

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد

موضوع:

**بررسی اثر تعداد دفعات ذوب VAR بر ساختار و خواص**

**آلیاژ تیتانیوم TIMETAL-LCB**

توسط:

محترم اکبرزاده

اساتید راهنما:

دکتر علی حبیب الله زاده

دکتر سید مهدی عباسی

بهمن ماه ۱۳۹۲

پروردگارا، به ذات بی مثال که عقل‌های مقربان در آن حیران است،

به غفرانت که جهانیان را در کار است،

به مقام شفیعان در گاهت،

به محرمان حریم قربتت،

به نغمه عندلیبان گلشن جمالت،

به آنان که به امید وصال در خروشدند،

به دردی که تو اش درمانی و به رنجی که تو اش شفایی

دل‌م را نور عرفان خود ده.

پروردگارا، رحیمی رحم فرما، کریمی کرم بنما، نامهی گناه مجرمان را در دریای عفو تو محو فرما.

« آمین »

## تقدیم به

مادرم، سنگ صبورم، همراه همیشگی‌ام از بدو تولد تا لحظه مرگم.

پدرم، که عشق به زندگی را از او آموختم و آموزگار مکتب حلم و بردباریم بوده است.

همسرم، که سایه مهربانیش سایه‌سار زندگی‌م می‌باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

## سپاسگزاری

بر خود واجب می‌دانم که از کلیه اساتید و معلمان گرانقدری که تاکنون در محضر آنان شاگردی نموده‌ام، به خصوص از زحمات اساتید ارجمند جناب آقایان دکتر علی حبیب‌الله‌زاده و دکتر سید مهدی عباسی، که شکل‌گیری این مجموعه بدون ارشادات و راهنمایی‌های ایشان بسیار دشوار بود و همچنین از مساعدت جناب آقای مهندس آخوندزاده که در تهیه و تدوین این رساله گره‌گشای دشواری‌ها بودند سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایم و از خداوند متعال طول عمر با عزت و سرفرازی آنان را خواهانم. همچنین از برادران بزرگواریم و یگانه خواهرم و خانواده بزرگواریم همسرم، که از آنها درس زندگی آموختم و از همه‌ی کسانی که در این مجموعه مرا یاری کردند، سپاسگزارم.

« لطف حق یارشان باد »

## چکیده

تأثیر تکرار مراحل ذوب مجدد، عملیات همگن‌سازی، دمای حل‌سازی و نرخ سرمایش بر روی ریزساختار و خواص کششی آلیاژ تیتانیوم Timetal-LCB بررسی شد. Timetal-LCB با ترکیب شیمیایی Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al، یک‌بار و سه‌بار در کوره‌ی قوسی ذوب مجدد تحت خلأ (VAR)، ذوب مجدد شد. پس از نورد گرم، نمونه‌ها در دماهای ۷۷۰، ۸۱۰، ۸۵۰ و ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد آنیل حل‌سازی شدند و سپس در آب کوئنچ گردیدند. دسته‌ای دیگر از نمونه‌ها در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، عملیات حل‌سازی شدند و با سه نرخ مختلف سرمایش: در آب، هوا و کوره سرد گردیدند. ساختارها و خواص مکانیکی با میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ اشعه الکترونی، پراش اشعه ایکس و دستگاه آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با تکرار فرآیند ذوب مجدد، درشت‌جدايش کاهش یافته و ترکیب شیمیایی یکنواختی در شمش‌ها حاصل گردید.

آنیل همگن‌سازی شمش یک بار ذوب، خواص مشابهی را نسبت به شمش سه بار ذوب شده بدون آنیل، نشان داد. با انجام عملیات محلولی، خواص کششی شمش‌های یک بار و سه بار ذوب، تقریباً برابر شدند. تجمع فاز  $\alpha$  در مرزخانه‌های شمش یک بار ذوب، منجر به کاهش دانه‌های تبلورمجدد یافته طی فرآیند آنیل انحلالی شده است. همچنین به دلیل انجام عملیات آنیل انحلالی و استحاله فاز  $\alpha$  به  $\beta$  و وقوع تبلورمجدد، استحکام و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها به میزان زیادی افزایش یافت. با افزایش دمای عملیات محلولی، به علت وقوع پدیده تبلورمجدد و رشد دانه‌ها، نرخ افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش استحکام، کاهش یافت. آنیل در دمای بالا منجر به تشکیل فاز بتا مارتنزیتی و درشت شدن رسوبات آلفای باقیمانده شده و در نتیجه استحکام اندکی افزایش و انعطاف‌پذیری کاهش یافت. کاهش نرخ سرمایش از محیط آب به هوا، مورفولوژی رسوبات آلفا را از کروی به گوشه‌دار تغییر داده و استحکام افزایش و انعطاف‌پذیری به میزان زیادی کاهش یافت. اما با کاهش بیشتر نرخ سرمایش (محیط کوره)، به دلیل تشکیل ساختار لایه‌ای  $\alpha$  و  $\beta$ ، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری افزایش و تنش تسلیم کاهش یافته است.

**لغات کلیدی:** آلیاژ Timetal-LCB، تکرار مراحل ذوب در کوره VAR، آنیل همگن‌سازی، دمای عملیات محلولی، نرخ سرمایش، فازها، خواص کششی.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: مقدمه
۲.....	مقدمه
۴.....	فصل دوم: مروری بر منابع
۵.....	۱-۲- معرفی آلیاژ Timetal-LCB
۵.....	۱-۱-۲- متالورژی فیزیکی آلیاژ LCB
۹.....	۲-۱-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ LCB
۱۰.....	۳-۱-۲- کاربردهای آلیاژ LCB
۱۱.....	۲-۲- ذوب و تصفیه آلیاژ LCB
۱۱.....	۱-۲-۲- ذوب قوسی تحت خلأ (VAR)
۱۲.....	۲-۲-۲- متالورژی فرآیند VAR
۱۴.....	۳-۲-۲- انواع عیوب موجود در فرآیند VAR
۱۸.....	۴-۲-۲- پارامترهای مهم در کنترل فرآیند VAR
۲۲.....	۵-۲-۲- مزایای VAR
۲۳.....	۶-۲-۲- عیوب موجود در شمش‌های تیتانیوم
۲۹.....	۷-۲-۲- مشکل موجود در فرآیند VAR چند مرحله‌ای
۲۹.....	۸-۲-۲- اثر تعداد دفعات ذوب روی ساختار و خواص آلیاژهای تیتانیوم
۳۰.....	۹-۲-۲- اثر برخی از ناخالصی‌ها بر خصوصیات تیتانیوم
۳۴.....	۳-۲- عملیات حرارتی و ترمومکانیکی آلیاژ LCB
۳۵.....	۱-۳-۲- کارگرم
۳۶.....	۲-۳-۲- عملیات محلولی
۳۸.....	۳-۳-۲- تبلور مجدد
۴۰.....	۳-۳-۲- پیرسازی

فصل سوم: مواد و روش تحقیق .....	۴۶
۱-۳- مواد اولیه و فلوجارت انجام تحقیق .....	۴۷
۲-۳- ذوب .....	۴۹
۳-۳- نمونه سازی .....	۴۹
۴-۳- همگن سازی .....	۵۱
۵-۳- نورد گرم اولیه و ثانویه .....	۵۱
۶-۳- آنیل حل سازی .....	۵۱
۷-۳- بررسی های درشت ساختاری و ریزساختاری .....	۵۲
۸-۳- بررسی خواص کششی .....	۵۳
۹-۳- بررسی و شناسایی فازها .....	۵۳
<b>فصل چهارم: نتایج و بحث .....</b>	<b>۵۴</b>
۱-۴- بررسی تغییرات درشت ساختار شمش طی تکرار مراحل ذوب و انجام آنیل همگن سازی ..	۵۵
۲-۴- مطالعه تأثیر تکرار مراحل ذوب و انجام آنیل انحلالی بر خواص کششی و ریزساختار .....	۶۰
۳-۴- بررسی تأثیر دمای آنیل انحلالی بر خواص مکانیکی و ریزساختار .....	۶۳
۴-۴- بررسی تأثیر محیط سرمایش پس از آنیل بر خواص مکانیکی و ریزساختار .....	۷۱
<b>فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها .....</b>	<b>۷۸</b>
۱-۵- نتیجه گیری .....	۷۹
۲-۵- پیشنهادها .....	۸۰
<b>مراجع .....</b>	<b>۸۱</b>



## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- دیاگرام دوتایی از آلیاژهای تیتانیوم چندعنصری .....	۶
شکل ۲-۲- تغییرات وضعیت مرزهای بین فازی در سیستم Ti-Cr به صورت تابعی از دما و زمان گرمایش .....	۶
شکل ۳-۲- تصویر SEM از آلیاژ Ti-10V-4.5Fe-1.5Al پس از پیرسازی .....	۷
شکل ۴-۲- دیاگرام فازی شبه دوتایی Ti-1.5Al با عناصر پایدارکننده بتا Mo <sub>eq</sub> .....	۸
شکل ۵-۲- فنر ساخته شده از؛ سمت چپ: فولاد، سمت راست: تیتانیوم .....	۱۰
شکل ۶-۲- طرحی نمادین از کوره‌ی VAR .....	۱۲
شکل ۷-۲- ساختار اولیه‌ی شمش VAR به صورت تابعی از شیب دمایی G، سرعت انجماد R، ترکیب شیمیایی مذاب C <sub>0</sub> .....	۱۳
شکل ۸-۲- منطقه‌ی غنی از آهن، عیب beta fleck، در Ti-10V-2Fe-3Al .....	۱۵
شکل ۹-۲- تأثیر عرض شکاف روی ضریب انتقال حرارت برای دو فرآیند VAR و ESR، در فشارهای مختلف گاز .....	۱۸
شکل ۱۰-۲- نوعی عیب LDI در شمش Ti-64 .....	۲۴
شکل ۱۱-۲- شماتیکی از جریان‌های همرفت VAR که با حرکت دادن عیوب به سمت جبهه‌ی انجماد، تجزیه‌ی TiN را به تعویق می‌اندازد .....	۲۵
شکل ۱۲-۲- آخال مولیبدنی با چگالی بالا که در Ti-6Al-4V پدیدار شده است .....	۲۶
شکل ۱۳-۲- وجود عیب رگه‌رگه‌های بتا در آلیاژهای تیتانیوم .....	۲۷
شکل ۱۴-۲- توالی فرآیند VAR سه مرحله‌ای با الکتروود مصرفی معکوس و مستقیم .....	۲۹
شکل ۱۵-۲- رابطه‌ی استحکام-داکتیلیته در تیتانیوم خالص دارای عناصر بین‌نشین مختلف .....	۳۱
شکل ۱۶-۲- تأثیر ناخالصی اکسیژن بر خصوصیات مکانیکی تیتانیوم خالص .....	۳۲
شکل ۱۷-۲- تأثیر مقدار اکسیژن بر دمای T <sub>β</sub> در تیتانیوم خالص و SP-700 .....	۳۳
شکل ۱۸-۲- تأثیر ناخالصی نیتروژن بر خصوصیات مکانیکی تیتانیوم .....	۳۳
شکل ۱۹-۲- تأثیر ناخالصی کربن بر خصوصیات مکانیکی تیتانیوم .....	۳۴

شکل ۲-۲۰- دیاگرام محدوده‌های عملیات‌های حرارتی در حل‌سازی و پیرسازی در آلیاژهای تیتانیوم  $\beta$  شبه پایدار  
۳۵ .....

شکل ۲-۲۱- ریزساختار معمول آلیاژ  $Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo$ ؛ الف) عملیات حل‌سازی در  $871^{\circ}C$  و به مدت ۲ ساعت و سرد کردن در هوا بعلاوه پیرسازی در دمای  $566^{\circ}C$  به مدت ۶ ساعت و سرد کردن در هوا (رسوبات ریز  $\alpha$  در زمینه  $\beta$ )، ب) عملیات حل‌سازی در  $871^{\circ}C$  و به مدت ۲ ساعت و سرد کردن در هوا بعلاوه پیرسازی در دمای  $677^{\circ}C$  به مدت ۶ ساعت و سرد کردن در هوا (رسوبات درشت  $\alpha$  در زمینه  $\beta$ )، ج) عملیات حل‌سازی  $\beta$  در دمای  $871^{\circ}C$  به مدت ۲ ساعت و سرد کردن در هوا (ذرات فاز ثانویه در زمینه  $\beta$ ) ..... ۳۷

شکل ۲-۲۲- آلیاژ Timetal-LCB، حرارت‌دهی شده با سرعت  $1\text{ Ks}^{-1}$  پس از عملیات محلولی (O) یا پس از عملیات محلولی و کشش سرد تا کرنش  $70\%$  ( $\Delta$ ) ..... ۴۰

شکل ۲-۲۳- آلیاژ Timetal-LCB، عملیات محلولی و عملیات حرارت‌دهی شده به صورت پیوسته در سرعت‌های مختلف ..... ۴۱

شکل ۲-۲۴- ریزساختار TEM در توسعه‌ی ساختاری TIMETAL-LCB از طریق تبلور مجدد و پیرسازی به مدت ۸ ساعت در: الف-د)  $520^{\circ}C$  درجه سانتیگراد، ز)  $538^{\circ}C$  درجه سانتیگراد، ر)  $560^{\circ}C$  درجه سانتیگراد. سرعت گرمایش تا حداکثر دمای پیرسازی: الف، ب، ر، ز)  $0.25$  کلوین در ثانیه، ج، د)  $20$  کلوین در ثانیه ..... ۴۳

شکل ۲-۲۵- تصویر EBSD از ریزساختار نمونه‌ی Timetal-LCB پیرسازی شده در دمای  $760^{\circ}C$  درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه پس از عملیات محلولی در  $810^{\circ}C$  درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه ..... ۴۳

شکل ۲-۲۶- تغییرات ریزسختی ویکرز با زمان پیرسازی، آلیاژ LCB ..... ۴۵

شکل ۲-۲۷- تأثیر دما و زمان پیرسازی بر سختی آلیاژ LCB پیرسازی شده در شرایط همدم، نقطه‌چین مربوط به سختی شرایط محلولی می‌باشد ..... ۴۵

شکل ۳-۱- فلوجارت مراحل فرآوری آلیاژ تیتانیوم Timatal-LCB و تحقیقات انجام شده ..... ۴۸

شکل ۳-۲- مراحل نمونه‌گیری در هر مرحله از ذوب و آماده‌سازی الکتروود جهت ذوب مرحله‌ی بعد ..... ۵۰

شکل ۳-۳- شماتیک نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M ..... ۵۳

شکل ۴-۱- نمونه‌ای از تخلخل ناشی از افتادن تکه‌ای از مواد اولیه به داخل حوضچه‌ی مذاب در طول فرآیند ذوب اولیه ..... ۵۵

شکل ۴-۲- سطح درشت‌ساختار شمش حاصل از ذوب مرحله‌ی اول؛ الف) سطح مقطع بالایی (I)، ب) سطح مقطع پایینی (II)، ج) طرح نمادین از شکل‌گیری حوضچه مذاب در شمش حاصل از فرآیند VAR ..... ۵۷

شکل ۴-۳- تصاویر درشت‌ساختار شمش Timatal-LCB از مقطع برشکاری I برای ذوب اول و سوم و در شرایط آنیل همگن‌سازی نشده و شده ..... ۵۸

- شکل ۴-۴- تصاویر درشت ساختار شمش‌های حاصل از تکرار فرآیند ذوب؛ الف: ذوب سوم، ب: ذوب اول ..... ۵۸
- شکل ۴-۵- تصویر درشت ساختار شمش سه بار ذوب ..... ۵۹
- شکل ۴-۶- خواص کششی نمونه‌های یک مرحله و سه مرحله ذوب در دو شرایط آنیل شده و نشده ..... ۶۲
- شکل ۴-۷- تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌های یک بار ذوب و سه بار ذوب در دو شرایط آنیل شده و نشده ..... ۶۴
- شکل ۴-۸- نتایج آزمون XRD آلیاژ Ti-metal LCB، الف) شرایط آنیل نشده، ب) شرایط آنیل شده ..... ۶۵
- شکل ۴-۹- بررسی تأثیر دمای آنیل انحلالی (به مدت ۰/۵ ساعت و کوئنچ در آب) بر خواص کششی آلیاژ LCB ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۰- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آلیاژ LCB، الف) و ب) آنیل نشده، ج-ی) آنیل شده در دماهای ۷۷۰، ۸۱۰، ۸۵۰ و ۸۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و کوئنچ در آب ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های آلیاژ LCB آنیل شده در دماهای؛ الف) ۷۷۰ درجه سانتیگراد، ب) ۸۱۰ درجه سانتیگراد، ج) ۸۵۰ درجه سانتیگراد و د) ۸۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و کوئنچ در آب ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲- نتایج آنالیز پراش اشعه X (XRD) آلیاژ Timetal LCB در شرایط آنیل نشده و آنیل شده در دماهای ۷۷۰، ۸۱۰، ۸۵۰ و ۸۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و کوئنچ در آب ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۳- نتایج آزمون کشش آلیاژ تیتانیوم LCB در شرایط آنیل انحلالی شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و سپس سرمایش در محیط‌های مختلف آب، هوا و کوره ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۴- تصاویر میکروسکوپ نوری آلیاژ LCB آنیل انحلالی شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و سرمایش در محیط‌های آب، هوا و کوره ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) آلیاژ LCB آنیل انحلالی شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و سرمایش در محیط‌های الف) آب، ب) هوا و ج) کوره ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۶- نتایج آنالیز پراش اشعه X (XRD) آلیاژ LCB آنیل انحلالی شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۰/۵ ساعت و سرمایش در محیط‌های آب، هوا و کوره ..... ۷۷

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۹	جدول ۱-۲- خصوصیات مکانیکی LCB Timetal در مقایسه با Ti-6Al-4V عملیات محلولی و پیرسازی شده ..... ۹
۱۰	جدول ۲-۲- خواص فیزیکی آلیاژ LCB ..... ۱۰
۴۲	جدول ۳-۲- خصوصیات TIMETAL-LCB در شرایط تبلور مجدد یافته، اندازه‌ی دانه‌ی بتا ۱۰ میکرومتر ..... ۴۲
۴۷	جدول ۱-۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ LCB تولید شده (درصد وزنی) ..... ۴۷
۴۷	جدول ۲-۳- روش تهیه‌ی نمونه‌ها با نام اختصاری آنها ..... ۴۷
۴۹	جدول ۳-۳- مشخصات فرآیند سه مرحله ذوب در کوره‌ی قوسی تحت خلأ ..... ۴۹

## فصل اول:

مقدمه

## مقدمه

آلیاژ تیتانیوم<sup>۱</sup> Timetal-LCB با ترکیب Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al آلیاژی با فاز بتا پایدار در دمای محیط است. این آلیاژ دارای کمترین مقدار عناصر پایدارکننده‌ی بتا گران‌قیمت می‌باشد، بنابراین قیمت پایین این آلیاژ، در مقایسه با دیگر آلیاژهای بتا، از مزایای آن محسوب می‌شود. مقدار کمی آلومینیوم به عنوان پایدارکننده‌ی فاز آلفا به این آلیاژ افزوده شده که از طریق سخت‌شوندگی محلول جامدی و رسوب‌سختی حین پیرسازی، استحکام آلیاژ LCB را افزایش می‌دهد [۱]. آلیاژ LCB از آلیاژ Ti-6Al-4V نیز ارزان‌تر است، زیرا وانادیوم گران‌قیمت آن با فروآلیاژهای Fe-V و Fe-Mo با قیمت مناسب جایگزین شده است [۲و۱]. علاوه بر این، چنین آلیاژی به دلیل استحکام بسیار بالا و کرنش شکست بالا، پراهمیت شده است. این آلیاژ در شرایطی که زمینه‌ی آن تک فاز بتا باشد، قابلیت شکل‌دهی سرد داشته و برای رسیدن به استحکام‌های بالا در آن می‌باید تحت عملیات پیرسازی (رسوب‌دهی فاز آلفا) قرار بگیرد [۱].

آلیاژ تیتانیوم بتا Timetal-LCB، عمدتاً برای کاربردهای غیر از هوافضا و خصوصاً برای ساخت فنرهای اتومبیل توسعه یافته‌اند. این آلیاژ در مقایسه با دیگر آلیاژهای بتا، دارای ترکیب بهتری از استحکام (بالتر از ۱۵۰۰ مگاپاسکال) و انعطاف‌پذیری (ازدیاد طول بالای ۸ درصد) می‌باشد. این قابلیت کار سرد و استحکام بالا سبب شده است که این آلیاژ در صنایع اتومبیل‌سازی مثلاً در ساخت فنرهای سیستم تعلیق، فنرهای سوپاپ و پیچ و مهره‌ها جایگزین بیشتر ترکیبات فولادی گردد.

به دلیل سازگاری عالی و مقاومت به خوردگی بسیار بالای آلیاژهای تیتانیوم، کاربرد دیگر این آلیاژ در تجهیزات پزشکی است. در حال حاضر، آلیاژ بادوامی مثل Ti-6Al-4V برای ساخت انواع ایمپلنت استفاده شده است. آلیاژ LCB دارای سازگاری بهتری با بدن نسبت به آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد که بهبود سازگاری تا حدودی ناشی از افزودن آهن به آلیاژ LCB می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Low-Cost Beta

با توجه به چنین مزایایی سعی بر این است تا که با بهبود ساختار این آلیاژ، گستره‌ی کاربرد آن را افزایش دهند. بدین منظور پژوهش حاضر با هدف کاهش میزان جدایش‌ها و عیوب و افزایش یکنواختی آن با استفاده از تکرار دفعات ذوب به روش VAR و انواع عملیات حرارتی، تعیین دمای بهینه‌ی عملیات آنیل محلولی آلیاژ LCB و تعیین محیط سرمایش مناسب پس از عملیات آنیل محلولی، انجام خواهد شد.

این پایان‌نامه شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول مقدمه و در فصل دوم مروری بر منابع علمی مرتبط و قابل دسترسی ارائه شده است. در فصل سوم روش انجام پژوهش به تفصیل بیان شده است و در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایشات مختلف گزارش شده و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در نهایت در فصل پنجم، مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به همراه پیشنهادهایی برای ادامه‌ی فعالیت‌ها در این راستا، ارائه شده است.

فصل دوم:

مروری بر منابع



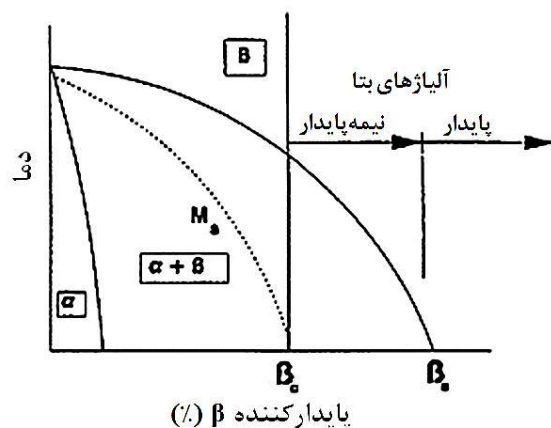
## ۱-۲- معرفی آلیاژ Timetal-LCB

کاربرد آلیاژهای تیتانیوم در موارد غیر از هوافضا، از سال‌ها قبل گسترش یافته است. این کاربردها به دلیل وزن کم، انعطاف‌پذیری بالا، استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی و سازگاری با بدن در چنین آلیاژهایی می‌باشد. آلیاژهای تیتانیوم بسته به ساختارشان به گروه‌های آلفا، شبه آلفا، آلفا-بتا، بتا نیمه‌پایدار و آلیاژهای بتا تقسیم‌بندی می‌شوند. مزایای آلیاژهای بتا شامل کارپذیری عالی، خصوصیات سخت‌کاری خوب، مقاومت به خوردگی بالا و رفتار خوب در برابر اشاعه‌ی ترک خستگی می‌باشد. همچنین اندازه‌ی دانه‌های کوچک بتا و نیز ساختار bcc آن سبب قابلیت شکل‌پذیری بالای این آلیاژها در مقایسه با آلیاژهای آلفا (hcp) می‌گردد و کاربرد آنها به عنوان فنرهای تعلیق در صنایع اتومبیل‌سازی را گسترش می‌دهد. آلیاژ Timetal-LCB یک آلیاژ بتا نیمه‌پایدار و ارزان قیمت است که به دلیل ترکیب خوبی از استحکام و انعطاف‌پذیری برای کاربردهای غیر از هوافضا نیز توسعه یافته است [۱].

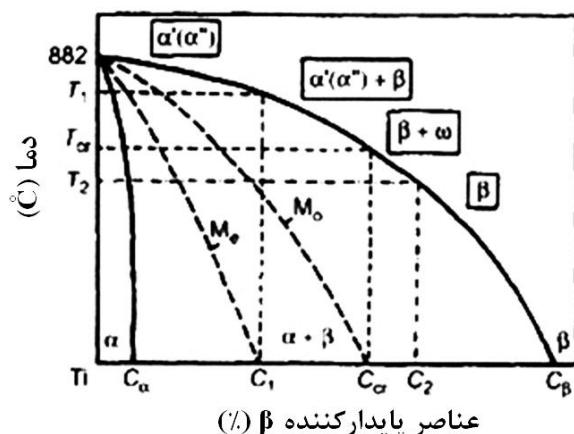
## ۱-۱-۲- متالورژی فیزیکی آلیاژ LCB

همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، در شرایط تعادلی، دیاگرام دوتایی آلیاژ تیتانیوم، شامل سه منطقه‌ی  $\alpha$ ،  $\beta+\alpha$  و  $\beta$  می‌باشد. از آنجایی که غلظت عناصر پایدارکننده‌ی بتا به تدریج رو به افزایش است، اولین فرآیندی که در طول کوئنچ از منطقه‌ی بتا مشاهده می‌شود استحاله‌ی مارتنزیتی است. همچنان که غلظت بتاسازها بیشتر می‌شود (بالتر از  $C_{cr}$  در شکل ۲-۲)، در بعضی نقاط استحاله‌ی مارتنزیتی اتفاق نمی‌افتد و ساختار ۱۰۰٪ بتا باقی می‌ماند [۳]. در شرایط تعادلی همانطور که از دیاگرام فازی شکل ۱-۲ مشخص است، آلیاژهای بتا نیمه پایدار شامل مقدار کافی از عناصر پایدارکننده‌ی بتا هستند که از تجزیه‌ی فاز بتا به فاز  $\alpha$  و یا  $\alpha''$  مارتنزیتی حین کوئنچ جلوگیری می‌کنند (به عبارتی دمای پایداری تا زیر دمای اتاق کاهش می‌یابد) [۴]. در آلیاژهای نیمه‌پایدار، اگرچه حین کوئنچ فاز بتا ۱۰۰٪ باقی می‌ماند، اما فاز بتا ناپایدار است و در طول پیرسازی، آلفا رسوب خواهد کرد. به عبارت دیگر، آلیاژهای بتا پایدار نمی‌توانند پیر سخت شوند

[۵]. در ادامه به معرفی فازهای موجود در آلیاژ LCB و فازهای ایجاد شده حین عملیات حرارتی گوناگون پرداخته شده است.



شکل ۲-۱- دیاگرام دوتایی از آلیاژهای تیتانیوم چندعنصری [۵].



شکل ۲-۲- تغییرات وضعیت مرزهای بین فازی در سیستم Ti-Cr به صورت تابعی از دما و زمان گرمایش [۳].

فاز  $\alpha'$  و  $\alpha''$ : فاز  $\alpha'$  دارای ساختار هگزاگونال است و در میکروسکوپ نوری و الکترونی ساختار آن به صورت سوزنی شکل است. در آلیاژهای تیتانیوم مانند مارتنزیت فولادها، سختی یا استحکام بالا ندارد و تشکیل آن سبب افزایش زیادی در سختی و استحکام نمی‌گردد (استحکام آن کمی بالاتر از فاز  $\alpha$  است) [۶]. فاز ناپایدار دیگری است که ممکن است در آلیاژهای تیتانیوم تشکیل شود. این فاز دارای شکل‌پذیری خوبی است [۶]. فازهای  $\alpha'$  و  $\alpha''$  مشابهند با این تفاوت که فاز  $\alpha''$  دارای تقارن کمتری است و ساختار این فاز ارتورومبیک نامیده می‌شود [۷ و ۳]. این فاز یا طی سرد کردن تا دمای

اتاق پس از عملیات محلولی در محدوده‌ی دمای  $T_{\beta}^2$  یا در طول تغییرشکل فاز بتا نیمه پایدار در دمای اتاق و یا طی عملیات پیرسازی تشکیل می‌شود [۷ و ۸]. فاز  $\alpha''$  در میکروسکوپ نوری یا الکترونی، مارتنزیتی سوزنی شکل دیده می‌شود [۷ و ۳] (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- تصویر SEM از آلیاژ Ti-10V-4.5Fe-1.5Al پس از پیرسازی [۲].

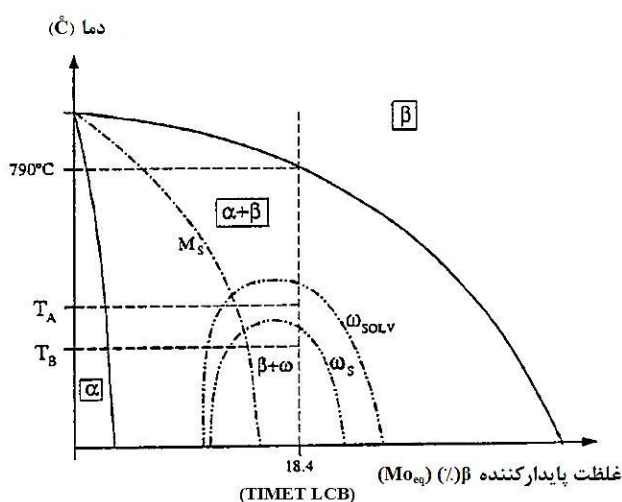
**فاز  $\omega$ :** تجزیه‌ی فاز بتای نیمه پایدار معمولاً منجر به ساختار مخلوطی از فازهای  $\beta + \alpha$  می‌گردد. البته در دماهای پایین سرعت این تجزیه آهسته است و فازهای نیمه پایدار دیگری نیز می‌تواند شکل بگیرد (شکل ۲-۴). بسته به درجه‌ی پایداری فاز بتا اولیه، این فازها می‌توانند هگزاگونال غیرفشرده یا یک فاز تریگونال به نام فاز  $\omega$  باشند. فاز  $\omega$  می‌تواند هنگام کوئنچ زیر دمای  $\omega_s$  (شکل ۲-۴) (۳۵۰ درجه سانتی‌گراد برای آلیاژ LCB) توسط مکانیزم جابجایی<sup>۳</sup> ( $\omega^{ath}$ ) و بدون نیاز به گرما تشکیل شود [۹]. لیناین<sup>۴</sup> و همکارانش [۹] گزارش می‌کنند که استحاله برگشتی  $\omega$  به  $\beta$  طی گرمایش از دمای اتاق باعث بروز عیوب بلوری در زمینه  $\beta$  می‌شود که از این طریق جوانه‌زنی رسوبات آلفا تسهیل می‌شود. علاوه بر این، رسوبات  $\omega$  می‌توانند هنگام پیرسازی در دمای پایین (زیر دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)، به صورت حرارتی ( $\omega^{iso}$ ) و با نفوذ اتم‌ها در فاز بتای زمینه رسوب نمایند. فاز  $\omega$  حرارتی سبب تردی شدید آلیاژ می‌گردد [۴، ۱۰ و ۱۱]. فاز  $\omega$  حرارتی، کم آلیاژ بوده و در محدوده‌ی دمایی ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. این فاز نیمه پایدار و دارای ساختار کریستالی هگزاگونال است. فاز  $\omega$  حرارتی در آلیاژهایی با عناصر پایدارکننده‌ی زیاد دارای ساختار کریستالی تریگونال و در آلیاژهایی

<sup>2</sup> Beta Transus Temperature

<sup>3</sup> Displacive

<sup>4</sup> Lenain

رقیق‌تر دارای ساختار هگزاگونال است. فاز  $\omega$  دارای استحکام بسیار بالا ولی انعطاف‌پذیری پایین است و به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی برای فاز آلفا حین پیرسازی عمل می‌کند [۱۲ و ۱۳].



شکل ۲-۴- دیاگرام فازی شبه دوتایی Ti-1.5Al با عناصر پایدارکننده بتا Mo<sub>eq</sub> [۱۰].

در آلیاژ LCB حین کوئنچ، فاز  $\omega$  اترمال تشکیل می‌شود. پایداری فاز بتا در رابطه با رسوبات  $\omega$  را نمی‌توان از طریق مفهوم  $Mo_{eq}$  توضیح داد. در واقع، تأثیر عناصر آلیاژی بر استحاله‌ی  $\beta \rightarrow \omega$  نسبت به  $\beta \rightarrow \alpha$  متفاوت است. مثلاً آلومینیوم تشکیل رسوبات  $\omega$  در آلیاژهای تیتانیوم را به تعویق انداخته و یا حتی از تشکیل آن جلوگیری می‌کند، ولی آلومینیوم در تغییر فاز  $\beta \rightarrow \alpha$  نقش معکوسی دارد [۴].

**استحاله فازی  $\beta \rightarrow \beta+\alpha$**  : هنگام سرد کردن آلیاژهای تیتانیوم بتا از منطقه تک فازی بتا، دو مورفولوژی از فاز آلفا، به نام‌های آلفای اولیه و ثانویه، ممکن است شکل گیرد. فازهای آلفای اولیه غالباً در مرزدانه‌های بتا اولیه و در دماهای نسبتاً بالا تشکیل می‌شوند. در دماهای کمی پایین‌تر، صفحات نازک آلفا، هم در مرزدانه‌ها و هم در داخل دانه‌ها شکل می‌گیرند که به آلفای ثانویه معروف هستند [۱۵].

<sup>۵</sup>مولیبدن معادل که بر مبنای رابطه زیر تعریف می‌شود، معیاری برای تعیین میزان پایدارکنندگی فاز  $\beta$  در آلیاژهای تیتانیوم است [۱۴]:

$$Mo_{Eq} = 1[Mo] + 0.22 [Ta] + 0.28 [Nb] + 0.44 [W] + 0.67 [V] + 1.6 [Cr] + 1.25 [Ni] + 1.7[Mn] + 1.7 [Co] + 2.5 [Fe] - 1[Al]$$

در این رابطه عناصر مختلف، ضرایب متفاوتی دارند که بیانگر اثر متفاوت آن‌ها بر پایدارکنندگی فاز  $\beta$  است. قابل ذکر است که در رابطه فوق، ضریب آلومینیوم عددی منفی است که به معنی اثر معکوس آن یعنی پایدارکنندگی فاز  $\alpha$  است.