

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش آلیاژ Ti6Al4V

پایان نامه کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت از مواد

محسن حیدریگی

اساتید راهنما

دکتر فتح الله کریم زاده

دکتر احمد ساعتچی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته خوردگی و حفاظت از مواد آقای محسن حیدریگی
تحت عنوان

تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش آلیاژ $Ti6Al4V$

در تاریخ ۱۳۸۵/۱۲/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

دکتر فتح الله کریمزاده

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر احمد ساعتچی

۲- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر محمود منیر واقفی

۳- استاد داور

دکتر عبدالمجید جعفری

۴- استاد داور

دکتر مرتضی شمعیان

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی

اکنون که به لطف خدای بزرگ موفق به انجام این پایان نامه گردیده‌ام، لازم می‌دانم از همه کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند، تشکر نمایم.

از پدر و مادر عزیزم که در این مدت زحمات من بر آنها دوچندان شده سپاسگزارم و امیدوارم که دعای خیر ایشان همیشه بدرقه راه من باشد. در انجام این پروژه از راهنمائیهای اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر کریم زاده و جناب آقای دکتر ساعتچی بسیار بهره بردم. هرچند زبان و قلم قاصر از سپاس این عزیزان است ولی چاره ای از این ابراز محدود نیست لذا پس از درود و سلام خدمت این دو بزرگوار، سپاس صادقانه خود را تقدیم می‌نمایم. از آقای مهندس تحویلین نیز به خاطر تلاش های موثری که در راهبرد این پروژه داشتند قدردانی می‌نمایم. از کادر آزمایشگاهی دانشکده آقایان عربیان، مویدی، صائبی، صادقی، عبادی منش و خانم علوی نیز کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است

تقدیم به

سنگ صبورم مادر

و مایه غرورم پدر

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	چکیده.....
	فصل اول: مقدمه
۲	مقدمه
	فصل دوم: مبانی علمی و مرور مطالعاتی
۵	۱-۲- متالورژی فیزیکی تیتانیم.....
۷	۲-۲- گروه های مختلف آلیاژی.....
۹	۱-۲-۲- آلیاژهای گروه آلفا.....
۹	۲-۲-۲- آلیاژهای گروه بتا.....
۱۲	۳-۲-۲- آلیاژهای گروه آلفا-بتا.....
۱۳	۳-۲- رابطه بین ریزساختار و خواص مکانیکی.....
۱۳	۱-۳-۲- استحکام و انعطاف پذیری.....
۱۶	۲-۳-۲- خستگی.....
۱۷	۳-۳-۲- خزش.....
۱۷	۴-۲- آلیاژ تیتانیم $Ti6Al4V$
۱۸	۱-۴-۲- ریز ساختار و رفتار تغییر حالت.....
۲۱	۲-۴-۲- عملیات حرارتی آلیاژ $Ti6Al4V$
۲۱	۵-۲- جوش پذیری آلیاژهای تیتانیم.....
۲۳	۶-۲- پدیده های متالورژیکی در جوشکاری ذوبی آلیاژهای تیتانیم.....
۲۴	۱-۶-۲- اثر اجزاء اتمسفری بر خواص جوش تیتانیم.....
۲۴	۲-۶-۲- دانه های بزرگ ستونی بتا در منطقه جوش.....
۲۵	۷-۲- کنترل ساختار منطقه جوش آلیاژهای تیتانیم.....
۲۶	۱-۷-۲- عوامل موثر بر مشخصه های ریز ساختاری منطقه جوش تیتانیم.....
۲۸	۸-۲- جوشکاری قوسی گاز تنگستن.....
۲۹	۹-۲- رفتار خوردگی مواد کاشتنی.....
۳۰	۱۰-۲- خوردگی تیتانیم و آلیاژهای آن.....
۳۲	۱-۱۰-۲- تأثیر عناصر آلیاژی بر رفتار خوردگی تیتانیم.....
۳۸	۲-۱۰-۲- تأثیر ریزساختار بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیم.....
۴۲	۳-۱۰-۲- تأثیر فرآیند جوشکاری بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیم.....
	فصل سوم: مواد و روشهای آزمایش
۴۴	۱-۳- مواد.....
۴۴	۱-۱-۳- فلز پایه.....

۴۵	..... گاز ختنی..... ۲-۱-۳
۴۵	..... تمیز کاری و آماده سازی سطح نمونه ها..... ۲-۳
۴۶	..... تجهیزات..... ۳-۳
۴۶	..... فرآیند جوشکاری..... ۴-۳
۴۷	..... عملیات حرارتی..... ۵-۳
۴۷	..... ارزیابی های متالورژیکی..... ۶-۳
۴۷	..... متالوگرافی..... ۱-۶-۳
۴۸	..... میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)..... ۲-۶-۳
۴۸	..... پراش پرتو ایکس..... ۳-۶-۳
۴۸	..... مشخصه یابی..... ۷-۳
۴۸	..... بررسی رفتار خوردگی منطقه جوش (شامل FZ و HAZ) و فلز پایه..... ۱-۷-۳
۵۰	..... بررسی رفتار مکانیکی منطقه جوش، متأثر از حرارت و فلز پایه..... ۲-۷-۳

فصل چهارم: نتایج و بحث

۵۲	..... مقدمه..... ۱-۴
۵۲	..... تأثیرات فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی بر ساختار منطقه جوش..... ۲-۴
۵۲	..... تأثیر عملیات جوشکاری بر ساختار منطقه جوش..... ۱-۲-۴
۵۷	..... تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار منطقه جوش..... ۲-۲-۴
۶۱	..... رفتار خوردگی..... ۳-۴
۷۳	..... تأثیرات گالوانیکی فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی..... ۴-۴
۸۳	..... ارزیابی خواص مکانیکی..... ۵-۴
۸۳	..... سختی..... ۱-۵-۴
۸۸	..... خواص کششی..... ۲-۵-۴

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۳	..... جمع بندی و نتیجه گیری..... ۱-۵
۹۴	..... پیشنهاد برای کارهای آینده..... ۲-۵
۹۵	..... منابع و مراجع.....

چکیده

در این پژوهش تأثیر فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن گاز (GTAW) بر ساختار، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش آلیاژ Ti6Al4V مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از عملیات حرارتی قبل و بعد از فرآیند جوشکاری، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش بهبود داده شد. بدین منظور ورق های نازک آلیاژ Ti6Al4V به ضخامت ۱/۳ mm در حرارت ورودی ۳۵۰ J/mm تحت فرآیند GTAW قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش، مجموعه‌ای از عملیات حرارتی تنش‌گیری، انحلالی و پیرسازی بر روی ورقه‌های نازک آلیاژ فوق قبل و بعد از جوشکاری اعمال گردید. عملیات حرارتی تنش‌گیری و پیرسازی به ترتیب در دماهای ۶۰۰°C و ۵۴۰°C به مدت یک ساعت انجام شد و نمونه‌ها در هوا سرد شدند. همچنین عملیات انحلالی در دمای ۹۵۰°C به مدت نیم ساعت انجام شد و سپس نمونه‌ها در آب سرد شدند. ساختار و خواص مکانیکی منطقه جوش توسط پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ نوری، آزمایش کشش و سختی سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار خوردگی منطقه جوش نیز توسط آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و پتانسیل مدار باز- زمان در محلول رینگر و در دمای ۳۷°C بررسی شد. بررسی‌های ساختاری گویای حضور دانه‌های ستونی β اولیه درشت به همراه فاز α ناپیوسته در مرز دانه‌ها در منطقه ذوب (FZ) و عدم وجود مرز مشخص بین مناطق FZ و متأثر از حرارت (HAZ) است. این امر به جوانه زنی و رشد رونشستی دانه‌های β موجود در FZ بر روی دانه‌های درشت شده منطقه مجاور متأثر از حرارت (NHAZ) نسبت داده شد. چنین ساختاری موجب افت قابل توجه مقاومت خوردگی و ازدیاد طول نسبی منطقه جوش شده است. نتایج بررسی‌های ساختاری نشان داد که عملیات حرارتی در زیر دمای استحاله $\alpha \rightarrow \beta$ تأثیری بر اندازه و شکل ستونی دانه‌های منطقه جوش ندارد. جهت بهبود رفتار خوردگی منطقه جوش، از عملیات حرارتی استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد در صورتیکه پس از فرآیند جوشکاری، عملیات آنیل انحلالی و پیرسازی انجام شود، منطقه جوش رفتار خوردگی نزدیکی با فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت ارائه می‌کند و هیچ‌گونه خوردگی ترجیحی میان مناطق جوش و فلز پایه مشاهده نمی‌شود. این امر به تشکیل رسوبات فاز β از مارتزیت و فاز α از β شبه پایدار حاضر در منطقه جوش و همچنین درشت شدن صفحات α در حین عملیات حرارتی نسبت داده شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که عملیات حرارتی پیرسازی و تنش‌گیری پس از فرآیند جوشکاری و همچنین انجام عملیات حرارتی قبل از جوشکاری تأثیر چندانی بر رفتار خوردگی منطقه جوش ندارد. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که اعمال عملیات حرارتی آنیل انحلالی و پیرسازی باعث یکنواختی سختی مناطق مختلف می‌شود و انعطاف پذیری فلز جوش را حدود صد درصد بهبود می‌بخشد.

فصل اول

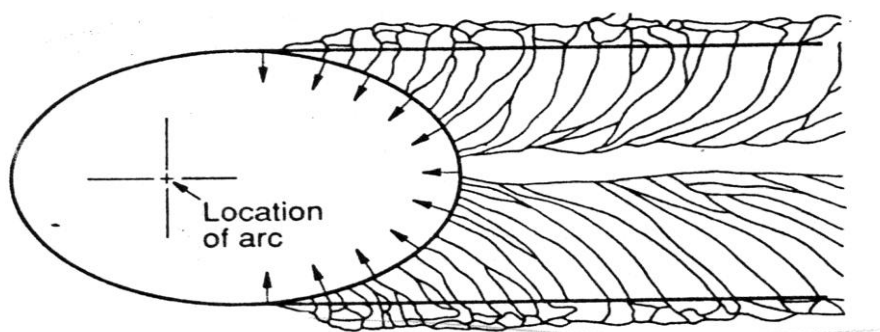
مقدمه

برای تولید کاشتنی‌ها، آلیاژها و فلزات زیست سازگاری نظیر تیتانیم، نایتینول، آلیاژهای پایه کبالت، فولادهای زنگ نزن، پلاتین و نیوبیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان این آلیاژها و فلزات، آلیاژ $Ti6Al4V$ در سالهای متمادی به عنوان کاشتنی و عمدتاً در کاربردهای ارتوپدی به کار گرفته شده است. این آلیاژ در مقایسه با کاشتنی‌های سنتی مورد استفاده نظیر فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای پایه کبالت از مقاومت خوردگی بسیار بالاتری برخوردار است. با این حال اخیراً نگرانی‌هایی در مورد زیست سازگاری این آلیاژ به وجود آمده است که ناشی از انحلال یون‌های وانادیم و آلومینیوم و اثرات سمی مرتبط با آنها می‌باشد.

انواع خاصی از کاشتنی‌ها، نظیر دریچه قلب مصنوعی، سوندها، پمپ‌های انسولین و برخی کاشتنی‌های ارتوپدی اغلب از دو جزء جوشکاری شده به هم ساخته می‌شوند. دلایل انجام این کار، جدا از ماهیت تکنیکی و تجاری، براساس نیاز درمانی می‌باشد. جوشکاری می‌تواند هزینه ساخت کاشتنی‌ها را کم کند و تولید را آسان‌تر سازد. جوشکاری دو قسمت متفاوت، منجر به انتخاب مواد مناسب‌تر برای قسمت مذکور می‌گردد. با این وجود، جوش‌ها به صورت ناحیه‌هایی که به طور ویژه حساس به خوردگی هستند، شناخته می‌شوند، به همین دلیل ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خوردگی ایمپلنت‌ها و سنجش میزان آزاد شدن یون‌های فلزی از نواحی متأثر از جوش و تأثیر فرایند، بر سازگاری زیستی کاشتنی مورد توجه قرار گرفته است.

ریزساختار جوش آلیاژهای تیتانیم تغییرات بسیار نامناسبی بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی منطقه جوش ایجاد می‌کند. همانگونه که در شکل ۱-۱ مشخص شده است، برای یک حوضچه مذاب بیضی شکل در ورق‌های تیتانیومی، دانه‌ها در منطقه جوش به صورت رونشستی بر روی دانه‌های درشت شده منطقه مجاور

متأثر از حرارت یا NHAZ جوانه‌زنی کرده و به دنبال آن به صورت رقابتی به طرف حوضچه مذاب رشد می‌نماید. در این فرآیند رشد رقابتی دانه‌ها، دانه‌هایی که دارای جهت رشد ترجیحی هستند (در تیتانیوم بتا این جهت به صورت $<100>$ است) با توجه به وجود ماکزیمم گرادیان حرارتی در عرض فصل مشترک جامد - مذاب رشد می‌نمایند و شرایط برای رشد دانه‌های ستونی در منطقه جوش (FZ) فراهم می‌گردد. وجود دانه‌های درشت بتا در FZ ورق‌های نازک تیتانیومی که تحت فرآیند جوشکاری ذوبی قرار گرفته‌اند موجب می‌شود که در برخی از آلیاژهای α - β پس از انجام فرآیند و استحاله فاز، ساختار آلفای پیوسته‌ای روی مرز دانه‌های درشت بتای اولیه تشکیل شود و مسیر را برای شکست بین دانه‌ای منطقه جوش همراه با انعطاف‌پذیری کم فراهم نماید.



شکل ۱-۱: رشد رونشستی دانه‌ها در منطقه جوش آلیاژهای تیتانیوم

علاوه بر این رفتار خوردگی ضعیف منطقه جوش نیز به حضور این دانه‌های ستونی جهت دار و جدایش عناصر آلیاژی ناشی از آن نسبت داده شده است.

آنچه که بر اندازه دانه‌های اولیه بتا در منطقه جوش و به دنبال آن خواص مکانیکی و مقاومت خوردگی آن تأثیر بسزایی دارد، نوع فرآیند جوشکاری، میزان حرارت ورودی در حین فرآیند جوشکاری و به دنبال آن سرعت سرد شدن منطقه جوش است. در مورد آلیاژهای تیتانیوم، در حین سیکل‌های حرارتی جوشکاری، ماده در منطقه جوش به صورت کامل و در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) به صورت کامل و یا جزئی به فاز β استحاله پیدا می‌کند و در سرد شدن متعاقب آن فاز β می‌تواند به مخلوطی از فازهای α و β توسط جوانه‌زنی و رشد یا فاز مارتنزیت توسط فرآیندی برشی و یا مخلوطی از α و β مارتنزیت تبدیل شود.

خوردگی در مقاطع جوش به دلیل تغییرات موضعی در ریزساختار و ترکیب شیمیایی فلز پایه (BM) همواره به عنوان یک مشکل مطرح بوده است. تجربه‌های صنعتی موجود در مورد تیتانیوم خالص تجارتمی با میزان آهن بیش از ۰/۰۵ درصد نشان می‌دهد که شکست تجهیزات تیتانیومی در اسید نیتریک به دلیل خوردگی ترجیحی

فصل مشترک لایه‌های α/β در منطقه جوش ایجاد می‌شود. وضعیت مشابهی نیز در مورد برخی از آلیاژهای تیتانیوم مورد استفاده در محیط‌های خورنده رخ داده است. از نقطه نظر زیست‌سازی، خوردگی موضعی منطقه جوش می‌تواند عمر کاشتنی را کاهش داده و به عنوان تهدیدی برای ایمنی بدن باشد. بنابراین کنترل فرآیندهای حرارتی برای اجتناب از تولید ریزساختارهای موضعی که به خوردگی حساس‌ترند ضروری است. اختلاف اندک در ریزساختار و ترکیب شیمیایی مناطق HAZ و FZ در مقایسه با فلز پایه می‌تواند باعث ایجاد اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی شده و خوردگی گالوانیکی را به وجود آورد. پارامترهایی که بر نوع و شدت خوردگی تأثیر می‌گذارند شامل ترکیب شیمیایی، ریزساختار و تغییرات متالورژیکی BM، HAZ و FZ، نوع فرآیند جوشکاری، اندازه ناحیه جوش و نوع محیط خورنده هستند. به طور کلی با انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری و استفاده از عملیات حرارتی بعد از جوشکاری می‌توان تغییرات ریزساختاری و اختلاف پتانسیل نواحی مختلف جوش را کنترل کرد.

چنانچه اشاره شد ریزساختار منطقه جوش آلیاژهای تیتانیوم تأثیر بسیار مهمی بر رفتار خوردگی دارد. تأثیر ریزساختار بر انحلال آندی آلیاژهای تیتانیوم در سال‌های اخیر کم و بیش مورد بررسی قرار گرفته است با این حال در مورد تأثیر فرآیند جوشکاری بر رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژهای تیتانیوم تحقیقات بسیار اندکی صورت گرفته است. در این پژوهش با استفاده از فرآیند جوشکاری قوس-الکتروکود تنگستن (GTAW) اتصال مناسبی بین ورق‌های نازک آلیاژ Ti6Al4V ایجاد شد و تأثیر فرآیند جوشکاری بر ساختار، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه تأثیر عملیات حرارتی مختلف قبل و پس از جوشکاری بر ساختار، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی منطقه جوش این آلیاژ بررسی گردید.

فصل دوم

مبانی علمی و مرور مطالعاتی

۲-۱- متالورژی فیزیکی تیتانیم

عنصر تیتانیم حدود دو‌یست سال پیش کشف شده است ولی استفاده از تیتانیم و آلیاژهای آن در کاربردهای مهندسی از سابقه‌ای پنجاه ساله برخوردار است [۱]. تیتانیم فلز بسیار فعالی است و تمایل بسیار زیادی برای واکنش با اکسیژن دارد. این امر منجر به تشکیل لایه روئین و شدیداً چسبنده TiO_2 بر روی سطح آن شده و باعث می‌شود تا این فلز در اکثر محیط‌های شیمیایی خصوصاً بدن انسان مقاومت خوردگی بهتری نسبت به فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای کبالت-کروم از خود نشان دهد [۲]. استحکام کششی تیتانیم و آلیاژهای آن حدوداً برابر استحکام فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی و بالاتر از استحکام فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی است. نقطه ذوب تیتانیم از فولاد بیشتر بوده ($1668^\circ C$) و استحکام مکانیکی خود را تا دمای $550^\circ C$ (بسته به ترکیب شیمیایی) حفظ می‌کند. تیتانیم عنصری سبک با چگالی 4.51 gr/cm^3 می‌باشد که این مقدار تقریباً بین چگالی آلومینیوم و فولاد قرار دارد. علاوه بر موارد فوق آلیاژهای تیتانیم از قابلیت فورج، ریخته‌گری، فرمینگ و جوشکاری مناسبی برخوردارند [۳-۶]. به دلیل آنکه کاشتنی‌های تهیه شده از فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای پایه کبالت در برابر انواع خوردگی نظیر خوردگی یکنواخت، خوردگی تنش، خوردگی گالوانیکی، خوردگی سایشی و حفره دار شدن مقاومت کمتری نشان می‌دهند، تیتانیم در کاربردهای پزشکی یک عنصر بسیار مهم به شمار می‌رود [۲]. برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی این عنصر در جدول ۲-۱ ارائه شده است [۷]:

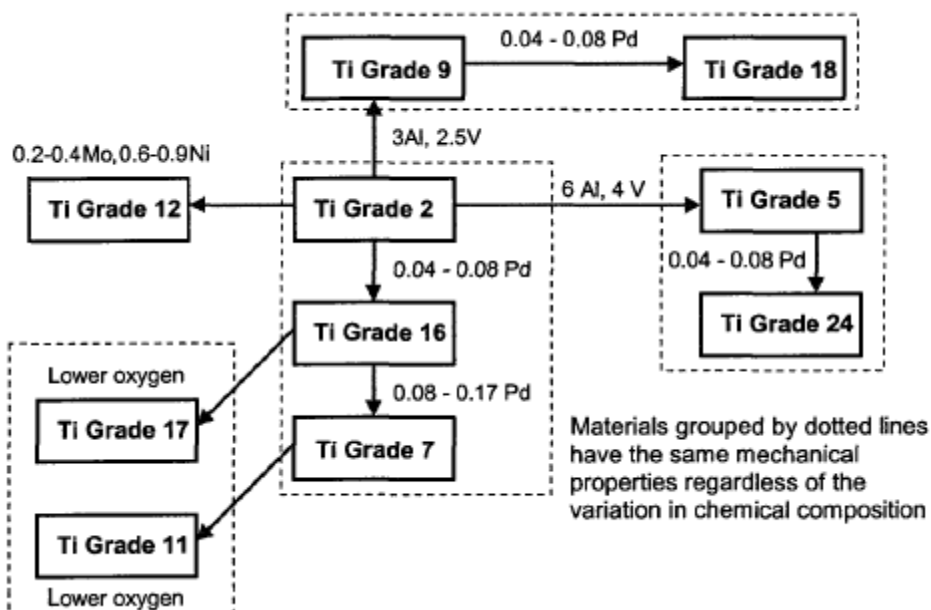
تیتانیم خالص عنصری چند شکلی است. ساختار آن در دماهای پایین شش گوش متراکم^۱ است که با عنوان فاز آلفا (α) شناخته می‌شود و در دمای $882^\circ C$ به ساختار مکعبی مرکز دار^۲ به نام بتا (β) تبدیل می‌گردد. سینتیک تبدیل فاز β به α بر اثر سرد شدن، بر خواص تیتانیم و آلیاژهای آن تأثیر شدیدی دارد. به علاوه حضور عناصر آلیاژی می‌تواند باعث تغییر در دمای استحاله $\alpha \rightarrow \beta$ شده و انواع مختلفی از آلیاژهای تیتانیم را به وجود آورد [۸]. شکل ۲-۱ ارتباط بین ترکیب شیمیایی انواع مختلف آلیاژهای تیتانیم را نشان می‌دهد [۹].

جدول ۲-۱: برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی تیتانیم خالص تجارتي [۷و۴].

۱-Hexagonal Closed Packed:HCP

۲-Body Center Cubic:BCC

عدد اتمی	۲۲
وزن اتمی	۴۷/۸۶۷ gr/mole
شبکه بلوری	هگزاگونال فشرده در دماهای کمتر از ۸۸۲ °C : $c/a=1/587$ ، $c=4/683 \text{ \AA}$ ، $a=2/9504 \text{ \AA}$ مکعبی مرکزدار در دماهای بیشتر از ۸۸۲ °C : $a=3/3065 \text{ \AA}$
نقطه ذوب	۱۶۶۸ °C
چگالی	$4/54 \text{ g/cm}^3 (20^\circ\text{C})$
نقطه جوش	۳۲۸۷ °C
ظرفیت	۴،۳،۲،۰
مقاومت ویژه	۵۵ $\mu\Omega/\text{cm} (20^\circ\text{C})$
ضریب انبساط حرارتی	$8/4 \mu\text{m/m. K} (20^\circ\text{C})$
مدول الاستیک	۱۰۵ GPa
استحکام تسلیم	۶۹۲ MPa
استحکام کششی	۷۸۵ MPa
پتانسیل استاندارد احیائی	$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Ti} \quad -1/73 \text{ V vs. SHE}$ $\text{Ti}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Ti}^{2+} \quad -2/0 \text{ V vs. SHE}$ $\text{TiO}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \leftrightarrow \text{Ti} + 2\text{H}_2\text{O} \quad -0/86 \text{ V vs. SHE}$ $\text{Ti}(\text{OH})^{3+} + \text{H}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \quad -0/06 \text{ V vs. SHE}$



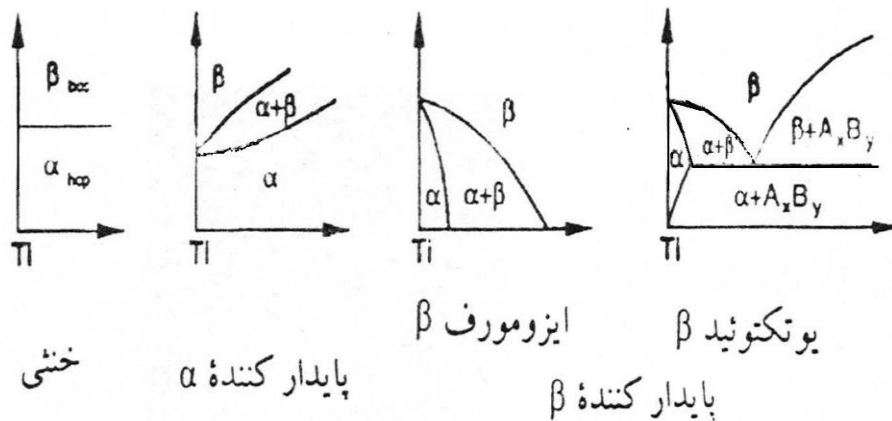
شکل ۱-۲: ارتباط شماتیکی بین ترکیب شیمیائی آلیاژهای تیتانیوم. آلیاژهایی که با خطوط نقطه چین مشخص گردیده اند

صرفنظر از ترکیب شیمیائی، خواص مکانیکی کم و بیش یکسانی دارند [۹].

۲-۲- گروه های مختلف آلیاژی

چنانکه ذکر گردید، تیتانیم خالص در دمای 882°C یک تغییر حالت آلوتروپیک را طی می نماید. با افزودن عناصر آلیاژی می توان دمای استحاله $\alpha \leftrightarrow \beta$ (T_{β}) را تغییر داد که به دنبال آن گستره پایداری فازهای α و β تغییر می کند. بر اساس تأثیر عناصر آلیاژی بر این استحاله می توان آنها را به سه گروه کلی عناصر خنثی (Zr, Sn)، عناصر پایدار کننده فاز α (C, N, O, Al) و عناصر پایدار کننده فاز β در دو گروه ایزومورف β (Nb, Ta, V, Mo) و یوتکتوئید β (H, Si, Cu, Cr, Fe) تقسیم بندی نمود.

در شکل ۲-۲ و جدول ۲-۲ به ترتیب تأثیر عناصر آلیاژی بر نمودار فاز آلیاژهای Ti-X و تأثیر پایدار کننده های عناصر آلیاژی اضافه شونده به تیتانیم نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: تأثیر عناصر آلیاژی بر نمودار فازی Ti-X [۴].

جدول ۲-۲: گستره و تأثیر تعدادی از عناصر آلیاژی استفاده شده در ساخت آلیاژهای تیتانیم [۴].

عنصر آلیاژی	گستره (درصد وزنی)	تأثیر روی ساختار
آلمینیم	۲-۷	پایدار کننده α
قلع	۲-۶	پایدار کننده α
وانادیم	۲-۲۰	پایدار کننده β
مولیبدن	۲-۲۰	پایدار کننده β
کرم	۲-۱۲	پایدار کننده β
مس	۲-۶	پایدار کننده β
زیر کونیم	۲-۸	استحکام دهنده α و β
سیلیسیم	۰/۲-۱	بهبود مقاومت خزشی

با توجه به شکل ۲-۲ دیده می شود که برخی از عناصر آلیاژی نظیر Al باعث افزایش دمای استحاله β به α شده و به عنوان عناصر پایدارکننده فاز α شناخته می شوند. گروه مزبور شامل فلزات ساده و یا عناصر بین نشین بوده و به طور معمول عناصر واسطه را در بر نمی گیرند. دسته دیگری از عناصر آلیاژی باعث کاهش دمای استحاله مزبور می گردند و به عنوان عناصر پایدار کننده فاز β شناخته می شوند. این عناصر معمولاً شامل فلزات واسطه و فلزات نجیب می باشند.

در آلیاژهای تیتانیم نواحی تک فاز α و β توسط یک ناحیه دوفازی $\alpha+\beta$ جدا شده اند. پهنای این ناحیه بستگی به نوع عناصر آلیاژی و درصد هر یک از این فازها بستگی به درصد عناصر دارد. بنابراین آلیاژهای تیتانیم به طور کلی به سه دسته α ، β ، و α/β تقسیم بندی می شوند. البته در این رابطه گروه بندی های دیگری نیز ارائه شده است. برای مثال در یکی از این گروه بندی ها، آلیاژهای تیتانیم به پنج گروه شامل آلیاژهای α ، نزدیک به α ، آلیاژهای $\alpha+\beta$ ، نزدیک به β و β تقسیم شده اند [۴ و ۱۰]. جدول ۲-۳ تعدادی از معروفترین آلیاژهای تیتانیم و دمای استحاله آنها را نشان می دهد.

جدول ۲-۳: دمای استحاله در تعدادی از آلیاژهای تیتانیم [۵].

آلیاژ	دمای استحاله ($\pm 10^\circ\text{C}$)
آلیاژهای α و نزدیک α	
Ti-5Al-2.5Sn	۱۰۵۰
Ti-8 Al-1Mo-1V	۱۰۴۰
Ti-2.5Cu (IMI230)	۸۹۵
Ti-6 Al-5 Zr-0.5 Mo-0.25i(IMI685)	۱۰۲۰
Ti-5.5Al-3.5 Sn-3 Zr-1Nb-0.3 Mo-0.35i (IMI829)	۱۰۱۵
Ti-5.8Al- 4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.33Si (IMI834)	۱۰۴۵
آلیاژهای (α - β)	
Ti- 6Al- 4V	۱۰۰۰
Ti- 6Al- 7Nb (IMI550)	۱۰۱۰
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI550)	۹۷۵
Ti- 4Al- 4Mo- 4Sn- 0.5 Si (IMI551)	۱۰۵۰
Ti- 5Al- 2S- 2Zr- 4Mo- 4Cr (Ti- 17)	۹۰۰
آلیاژهای β و نزدیک β	
Ti- 13V- 11Cr- 3Al	۷۲۰
Ti- 11.5Mo- 6Zr- 4.5 Sn(BetaIII)	۷۶۰
Ti- 3Al- 8V- 6Cr- 4Zr- 4Mo (Beta C)	۷۹۵
Ti- 10V- 2Fe- 3Al	۸۰۵
Ti- 15V- 3Al- 3Cr- 3Sn	۷۰۶

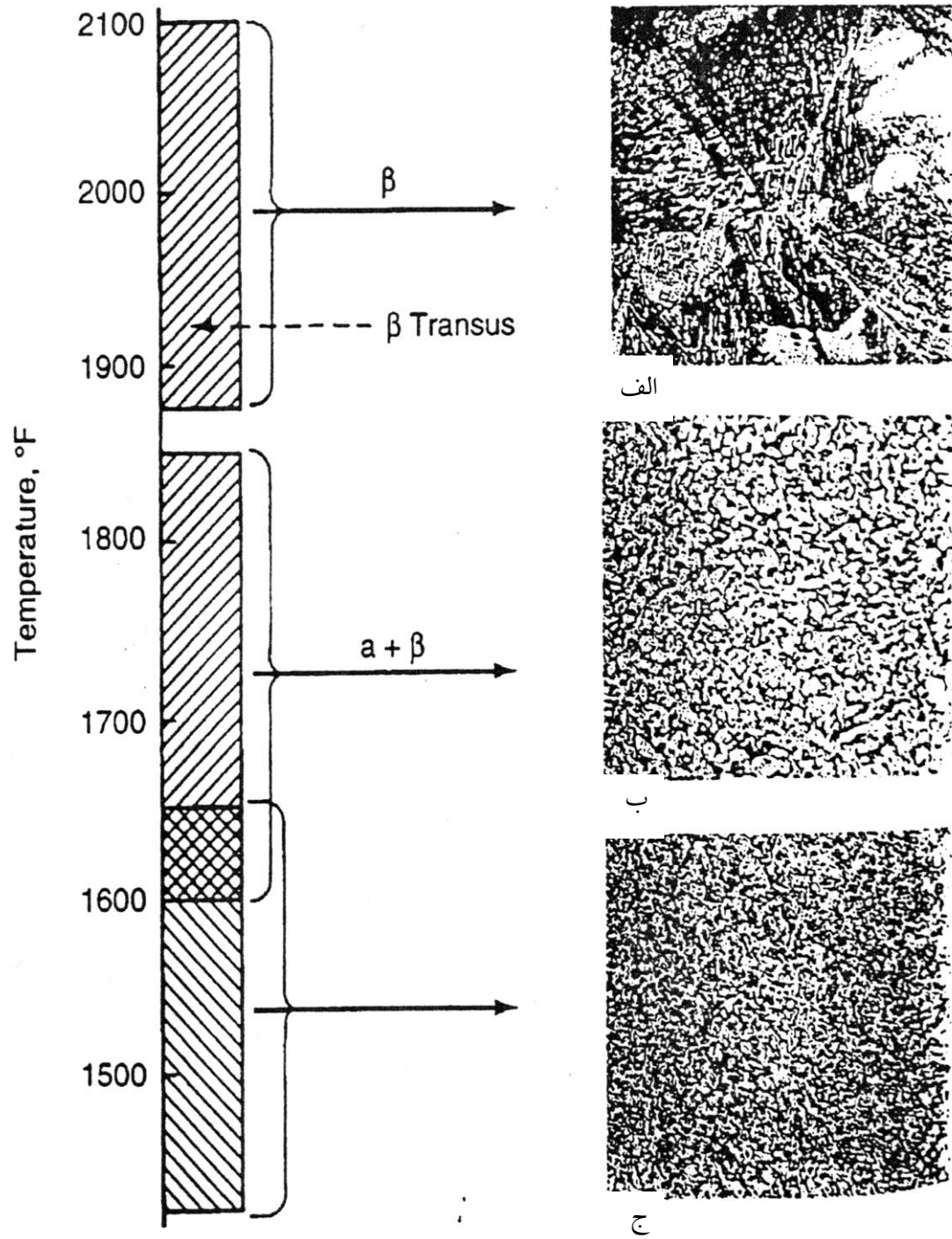
۲-۲-۱- آلیاژهای گروه آلفا

تیتانیوم خالص و آلیاژهایی از آن که حاوی پایدارکننده های فاز آلفا مانند Sn، Al و Ga به صورت تکی (مثل Ti-Al) و یا چندتایی (برای مثال Ti-5Al-2.5Sn) هستند در دماهای معمول به صورت هگزاگونال فشرده (HCP) بوده و به عنوان آلیاژهای آلفا شناخته می‌شوند. ساختار میکروسکوپی آلیاژهای آلفا در دماهای پایین (مثلاً زیر 800°C) حاوی فاز α است و بنابراین در حالت کلی خواص آنها را نمی‌توان توسط عملیات حرارتی بهبود بخشید و تنها مکانیزم استحکام بخشی در این آلیاژها کارسرد، کارسرد همراه با آنیل برای کنترل اندازه دانه های α و افزودن عناصر محلول برای استحکام بخشی محلول جامد است [۸ و ۱۱]. این گروه نسبت به تیتانیوم خالص از استحکام بالاتر و مقاومت خوردگی کمتری برخوردار است. از مشخصات دیگر این نوع آلیاژها، چقرمگی، مقاومت خزشی و قابلیت جوشکاری مناسب است. همچنین عدم انتقال نرمی-تردی، این نوع آلیاژها را برای کاربردهای سرمایی^۱ مایع مناسب می‌سازد. استحکام کم این آلیاژها در دماهای پایین کاربرد آنها را به عنوان مواد پزشکی با محدودیت همراه کرده است [۱۲]. در آلیاژهای نزدیک α به خاطر وجود مقدار کمی فاز β امکان انجام عملیات حرارتی وجود دارد. در این گروه با توجه به دمای فرآیند و نحوه سرد کردن ساختارهای متفاوت با خواص مختلف به دست می‌آید. اگر فرآیند حرارتی در منطقه $\alpha+\beta$ باشد، ریزساختار حاصل از آنیل دانه های کروی α است. در صورتی که دمای فرآیند حرارتی بالاتر از دمای استحاله باشد، ریزساختار بعد از آنیل، ساختار سوزنی بتای استحاله یافته^۲ می‌باشد. اگر سرعت سرد شدن کم باشد، محصولات استحاله بشقاب های^۳ α هم راستا شده است که از خواص خزشی خوبی برخوردارند. اگر سرعت سرد کردن بیشتر باشد، ساختارهای سوزنی^۴، ویدمن اشتاتن^۵ و حصیری^۶ به وجود می‌آید که از خواص خستگی خوبی برخوردار هستند. شکل ۲-۳ ریزساختارهای مختلف آلیاژهای گروه α را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- آلیاژهای گروه بتا

آلیاژهای گروه بتای تیتانیوم شامل یک یا چند عنصر پایدارکننده فاز β نظیر Fe, Cr, Mo, V هستند. این آلیاژها ترکیبی از استحکام بالا، چگالی پایین و مقاومت عالی به خوردگی را ارائه می‌کنند. علاوه بر این از قابلیت بالای سختی پذیری، عملیات حرارتی و شکل پذیری در حالت سرد و گرم برخوردار هستند. ترکیب

۱-Cerogenic
 ۲-transformed beta
 ۳-Platelet
 ۴-acicular
 ۵-Widmanstätten
 ۶-Basket-Weave



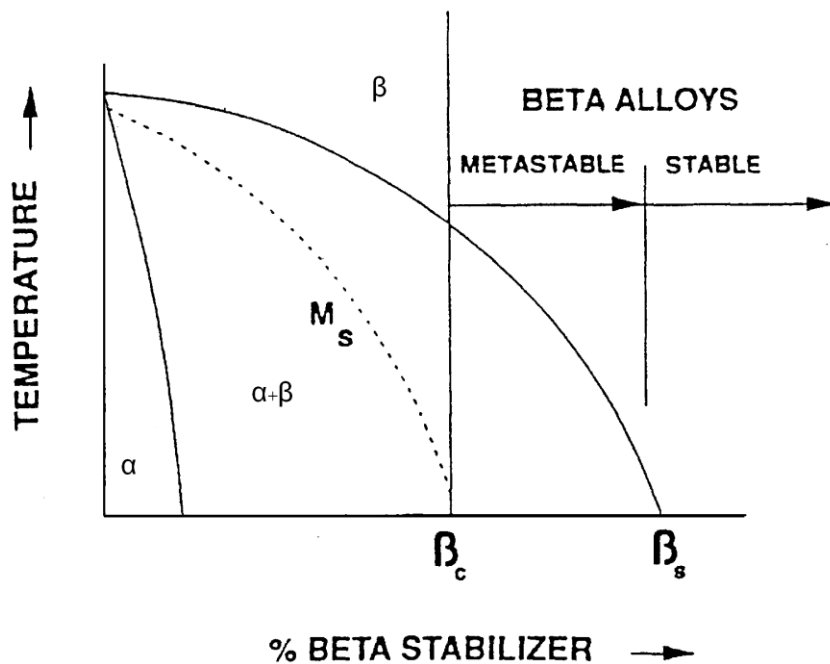
شکل ۲-۳: ریز ساختارهای مختلف آلیاژهای گروه α [۵].

الف) عملیات حرارتی شده در منطقه β

ب) عملیات حرارتی شده در منطقه $\alpha + \beta$

ج) آنیل شده در منطقه تک فازی α

شیمیائی آلیاژهای β مطابق شکل ۲-۴ بالای خط β_c قرار می‌گیرد. این مقدار از عناصر پایدارکننده β کمترین مقدار لازم برای ممانعت از تشکیل مارتنزیت در حین سرد شدن سریع از منطقه β تا دمای محیط است. آلیاژهایی که ترکیب شیمیائی آنها بین خطوط β_c و β_s قرار می‌گیرد از قابلیت رسوب فاز ثانویه در حین عملیات پیرسازی برخوردار هستند و به عنوان آلیاژهای β شبه پایدار^۱ شناخته می‌شوند [۱۲-۱۴]. این امر امکان اصلاح خواص مکانیکی آنها را توسط یک عملیات حرارتی دو مرحله ای فراهم می‌کند. در مرحله اول معمولاً عملیات آنیل انحلالی بالاتر از دمای استحاله (T_β) و یا کمی پایین‌تر از آن انجام می‌شود. استحکام کششی این آلیاژها را می‌توان توسط عملیات پیرسازی در دماهای متوسط ($350-500^\circ\text{C}$) در نتیجه رسوب فاز آلفای سوزنی ریز در زمینه β تا حدود 1800 MPa افزایش داد [۱۵]. پارامترهای ریزساختاری اصلی در آلیاژهای β شبه پایدار، اندازه دانه های β و اندازه و توزیع رسوبات فاز α است. صرفنظر از فاز α ، رسوبات انتقالی β یا ω و ترکیبات بین فلزی نیز در آلیاژهای β شبه پایدار با توجه به ترکیب شیمیائی، عملیات حرارتی، تاریخچه فرآیندهای قبلی و شرایط کاری می‌تواند مشاهده شود. آلیاژهای β تیتانیوم که ترکیب شیمیائی آنها بالاتر از خط β_s قرار داشته باشد به عنوان آلیاژهای پایدار^۲ شناخته می‌شوند که در حین عملیات حرارتی هیچ گونه رسوبی تولید نمی‌کنند [۱۲].



شکل ۲-۴: منحنی تعادلی فازی تعدادی از آلیاژهای تیتانیوم [۱۱].

۱-metastable beta alloys

۲-stable beta alloys

ترکیب شیمیائی آلیاژهای α/β به گونه‌ای است که در حالت تعادلی و در دمای محیط شامل مخلوطی از فازهای α و β هستند. هر چند افزودن یک عنصر پایدارکننده فاز β می‌تواند یک آلیاژ دوتایی به وجود آورد که در حالت تعادل ترمودینامیکی دوفازی باشد، اما در عمل اکثر آلیاژهای α/β شامل مقادیری از هر دو پایدارکننده های α و β هستند [۳].

با استفاده از عملیات حرارتی مختلف می‌توان ریزساختارهای متنوعی را در آلیاژهای α/β تیتانیم ایجاد کرد. هنگامی که یک آلیاژ α/β تیتانیم به مدت کافی در دماهایی بالاتر از دمای استحاله فاز β قرار گیرد رشد سریع دانه های β رخ می‌دهد. سرد کردن آرام آلیاژ از منطقه فازی β منجر به تشکیل ریزساختاری شامل کلنی‌های درشت α به همراه فاز α در مرز دانه های β اولیه می‌گردد. با افزایش نرخ سرد شدن، لایه‌ها ریزتر شده و ریزساختار از کلنی های α به ویدمن اشتاتن یا حصیری تغییر پیدا می‌کند (شکل ۲-۵-الف)). در سرعت-های سرد کردن بسیار بالا، استحاله مارتنزیتی فاز β با رسیدن دمای آلیاژ به زیر دمای تشکیل مارتنزیت (M_s) اتفاق می‌افتد. دمای M_s با افزایش مقدار عناصر پایدارکننده فاز β کاهش می‌یابد و فاز β می‌تواند در دماهای پائین نیز به صورت شبه پایدار باقی بماند. نرخ سرد شدن لازم برای وقوع استحاله مارتنزیتی نیز با افزایش عناصر پایدارکننده β کاهش می‌یابد.

تأثیر فرآیندهای ترمومکانیکال نیز بر ریزساختار آلیاژهای α/β تیتانیم مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸-۱۶]. اگر یک آلیاژ α/β در منطقه دوفازی $\alpha+\beta$ تحت عملیات فورجینگ قرار گیرد و سپس در زیر دمای استحاله فاز β آنیل شود فاز α می‌تواند بسته به میزان تغییر شکل دچار تبلور مجدد و کرووی شدن شده و باعث تشکیل ریزساختار بی‌مدال^۱ شود (شکل ۲-۵-ب)). معمولاً مقدار بیشتر تغییر شکل باعث افزایش مقدار تبلور مجدد و کرووی شدن می‌گردد. دمای تبلور مجدد و نرخ سرد شدن نیز بر روی ریزساختار نهائی موثر است. معمولاً در دماهای بالاتر تبلور مجدد، درصد α هم محور کمتر است و مقدار بیشتری β استحاله یافته تولید می‌شود. در مقابل، نرخ پائین تر سرد شدن از دمای تبلور مجدد نسبت دانه های هم محور α به ساختار لایه ای α را افزایش می‌دهد [۱۹].

آلیاژهای α/β تیتانیم از مقاومت خوردگی، استحکام خستگی، چقرمگی و جوش پذیری بالائی برخوردار بوده و امروزه به طور وسیعی در کاربردهای صنعتی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال در این گروه می‌توان آلیاژ $Ti6Al4V$ را نام برد که در میان آلیاژهای تیتانیم بیشترین حجم مصرف را به ویژه در کاربردهای پزشکی به خود اختصاص داده است [۱۴].