب تشکیل ساختار شبه‌لایه‌ای ریزدانه با کسر ساختار لایه‌ای ۸۵ درصد و میانگین اندازه دانه ۲۵ میکرون می‌شود، در حالیکه دانه‌های γ با اندازه ۱۰ میکرون نیز در ساختار وجود دارد. افزایش بیشتر دمای آنیل سبب رشد این دانه‌ها و کاهش کسر ساختار لایه‌ای در زمینه می‌شود. طبق نظر فرانزان و همکاران [۲۹]، انجام آنیل در نیمه بالایی ناحیه دوفازی سبب تجزیه فاز α_2 و تشکیل فاز γ یا در دماهای بالاتر، فاز α خواهد شد. پس از آنیل در دمای ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، کسر ساختار لایه‌ای به ۷۵ درصد کاهش و اندازه کولونی به ۷۲ میکرومتر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده، در نهایت انجام عملیات آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در کوره به همراه عملیات حرارتی چرخه‌ای به تعداد پنج چرخه در همان دما با سرمایش در هوا و نهایتاً آنیل در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت به عنوان فرایند بهینه برای ایجاد ساختار شبه‌لایه‌ای با کمترین اندازه کولونی، پیشنهاد می‌شود.



شکل (۱۲): الف) تغییرات میانگین اندازه کولونی/ دانه ایجاد شده؛ ب) تغییرات کسر ساختار لایه‌ای با دمای آنیل مرحله سوم.

۴- نتیجه گیری

۱) پس از همگن سازی اولیه در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و سرمایش در محیط کوره، ساختار لایه ای با اندازه کولونی ۱۲۰۰ میکرون تشکیل می‌شود، در حالیکه پس از سرمایش با نرخ بالاتر در محیط هوا، فاز α تا دمای محیط باقی می‌ماند.

۲) با انجام عملیات حرارتی چرخه‌ای پس از آنیل تک‌فاز مرحله اول، کولونی‌های لایه‌ای کوچکی تشکیل شده که با رشد و یکنواخت شدن این

کولونی‌ها در عملیات آنیل دوفازی مرحله سوم، میانگین اندازه نهایی کولونی‌های لایه‌ای کاهش می‌یابد.

۳) با افزایش تعداد چرخه‌ها از سه تا پنج چرخه، اندازه کولونی‌ها به دلیل افزایش جوانه‌های تشکیل‌شده از ۳۰ به ۴۲ میکرون افزایش می‌یابد، در حالیکه پس از پنج چرخه به علت محدود شدن رشد کولونی‌ها ناشی از برخورد آنها به یکدیگر، اندازه کولونی‌ها تقریبا ثابت (۴۴ میکرومتر) باقی می‌ماند.

۴) محیط سرمایش چرخه‌ها نیز بر ریزساختار تاثیرگذار است. پس از آنیل تک‌فاز (سرمایش در هوا)، اگر سرمایش چرخه‌ها در آب انجام شود، لایه‌ها یازده درصد ساختار را در شامل می‌شوند، اما با استفاده از محیط هوا (نرخ سرمایش کمتر) پس از چرخه‌ها، زمان بیشتری برای جوانه زنی وجود داشته و ساختار لایه ای ۵۲ درصد ساختار را در بر می‌گیرد.

۵) در صورتیکه نمونه‌ها پس از آنیل تک‌فاز در هوا سرد شوند، افزایش دمای آنیل نهایی باعث افزایش کسر ساختار لایه‌ای و اندازه کولونی‌ها می‌گردد. به طوریکه با افزایش دمای آنیل از ۱۱۷۵ تا ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، کسر حجمی کولونی‌های لایه‌ای از ۳۷ به ۸۸ درصد و میانگین اندازه این کولونی‌ها از ۴۲ به ۷۸ میکرومتر افزایش می‌یابد.

۶) در صورتیکه نمونه‌ها پس از آنیل تک‌فاز در کوره سرد شوند، انجام آنیل در دمای پایین سبب تکمیل ساختار لایه‌ای و افزایش اندازه کولونی‌ها می‌گردد. پس از آنیل در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد، کسر ساختار لایه‌ای برابر ۹۵ درصد و اندازه کولونی‌های لایه‌ای برابر ۶۲ میکرومتر است. با افزایش بیشتر دمای آنیل تا ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، دانه‌های γ به تدریج در مرز لایه‌ها شروع به جوانه‌زنی کرده و سبب ایجاد ساختار شبه لایه‌ای می‌گردد.

۷) با عملیات حرارتی سه مرحله‌ای شامل مرحله اول (آنیل تک‌فاز در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت با سرمایش در محیط کوره)، مرحله دوم (عملیات حرارتی چرخه‌ای شامل گرمایش مکرر تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به تعداد پنج چرخه و سرمایش در محیط هوا) و مرحله سوم (آنیل دوفازی در دمای ۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت) می‌توان به ساختار شبه‌لایه‌ای با کسر ساختار لایه‌ای به ۸۵ درصد و میانگین اندازه دانه/کولونی به ۲۵ میکرون دست یافت.

۶- مراجع

[1] Appel F, Brossmann U, Christoph U, Eggert S, Janschek P, Lorenz U, Müllauer J, Oehring M, Paul JD. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys. Advanced Engineering Materials. 2000;2(11):699-720. **DOI:** http://dx.doi.org/10.1002/1527-2648(200011)2:11<699::AID-ADEM699>3.0.CO;2-J.

[2] Bewlay BP, Nag S, Suzuki A, Weimer MJ. TiAl alloys in commercial aircraft engines. Materials at High Temperatures. 2016;33:549-59 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068.

[3] Clemens H, Mayer S. Advanced Intermetallic TiAl Alloys. Materials Science Forum. 2017;879:113-8 **DOI:** http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.113.

[4] Clemens H, Mayer S. Design, Processing, Microstructure, Properties, and Applications of Advanced Intermetallic TiAl Alloys. Advance Engineering Materials. 2013;15(4):191-215 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1002/adem.201200231.

[5] Ramanujan RV. Phase transformations in γ based titanium aluminides. International Materials Reviews. 2000;45(6):217-40 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1179/095066000101528377.

[6] Tan Y, Wang Y, You X, Liu H, Li P. Effect of Solution Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of theTi-48Al-2Cr-2Nb Alloy Prepared by Electron Beam Smelting. Journal of Materials Engineering and Performance.

2021;31:1387–96 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1007/s11665-021-06231-z.

[7] Ahmadi M, Hosseini SR, Hadavi SMM. Effects of Heat Treatment on Microstructural Modification of As-Cast Gamma-TiAl Alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2016;25(6):2138-46 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1007/s11665-016-2067-7.

[8] Kothari K, Radhakrishnan R, Wereley NM. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. Progress in Aerospace Sciences. 2012;55:1-16 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.04.001.

[9] Jian-Chao H, Shu-Long X, Tian Jing C, Xu Y-Y, Wang L-J, Jia X-P, et al. Microstructure characterization and tensile properties of a Ni-containing TiAl-based alloy with heat treatment. Rare Metals. 2016;35:26-34 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1007/s12598-015-0626-y.

[10] Kościelna A, Szkliniarz W. Effect of cyclic heat treatment parameters on the grain refinement of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy. Materials Characterization. 2009;60(10):1158-62 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2009.03.008.

[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;491:321-30 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2008.02.009.

[12] Gao Z, Yang J, Wu Y, Hu R, Kim S-L, Kim Y-W. A Newly Generated Nearly Lamellar Microstructure in Cast Ti-48Al-2Nb-2Cr Alloy for High-Temperature Strengthening. Metallurgical and Materials Transactions A. 2019;50:5839–52 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1007/s11661-019-05491-8.

[13] Rezaei H, Morakabati M, Momeni A. Evaluation of the Effect of Heat Treatment on Structural Changes and Mechanical Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic. Founding Research Journal. 2022;6(2):125-32 **DOI:** http://dx.doi.org/10.22034/FRJ.2023.384529.1173.

[14] Shih D, Scarr G. High-Temperature Deformation Behavior of the γ Alloy Ti-48Ai-2Cr-2Nb. MRS Online Proceedings Library. 1990;213:727-32.

[15] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys - Fundamentals and applications: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2003 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1002/3527602119.

[16] Semiatin SL, Seetharaman V, Weiss I. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys—an overview. Materials Science and Engineering A. 1998;243:1-24 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00776-4.

[17] Wang JN, Yang J, Xia Q, Wang Y. On the grain size refinement of TiAl alloys by cyclic heat treatment. Materials Science and Engineering A. 2002;329:118-23 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01543-X.

[18] Cupid D. Thermodynamic Assessment of the Ti-al-nb, Ti-al-cr, and Ti-al-mo Systems Gainesville: University of Florida; 2009 **DOI:** http://dx.doi.org/10.3139/146.110015.

[19] Appel F, Oehring M, Wagner R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys. Intermetallics. 2000;8((9-11)):1283-312 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00036-4.

[20] Huang L. Microstructural Control and Alloy Design of the Ti-Al-Nb-W-B Alloys Knoxville university of Tennessee; 2008 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1007/s11661-007-9113-x.

[21] Szkliniarz A. Grain Refinement of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy by Heat Treatment Method. Solid State Phenomena. 2012;191:221-34 **DOI:** http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.191.221.

[22] Yim S, Bian H, Aoyagi K, Chiba A. Effect of multi-stage heat treatment on mechanical properties and microstructure transformation of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy. Materials Science and Engineering: A. 2021;816 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2021.141321.

[23] Bibhanshu N, Suwas S. Globularisation of α2 phase in (α2 + γ) two-phase lamellar titanium aluminide by thermal cycling. Materials Letters. 2021;292:1-4 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129617.

[24] Voort GFV. Handbook metallography and microstructurs USA: ASM International; 2004. **DOI:** http://dx.doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003800.

[25] ASTM E 112: Standard test methods for determining average grain size. 2004.

[26] Cao S, Xiao S, Chen Y, Xu L, Wang X, Han J, Jia Y. Phase transformations of the L12-Ti3Al phase

in γ-TiAl alloy. Materials & Design. 2017;121:61-8. **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.047.

[27] Maruyama K, Yamaguchi M, Suzuki G, Zhu H, Kim HY, Yoo MH. Effects of lamellar boundary structural change on lamellar size hardening in TiAl alloy. Acta Materialia. 2004;52(17):5185-94 **DOI:** http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.029.

[28] Humphreys FJ, Hatherly M. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. second ed: Elsevier; 2004.

[29] Franzén SF, Karlsson J. Titanium Aluminide Manufactured by Electron Beam Melting. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology; 2010 **DOI:** https://hdl.handle.net/20.500.12380/127716.