دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

تاثیر ریزساختار و مورفولوژی فازی بر رفتار خوردگی مقاطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V ایجاد شده با فرایندهای جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و اصطکاکی اغتشاشی

رساله دکترا مهندسی مواد

مسعود عطاپور

استاد راهنما :
دکتر محمد حسین فتحی
دکتر مرتضی شمعانیان

۱۳۹۰

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تاثیر ریزساختار و مورفولوژی فازی بر مکانیزم و رفتار خوردگی مقاطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V ایجاد شده با جوشکاری قوسی تنگستن گاز و اصطکاکی اغتشاشی است. برای این منظور، رفتار خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V پس از جوشکاری قوسی تنگستن گاز و اصطکاکی اغتشاشی در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد در شرایط غیر هوازی و دمای محیط مطالعه شد. در این راستا، و با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات کافی درباره تاثیر ریزساختار و مورفولوژی فازی بر رفتار خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V، در ابتدا به ارزیابی رفتار خوردگی ریزساختارهای متداول لایه‌ای کامل، هم‌محور کامل و بی‌مدال در دو محلول کلرید سدیم ۰٫۹ درصد و اسید کلریدریک ۵ درصد پرداخته شد. ریزساختارهای لایه‌ای کامل، بی‌مدال دارای ۱۰ تا ۲۰ درصد فاز آلفای هم‌محور، بی‌مدال دارای ۴۰ تا ۵۰ درصد فاز آلفای هم‌محور و هم‌محور کامل از طریق عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی بدست آمد. نتایج مطالعات پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد که همه ریزساختارها دارای رفتار رویین خودبه‌خودی در محلول ۰٫۹ درصد کلرید سدیم و رفتار فعال - رویین در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد هستند. با وجود آن‌که آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نرخ خوردگی را نشان نداد، آزمون‌های غوطه‌وری کاهش وزن نشان داد که ریزساختار لایه‌ای کامل بیشترین کاهش وزن را دارد. این موضوع با استفاده از ارزیابی سطح نمونه‌های مختلف، پس از ۵۰ ساعت غوطه‌وری در محلول ۵ مولار اسید کلریدریک در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. این امر به گسترش برهم‌کنش‌های گالوانیکی و توسعه مرزهای بین‌فازی آلفا/بتا نسبت داده شد. نتایج نشان داد کسر حجمی فازهای آلفا و بتا، چینش اجزای ریزساختاری و توزیع عناصر آلیاژی بین فازهای آلفا و بتا، مهم‌ترین جنبه‌های ریزساختاری اثرگذار بر رفتار خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V است. هم‌چنین مرزهای بین‌فازی آلفا/بتا و فاز بتا به عنوان مراکز ترجیحی خوردگی مشخص شد. با توجه به مشخص‌تر بودن تفاوت رفتار خوردگی ریزساختارهای مختلف در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد، ارزیابی رفتار خوردگی مناطق جوش در این محلول مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد که با وجود رفتار مشابه فعال - رویین فلز جوش و فلز پایه، چگالی جریان خوردگی فلز جوش بیشتر از فلز پایه است. این موضوع بوسیله آزمون‌های غوطه‌وری در محلول اسید کلریدریک ۵ مولار تایید شد. حضور ریزساختار سوزنی، تخلخل و دانه‌های درشت بتا در فلز جوش نمونه جوشکاری قوسی تنگستن گاز باعث افزایش نرخ خوردگی آن نسبت به فلز پایه شد. در مقابل، حضور ساختار آلفای ثانویه در بتای استحاله یافته در منطقه متاثر از حرارت باعث بهبود رفتار خوردگی این ناحیه شد. در ادامه، ریزساختارهای بدست آمده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در دو شرایط پایین‌تر و بالاتر از دمای دگرگونی بتا بررسی شد. همه ریزساختارها رفتار فعال - رویین در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد ارایه کردند؛ اما نمونه عملیات شده در پایین‌تر از دمای دگرگونی بتا بیشترین نرخ خوردگی را نشان داد. این موضوع با استفاده از بررسی سطح نمونه‌های مختلف، پس از ۵۰ ساعت غوطه‌وری در محلول ۵ مولار اسید کلریدریک در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید شد. در این شرایط، فاز آلفای غنی از وانادیوم بصورت ترجیحی مورد تهاجم خوردگی قرار گرفت. اندازه دانه، ریزساختار و توزیع عناصر آلیاژی مهم‌ترین جنبه‌های ریزساختاری مؤثر بر رفتار خوردگی مناطق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده تعیین شد. در این پژوهش ضمن بررسی مکانیزم‌های مقاومت خوردگی ریزساختارهای مختلف، رفتار خوردگی منطقه متاثر از حرارت و منطقه گذرای بدست آمده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مطالعه شد.

کلمات کلیدی: آلیاژ Ti-6Al-4V، رفتار خوردگی، ریزساختار، جوشکاری قوسی تنگستن گاز، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی .

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
فصل دوم: مطالعات مروری	
۲-۱- مقدمه	۶
۲-۲- تاریخچه تیتانیوم	۷
۲-۳- خواص تیتانیوم و آلیاژهای آن	۷
۲-۴- کاربردهای تیتانیوم آلیاژهای آن	۸
۲-۵- متالورژی فیزیکی آلیاژهای تیتانیوم	۱۰
۲-۶- انواع آلیاژهای تیتانیوم	۱۲
۲-۶-۱- آلیاژهای آلفا	۱۲
۲-۶-۲- آلیاژهای بتا	۱۳
۲-۶-۳- آلیاژهای آلفا + بتا	۱۳
۲-۶-۴ - آلیاژ Ti-6Al-4V	۱۳
۲-۷- ریزساختار آلیاژهای تیتانیوم	۱۴
۲-۷ -۱- ریزساختار لایه‌ای کامل	۱۵
۲-۷ -۲- ریزساختار هم‌محور	۱۸
۲-۷ -۳- ریزساختار بی‌مدال	۲۰
۲-۸- جوشکاری قوسی تنگستن گاز	۲۲
۲-۸-۱- متالورژی جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم	۲۳
۲-۸-۲- عیوب منطقه جوش	۲۵
۲-۹- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۲۵
۲-۹-۱- فرایند اصطکاکی اغتشاشی	۲۸
۲-۹-۲- جوشکاری (فرایند) اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای تیتانیوم	۲۸
۲-۹-۳- ابزار مورد استفاده	۳۰
۲-۱۰- رفتار خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای آن	۳۱

۲-۱۰-۱- تاثیر ریزساختار بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیوم ۳۲
۲-۱۰-۲- خوردگی منطقه جوش آلیاژهای تیتانیوم ۳۳
۲-۱۰-۳- تاثیر عملیات اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیوم ۳۴
۲-۱۱- اهداف و اهمیت پژوهش حاضر ۳۵

فصل سوم: مواد و روش تحقیق

۳-۱- مواد مصرفی ۳۷
۳-۱-۱- آلیاژ Ti-6Al-4V مورد استفاده در عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی ۳۷
۳-۱-۲- آلیاژ Ti-6Al-4V ریختگی دقیق و پرس گرم ایزواستاتیک شده ۳۷
۳-۱-۳- آلیاژ Ti-6Al-4V آنیل شده ۳۸
۳-۱-۴- الکترولیت‌ها ۳۸
۳-۲- عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی ۳۸
۳-۳- عملیات جوشکاری ۳۹
۳-۳-۱- جوشکاری قوسی تنگستن گاز ۳۹
۳-۳-۱- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۴۱
۳-۴- مشخصه‌یابی ۴۳
۳-۴-۱- متالوگرافی ۴۳
۳-۴-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی ۴۳
۳-۵- ارزیابی و سنجش رفتار خوردگی ۴۴
۳-۵-۱- آماده سازی نمونه‌ها ۴۴
۳-۵-۲- آزمون پتانسیل مدار باز ۴۴
۳-۵-۳- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ۴۵
۳-۵-۴- سل مورد استفاده ۴۵
۳-۵-۴ آزمون غوطه‌وری ۴۶

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- ریزساختارهای بدست آمده از عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی ۴۷
۴-۲-۱- ریزساختار لایه‌ای کامل ۴۸

۴-۲-۲- ریزساختارهای بی‌مدال ۴۹
۴-۲-۳- ریزساختار هم‌محور کامل ۵۰
۴-۳- تاثیر عملیات جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بر ریزساختار آلیاژ Ti-6Al-4V ۵۱
۴-۳-۱- منطقه جوش (WM) ۵۱
۴-۳-۲- منطقه متاثر از حرارت (HAZ) ۵۵
۴-۳-۳- تاثیر ریزساختار اولیه فلز پایه ۵۷
۴-۴- تاثیر عملیات اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار آلیاژ Ti-6Al-4V ۶۰
۴-۴-۱- منطقه اغتشاشی (SZ) ۶۲
۴-۴-۲- منطقه گذرا ۶۴
۴-۴-۳- منطقه متاثر از حرارت ۶۵
۴-۴-۳- تاثیر ریزساختار فلز پایه ۶۷
۴-۵- رفتار خوردگی ریزساختارهای بدست آمده از عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی ۶۷
۴-۵-۱- مطالعه رفتار الکتروشیمیایی ریزساختارهای مختلف در محلول ۰/۹ درصد کلرید سدیم ۶۸
۴-۵-۲- مطالعه رفتار الکتروشیمیایی ریزساختارهای مختلف در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد ۷۱
۴-۵-۳- مطالعه رفتار خوردگی ریزساختارهای مختلف از طریق آزمون غوطه‌وری ۷۶
۴-۵-۴- ارزیابی مکانیزم‌های خوردگی ریزساختارهای مختلف ۷۶
۴-۶- رفتار خوردگی منطقه جوش قوسی تنگستن گاز ۸۱
۴-۶-۱- مطالعه رفتار خوردگی منطقه جوش قوسی تنگستن-گاز در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد ۸۱
۴-۶-۲- ارتباط جنبه‌های مختلف ریزساختاری با رفتار خوردگی منطقه جوش ۸۴
۴-۷- رفتار خوردگی منطقه اصطکاکی اغتشاشی شده ۸۸
۴-۷-۱- مطالعه رفتار خوردگی منطقه اصطکاکی اغتشاشی شده در محلول اسید کلریدریک ۵ درصد ۸۹
۴-۷-۲- مطالعه مکانیزم مقاومت خوردگی ریزساختارهای عملیات اصطکاکی اغتشاشی ۹۱
۴-۷-۳- مطالعه رفتار خوردگی منطقه متاثر از حرارت ۹۴
۴-۷-۴- مطالعه رفتار خوردگی منطقه گذرا ۹۵
۴-۷-۵- مطالعه رفتار خوردگی منطقه اغتشاشی ۹۷
فصل پنجم: نتیجه‌گیری ۱۰۱
مراجع ۱۰۴

فصل اول

مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم با دارابودن نسبت استحکام به وزن بالا، از اوایل دهه ۱۹۵۰ در کاربردهای هوافضا توسعه پیدا کرده است. هم‌چنان‌که آلیاژهای تیتانیوم هم‌اکنون نیز به عنوان ماده حیاتی صنایع هوافضا به‌شمار می‌آیند، مقاومت خوردگی آن‌ها در بسیاری از محیط‌های خورنده، منجر به گسترش کاربرد آن‌ها در صنایع غیرهوافضا شده است. به تدریج و با کاهش قیمت و در دسترس قرار گرفتن محصولات ساخته شده از آلیاژهای تیتانیوم، این مواد به مواد مهندسی استاندارد برای بسیاری از کاربردهای صنعتی تبدیل شده است. امروزه با توجه به جاذبه‌های گسترده آلیاژهای تیتانیوم، ارزیابی جنبه‌های مختلف این آلیاژها به عنوان زمینه مورد علاقه در بسیاری از تحقیقات دانشگاهی و صنعتی مطرح شده است.

در این میان، آلیاژهای دو فازی آلفا + بتای تیتانیوم بیشترین کاربردها را به خود اختصاص داده‌اند؛ به طوری‌که در ساخت اجزای موتور جت، بدنه دوچرخه، کاشتنی‌های اورتوپدی و دندانی، چوگان گلف و وسایل تزیینی استفاده می‌شوند. آلیاژ Ti-6Al-4V به عنوان پرکاربردترین آلیاژ دو فازی تیتانیوم است که بیش از ۵۰ درصد کاربردهای مختلف را به خود اختصاص داده است [۱].

یکی از مهم‌ترین مشخصات آلیاژهای دوفازی تیتانیوم، دارا بودن گستره وسیعی از ریزساختارها است که برحسب عملیات حرارتی و عملیات ترمومکانیکی اجرا شده روی آن‌ها، قابل دستیابی است. به‌طور کلی این ریزساختارها به سه گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از : (۱) ریزساختار لایه‌ای کامل[1]، (۲) ریزساختار هم‌محور کامل[2] و (۳) ریزساختار بی‌مدال[3] [۱]. این ریزساختارها دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی مخصوص به خود هستند.

---

[1] Fully lamelar
[2] Fully equiaxed
[3] Bimodal

عملیات جوشکاری نیز یکی از فرایندهای ساخت قابل اجرا روی آلیاژهای دوفازی تیتانیوم است که منجر به تغییر شدید ریزساختار می‌گردد. عملیات جوشکاری قوسی تنگستن - گاز[۴] که به عنوان یک فرایند جوشکاری ذوبی شناخته می‌شود، متداول‌ترین فرایند جوشکاری برای آلیاژهای تیتانیوم است [۲]. با وجود این، استفاده از این روش برای آلیاژهای تیتانیوم با مشکلات متعددی مانند درشت شدن دانه‌های بتا، ایجاد مورفولوژی ستونی در فلز جوش و ناحیه متاثر از حرارت، تخلخل و جذب گازهای اکسیژن، هیدروژن و نیتروژن در فلز جوش همراه است [۳]. با توجه به این مشکلات، امروزه استفاده از فرایندهای جوشکاری حالت جامد مانند فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[۵] زمینه تحقیقاتی مورد علاقه بسیاری از مراکز دانشگاهی، تحقیقاتی و صنعتی مرتبط با تیتانیوم شده است. مقاومت خوردگی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های انتخاب ماده در صنایع مختلف است. هم‌چنین با توجه به ارتباط تنگاتنگ سازگاری زیستی آلیاژهای تیتانیوم با مشخصات خوردگی آن‌ها در محیط بدن انسان، پرداختن به این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر امروزه با افزایش گستره کاربرد تیتانیوم و آلیاژهای آن در شرایط کاری سخت‌تر، ارزیابی رفتار خوردگی آن‌ها در محیط‌های با قدرت خورندگی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع به ویژه در مورد منطقه جوش که دچار تغییرات زیاد ریزساختاری و ترکیب شیمیایی شده مهم‌تر به نظر می‌رسد.

بررسی مقالات و مطالب منتشر شده در چند دهه اخیر نشان می‌دهد که تحقیقات صورت گرفته پیرامون آلیاژهای تیتانیوم عمدتا دو هدف مهم را دنبال کرده است :

الف- شناخت ارتباط بین فرایندهای ترمومکانیکی، ریزساختار و خواص مکانیکی. در این بخش، بررسی تاثیر عواملی مانند نرخ سرمایش، اندازه کولونی‌ها و گام لغزش[۶] از اهمیت بیشتری در تحقیقات برخوردار بوده است [۴].

ب- ارزیابی رفتار خوردگی در محیط‌های شبیه‌سازی شده بدن انسان. در این بخش تمرکز تحقیقات بر مقایسه آلیاژهای مختلف از منظر مقاومت خوردگی، مشخصات لایه رویین و مکانیزم رویین شدن قرار داشته است [۵]. امروزه دستاورد مهم این تحقیقات، توسعه آلیاژهای بتای تیتانیوم به عنوان کاشتنی فلزی در بدن انسان است که هم‌چنان توجه پژوهش‌گران در زمینه‌های مختلف، مانند مهندسی مواد زیستی و پزشکی را به خود معطوف کرده است [۶].

بر این اساس، با وجود تحقیقات فراوان در زمینه مطالعه خواص مکانیکی آلیاژهای تیتانیوم و مقایسه رفتار خوردگی آلیاژهای مختلف تیتانیوم با هدف ارتقاء سازگاری زیستی، هنوز مطالعات جامع و کاملی در رابطه با

---

[4] Gas tungsten arc welding (GTAW)
[5] Friction stir welding (FSW)
[6] Slip length

تاثیر ریزساختار و مورفولوژی فازی بر رفتار خوردگی آلیاژهای دوفازی تیتانیوم، به عنوان پرکاربردترین آلیاژها ارایه نشده است. این مطلب در مورد یافتن مکانیزم یا مکانیزم‌های خوردگی به صورت جدی‌تر مطرح است و برخی نتایج منتشر شده در این راستا غیرهماهنگ و بعضاً متناقض است [۷و۸].

علاوه بر این، در زمینه جوشکاری قوسی تنگستن - گازآلیاژهای تیتانیوم، پژوهش‌های صورت گرفته دو هدف عمده زیر را مورد توجه قرار داده است :

الف- شناسایی ریزساختار و ارتباط آن با خواص مکانیکی مقاطع جوش. در این مطالعات به وجود رشد رونشستی، ساختار درشت ستونی و تخلخل در منطقه جوش و ارتباط آن‌ها با خواص مکانیکی پرداخته شده است [۹].

ب- توسعه روش‌های بهبود ریزساختار فلز جوش با تحت تاثیر قرار دادن فرایندهای جوانه‌زنی و رشد و یافتن شرایط بهینه از نظر تکنیکی و متالورژیکی. در این زمینه بیشتر تحقیقات معطوف به استفاده از جریان ضربانی [۲] و مواد جوانه‌زا مانند ایتریوم [۱۰] بوده است.

مطالعاتی نیز درباره تاثیر فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز بر رفتار خوردگی آلیاژهای دوفازی تیتانیوم صورت گرفته، که توجه اصلی آن‌ها به مقایسه رفتار خوردگی فلز جوش و فلز پایه و همچنین نقش متغیرهای فرایند اختصاص یافته است [۱۱]. بر این اساس، در کنار مطالعات محدود صورت گرفته پیرامون رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژهای تیتانیوم، یافتن مکانیزم خوردگی حاکم بر مناطق مختلف جوش پس از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز چندان مطرح نبوده و گزارش‌های مستند در این زمینه ارایه نشده است.

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای تیتانیوم به عنوان یک فرایند جوشکاری حالت جامد در دهه اخیر مطرح شده و در مرحله تحقیق و توسعه قرار گرفته است. این فرایند با توجه به افزایش بهره‌وری، کاهش خطرات زیست محیطی و انعطاف‌پذیری بیشتر، جزء فن‌آوری‌های نو در نظر گرفته می‌شود. طراحی و انتخاب ماده برای ساخت ابزار استفاده شده در این روش مهم‌ترین موانع مطرح شده در گسترش فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای تیتانیوم است. ارزیابی گزارش‌های منتشر شده در مجلات و محافل علمی طی چند سال اخیر نشان می‌دهد که بیشتر تلاش‌های صورت گرفته به ارزیابی‌های ریزساختاری، شناخت خواص مکانیکی و بررسی بافت[۷] توسعه یافته در منطقه جوش تمرکز یافته است [۱۲و۱۳]. در زمینه تاثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیوم گزارشی ارایه نشده است.

در پژوهش حاضر سعی شده است تا جهت برآورده شدن دو هدف؛ شناخت تاثیر فرایندهای جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V از یک‌سو و یافتن مکانیزم خوردگی

[1] Texture

ریزساختارها و موفولوژی‌های فازی مختلف از سوی دیگر تلاش شود. در این راستا، مطالعات اولیه بر اساس ریزساختارهای متداول آلیاژ Ti-6Al-4V، که از طریق عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی بدست آمده، انجام شده و از نتایج به‌دست آمده به عنوان مبنای مطالعات بعدی بهره گرفته شده است. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند در انتخاب و شناسایی ریزساختارهای مناسب جهت کاربرد در صنایع مختلف هوافضا، شیمیایی، بیومواد و ورزشی بر حسب محیط مورد استفاده کمک کند. هم‌چنین شناخت مکانیزم خوردگی حاکم بر ریزساختارهای مختلف آلیاژ Ti-6Al-4V می‌تواند به عنوان شاخصی جهت توسعه گستره کاربردی این آلیاژ به کار رود. علاوه بر این، پژوهش حاضر در مسیر تحقیق و توسعه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای تیتانیوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و ضمن شناساندن مکانیزم خوردگی ریزساختارهای بدست آمده از این فرایند، می‌تواند به چالش مهم تاثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیوم پاسخ دهد. هم-چنین مقایسه رفتار خوردگی ساختارهای بدست آمده از فرایندهای جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند در انتخاب نوع فرایند جوشکاری جهت اتصال اجزای سازه‌های مختلف، بر حسب شرایط کاری کمک کند.

در تحقیق حاضر، پس از مروری بر تاریخچه، متالورژی فیزیکی و ریزساختارهای مختلف آلیاژهای تیتانیوم به معرفی روش‌های جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده و رفتارخوردگی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه ضمن معرفی مواد و روش تحقیق، رفتار خوردگی ریزساختارهای مختلف بدست آمده از عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی در شرایط شبیه‌سازی شده بدن انسان و هم‌چنین در یک محیط با قدرت خورندگی شدیدتر (اسید کلریدریک) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش پایانی فصل نتایج و بحث، رفتار خوردگی مقاطع جوش بدست آمده از روش‌های جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و اصطکاکی اغتشاشی ارزیابی شده و مکانیزم خوردگی آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

فصل دوم

مطالعات مروری

۲-۱- مقدمه

امروزه زمینه‌های تحقیقاتی مرتبط با تیتانیوم و آلیاژهای آن مورد علاقه بسیاری از مراکز دانشگاهی، تحقیقاتی و صنعتی گردیده است. علت اصلی این روند، استحکام بالا، چگالی کم و مقاومت خوردگی خوب تیتانیوم و آلیاژهای آن است که موجب گسترش روزافزون آن‌ها در صنایع مختلف هوافضا، بیومواد، شیمیایی، ورزشی و تزیینی شده است. یکی دیگر از دلایلی که باعث جلب توجه محققان به این مواد شده است، امکان دست یافتن به تنوع وسیعی از ریزساختارها و خواص از طریق عملیات حرارتی و فرایندهای ترمومکانیکی می‌باشد. در بین آلیاژهای مختلف تیتانیوم آلیاژ Ti-6Al-4V با دارا بودن پتانسیل و زمینه‌های کاربردی گسترده‌تر اهمیت بیشتری پیدا کرده است.

از طرف دیگر، فرایندهای جوشکاری مانند جوشکاری حالت ذوبی قوسی تنگستن - گاز و همچنین فرایند جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی نیز با تغییر شدید ریزساختار، رفتار مکانیکی و خوردگی منطقه جوش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. یادآوری این نکته نیز مهم است که با توجه به مشکلاتی که در روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز وجود دارد، استفاده از روش‌های جدیدتر مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شتاب گرفته است.

در این فصل ضمن مرور متالورژی فیزیکی تیتانیوم و آلیاژهای آن با تاکید بر آلیاژ دوفازی آلفا + بتای Ti-6Al-4V، گزارشی از برخی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه ارایه خواهد شد. هم‌چنین، فرایندهای جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد بحث قرار گرفته و در پایان به بررسی رفتار خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای آن و عوامل ریزساختاری مرتبط با آن پرداخته شده است.

۲-۲- تاریخچه تیتانیوم

تیتانیوم برای نخستین بار در سال ۱۷۹۱ میلادی توسط یک کانی‌شناس مبتدی بنام ویلیام گرگور[۸] کشف شد. همچنین در سال ۱۷۹۵ میلادی، یک شیمیدان آلمانی بنام کلاپروس[۹] نیز موفق به شناخت اکسید یک فلز ناشناخته شد که مشخصات عنصر کشف شده توسط گرگور را دارا بود. کلاپروس این فلز نوظهور را تیتانیوم نامید که برگرفته از نام تیتان[۱۰] نماد قدرت و استحکام در یک افسانه قدیمی یونانی است. با وجود این، تا سال ۱۹۵۰ که روش کرول[۱۱] برای استخراج تیتانیوم تجاری‌سازی شد، تیتانیوم به صورت محدود استفاده می‌شده است [۱].

تیتانیوم ۰٫۶ درصد پوسته کره زمین را تشکیل می‌دهد و پس از آلومینیوم، آهن و منیزیم فراوان‌ترین فلز به‌شمار می‌رود. این فلز در طبیعت به‌صورت اکسید (روتیل[۱۲]) یا ترکیبی از اکسید و آهن (ایلمنیت[۱۳]) وجود دارد [۱].

۲-۳- خواص تیتانیوم و آلیاژهای آن

خواص مهم تیتانیوم در جدول ۲-۱ ارایه شده و با آهن، نیکل و آلومینیوم به عنوان دیگر فلزات متداول مقایسه شده است. اگر چه تیتانیوم بالاترین نسبت استحکام به چگالی را دارا است اما به علت داشتن قیمت زیاد فقط در برخی از کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. علت اصلی این قیمت زیاد تیتانیوم را می‌توان تمایل بالای آن برای واکنش با اکسیژن عنوان کرد. استفاده از گاز خنثی یا محیط خلاء برای تولید و ذوب کردن تیتانیوم امری اجتناب‌ناپذیر است [۱].

دمای ذوب بسیار بالاتر تیتانیوم در مقایسه با آلومینیوم که به عنوان مهم‌ترین رقیب تیتانیوم برای سازه‌های سبک شناخته می‌شود، باعث توسعه کاربرد تیتانیوم در دماهای بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد شده است. با وجود این، افزایش تمایل تیتانیوم برای واکنش با اکسیژن در دماهای بالاتر، باعث محدود شدن بیشترین دمای کاری آلیاژهای تیتانیوم به حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. بالاتر از این دما نفوذ اکسیژن به داخل فلز شتاب گرفته و باعث ترد شدن آن می‌گردد [۱و۱۴].

نکته مهم دیگر این است که تیتانیوم در مقایسه با دیگر فلزات ساختمانی از مقاومت خوردگی عالی در برخی از محیط‌های خورنده برخوردار است. علت اصلی این رفتار تشکیل لایه اکسیدی چسبنده، محافظ و پیوسته اکسید تیتانیوم روی سطح آن است. عناصر آلیاژی باعث تغییر مقاومت خوردگی آلیاژهای تیتانیوم شده و ترکیب شیمیایی

---

[8] William Gregor
[9] Klaproth
[10] Titan
[11] Kroll
[12] Rutile
[13] Illmenit

لایه اکسیدی محافظ را تغییر می‌دهند [۱۵].

جدول ۲-۱- برخی از مشخصات مهم تیتانیوم در مقایسه با دیگر فلزات ساختمانی متداول [۱].

	تیتانیوم	آهن	نیکل	آلومینیوم
دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۷۰	۱۵۳۸	۱۴۵۵	۶۶۰
دمای دگرگونی فازی (درجه سانتی‌گراد)	۸۸۲	۹۱۲	–	–
ساختار بلوری	BCC →HCP	FCC →BCC	FCC	FCC
مدول یانگ (GPa)	۱۱۵	۲۱۵	۲۰۰	۷۲
استحکام تسلیم (MPa)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
چگالی (g/cm^3)	۴٫۵	۷٫۹	۸٫۹	۲٫۷
مقاومت خوردگی نسبی	خیلی زیاد	کم	متوسط	زیاد
تمایل به واکنش با اکسیژن	خیلی زیاد	کم	کم	زیاد
قیمت نسبی فلز	خیلی زیاد	کم	زیاد	متوسط

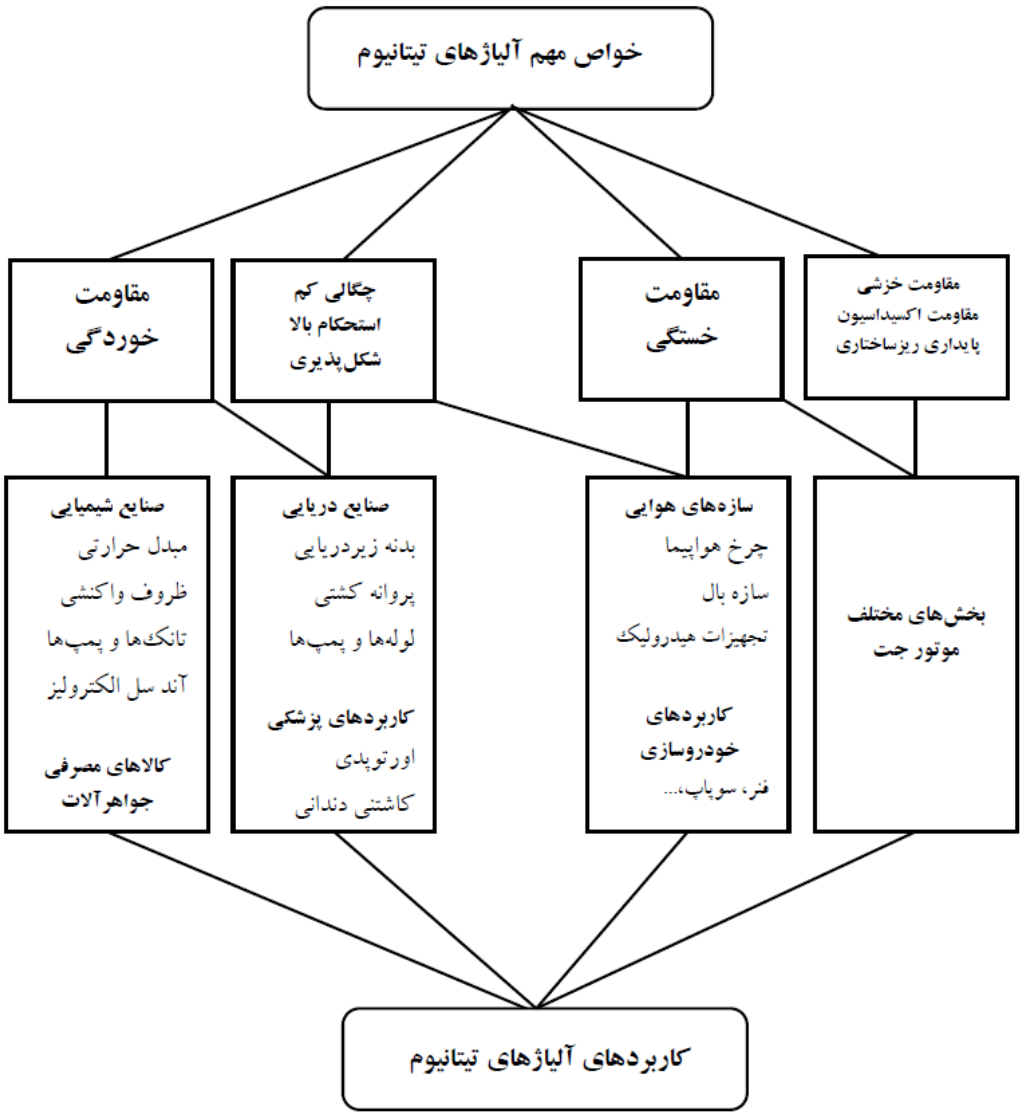
۲-۴- کاربردهای تیتانیوم و آلیاژهای آن

تیتانیوم و آلیاهای آن با دارا بودن مجموعه‌ای از خواص منحصر بفرد مانند استحکام بالا، وزن کم، مقاومت خوردگی خوب، سازگاری زیستی زیاد و شکل‌پذیری مطلوب به عنوان مواد جذاب در بسیاری از کاربردهای هوافضا، نظامی، شیمیایی و بیومواد استفاده می‌شود. در شکل ۲-۱ برخی از این کاربردها بر اساس خواص مهم آلیاژهای تیتانیوم دسته‌بندی شده است [۱۶]. شکل ۲-۲ نیز نمونه‌هایی از کاربردهای آلیاژهای دوفازی تیتانیوم در صنایع مختلف را نشان داده است [۱۷].

در سال‌های اخیر و با افزایش تعداد افراد مسن در کشورهای مختلف، عرضه و تقاضا برای استفاده از تیتانیوم و آلیاژهای آن در ساخت ایمپلنت‌های مورد استفاده در بدن انسان مانند پروتز مفصل ران[۱۴]، تعویض مفاصل[۱۵]، تعویض زانو[۱۶]، تثبیت شکستگی[۱۷]، کاشتنی‌های دندانی[۱۸] بصورت گسترده افزایش یافته است. هم‌چنین تجهیزات پزشکی ساخته شده از تیتانیوم و آلیاژهای در تماس با محیط بدن انسان پایدار می‌مانند [۱۸].

یکی دیگر از زمینه‌های کاربرد تیتانیوم و آلیاژهای آن ساخت وسایل ورزشی مانند چوگان گلف، راکت تنیس، تنه دوچرخه و کفش ورزشی میخ‌دار است. تیتانیوم خالص تجاری در تولید مبدل‌های حرارتی، تقطیرکننده‌ها و برخی تانک‌های ذخیره مواد استفاده می‌شود [۱۶و۱۷].

[14] Hip Joint
[15] Joint replacement
[16] Knee replacement
[17] Fracture fixation
[18] Dental Implants



شکل ۲-۱- مشخصات و کاربردهای آلیاژهای تیتانیوم [۱۶].

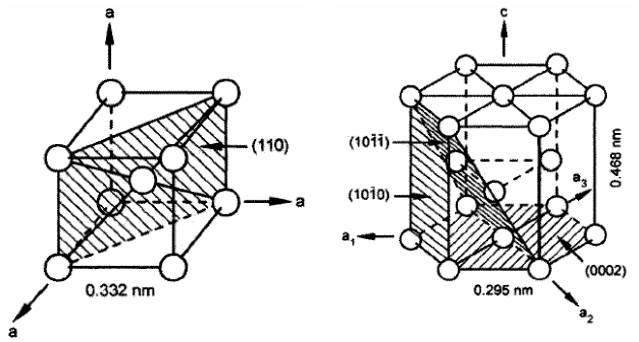
(د) (ج) (ب) (الف)

شکل ۲-۲- نمونه‌هایی از کاربردهای آلیاژهای دوفازی تیتانیوم. (الف) پروتز مفصل ران ساخت شرکت طراحی اپتومک[19]، (ب) بدنه دوچرخه سبک ساخت گروه دوچرخه آمریکا، (ج) جت F-117A ساخت صنایع هوایی آمریکا و (د) چوگان گلف [۱۷].

[19] Optomec Design Co.

۲-۵- متالورژی فیزیکی آلیاژهای تیتانیوم

تیتانیوم یک فلز چندشکلی است که دارای یک دگرگونی فازی دگرواره‌ای[۲۰] در دمای ۸۸۲ درجه سانتی‌گراد است. این فلز در دماهای پایین‌تر از ۸۸۲ درجه سانتی‌گراد به صورت منشور شش‌گوش فشرده[۲۱] است که فاز آلفا نامیده می‌شود. در دمای ۸۸۲ درجه سانتی‌گراد تیتانیوم از حالت منشور شش‌گوش فشرده به ساختار مکعبی مرکزپر[۲۲] تبدیل شده که فاز بتا نامیده می‌شود و تا دمای ذوب شدن پایدار می‌ماند. سلول واحد فازهای آلفا و بتا در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. دمای دگرگونی فازی آلفا/بتا که دمای دگرگونی بتا[۲۳] نامیده می‌شود، به شدت تحت تاثیر درجه خلوص آلیاژ قرار دارد. بر این اساس، دمای دگرگونی فازی تابعی از نوع و غلظت عناصر آلیاژی جانشینی و بین‌نشینی موجود در آلیاژ است. آلومینیوم، اکسیژن، نیتروژن و کربن دمای دگرگونی فازی را افزایش داده و پایدارکننده آلفا هستند. در مقابل، هیدروژن و بسیاری دیگر از عناصر مانند مولیبدن، وانادیوم، نیوبیوم، کروم، آهن و سیلیسیوم با کاهش دمای دگرگونی فازی، پایدارکننده فاز بتا به شمار می‌روند. عناصری مانند زیرکونیوم و قلع خنثی هستند و تاثیری بر دمای دگرگونی فازی ندارند [۱و۱۹]. شکل ۲-۴ تاثیر برخی عناصر آلیاژی بر دمای دگرگونی بتا را نشان می‌دهد [۱].



ب الف

شکل۲-۳- (الف) سلول واحد فاز آلفا (ب) سلول واحد فاز بتا [۱].

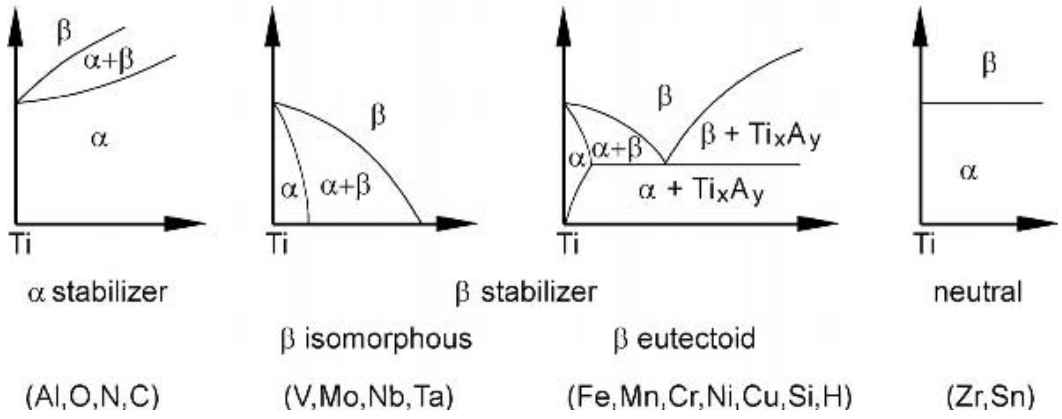
عناصر پایدارکننده فاز بتا به دو گروه عناصر هم‌شکل۲۴ و عناصر یوتکتوییدی۲۵ تقسیم می‌شوند. وانادیوم، مولیبدن و نیوبیوم مهم‌ترین عناصر هم‌شکل پایدارکننده فاز بتا هستند که به طور پیوسته دمای دگرگونی بتا را

[20] Allotropic
[21] Hexagonal Close Packed (HCP)
[22] Body Centered Cubic (BCC)
[23] Beta Transus
[24] Isomorphous
[25] Eutectoid

کاهش می‌دهند. برخی از این عناصر مانند آهن و منگنز باعث بهبود سختی‌پذیری و قابلیت عملیات حرارتی آلیاژ می‌شوند [۱۹].

عناصر یوتکتوییدی پایدارکننده فاز بتا حلالیت محدودی در فازآلفا داشته و باعث کاهش دمای دگرگونی بتا می‌شوند. این کاهش دمای دگرگونی بتا با تشکیل برخی ترکیبات متوقف می‌گردد. کروم و سیلیسیوم مهم‌ترین عناصر این گروه به‌شمار می‌روند [۱۹]. نمودارهای فازی نشان‌دهنده تاثیر عناصر آلیاژی بر دمای دگرگونی بتا در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. جدول ۲-۲ دامنه غلظتی و تاثیر عناصر آلیاژی مختلف را نشان می‌دهد [۱۹].

مکانیزم دگرگونی فازی از فاز بتا به فاز آلفا بسته به ترکیب شیمیایی و نرخ سرمایش، می‌تواند به صورت جوانه-زنی و رشد (نفوذی) یا به صورت مارتنزیتی باشد [۲].



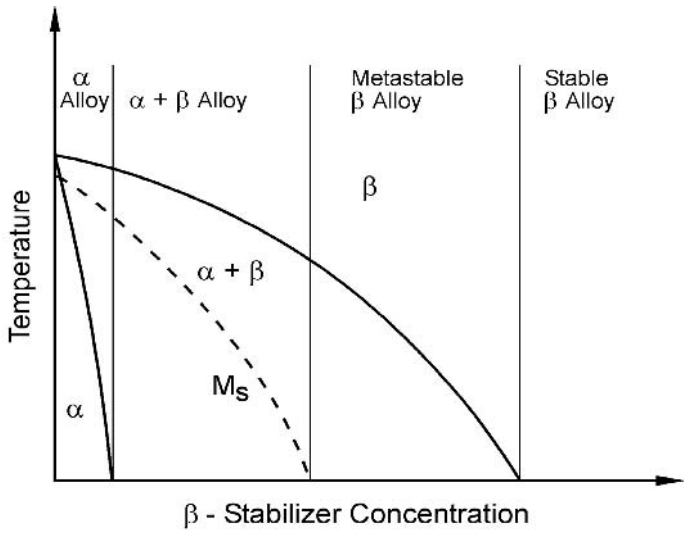
شکل ۲-۴- تاثیر عناصر آلیاژی بر نمودار فازی تیتانیوم [۱۹].

جدول ۲-۲- عناصر آلیاژی متداول و تاثیر آنها بر فازهای آلفا و بتا [۱۹].

عنصر آلیاژی	دامنه (درصد وزنی)	تاثیر روی ریزساختار
آلومینیوم	۲-۷	پایدارکننده فاز آلفا
قلع	۲-۶	پایدارکننده فاز آلفا
وانادیوم	۲-۲۰	پایدارکننده فاز بتا
مولیبدن	۲-۲۰	پایدارکننده فاز بتا
کروم	۲-۱۲	پایدارکننده فاز بتا
مس	۲-۶	پایدارکننده فاز بتا
زیرکونیوم	۲-۸	استحکام‌بخش فازهای آلفا و بتا
سیلیسیوم	۱-۰/۲	بهبود مقاومت خزشی

۲-۶- انواع آلیاژهای تیتانیوم

آلیاژهای تیتانیوم بر اساس فازهای تشکیل‌دهنده آنها به سه گروه آلیاژهای آلفا، آلیاژهای بتا و آلیاژهای آلفا + بتا تقسیم می‌شوند [۱۹]. علاوه بر این، تقسیم‌بندی دیگری نیز ارایه شده است که گروه‌های بیشتری مانند آلیاژهای نزدیک آلفا، آلیاژهای نزدیک بتا و آلیاژهای پیشرفته تیتانیوم را نیز شامل می‌شود [۲۰]. نمودار فازی آلیاژهای دوتایی تیتانیوم بر حسب پایدارکننده فاز بتا در شکل ۲-۵ نشان داده شده است [۱].



شکل ۲-۵- نمودار فازی دوتایی آلیاژهای تیتانیوم بر حسب پایدارکننده فاز بتا [۱].

۲-۶-۱- آلیاژهای آلفا

آلیاژهای آلفای تیتانیوم شامل تک فاز آلفا می‌باشند که دارای استحکام متوسط، چقرمگی خوب و مقاومت خزشی هستند. این آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی ندارند. مکانیزم‌های در دسترس برای استحکام‌بخشی این آلیاژها محدود بوده و کاربردهای نسبتا محدودی نیز دارند. استحکام‌بخشی این آلیاژها از طریق مکانیزم‌های ریزکردن اندازه دانه، بافت[۲۶]، سخت‌کاری رسوبی و ایجاد محلول جامد قابل انجام است [۲۱].

تیتانیوم خالص تجاری[۲۷] مهم‌ترین آلیاژ آلفای تیتانیوم است که کلاس‌های مختلفی از آن بر اساس نوع و مقدار عناصر آلیاژی کربن، هیدروژن، آهن، نیتروژن و اکسیژن در دسترس است [۱]. امروزه با اضافه کردن درصد وزنی کمی از عناصر پایدارکننده بتا به این آلیاژها و ایجاد مقدار کمی فاز بتا در کنار فاز آلفا استحکام بهبود می‌یابد [۱]. به این آلیاژها، اصطلاحاً آلیاژهای نزدیک آلفا[۲۸] می‌گویند.

---

[26] Texture
[27] Commercial Pure Titanium
[28] Near alpha

۲-۶-۲- آلیاژهای بتا

آلیاژهای بتای تیتانیوم شامل تک‌فاز بتا در دمای محیط هستند. این آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی دارند و از این طریق به سطح مطلوب استحکام و چقرمگی می‌رسند. هم‌چنین این آلیاژها دارای شکل‌پذیری و قابلیت کارسرد عالی هستند. در حالت کلی، این آلیاژها دارای استحکام بالاتر و چقرمگی کمتری نسبت به آلیاژهای آلفا و آلیاژهای آلفا + بتا هستند. یکی از روش‌های استحکام بخشی این آلیاژها از طریق کنترل ترکیب شیمیایی و ایجاد محلول جامد با اضافه کردن عناصری مانند آهن، کروم و وانادیوم است. این آلیاژها برای کاربردهای نیازمند به استحکام بالا که چقرمگی زیاد مهم نباشد، مناسب است [۲۱].

۲-۶-۳- آلیاژهای آلفا + بتا

آلیاژهای آلفا + بتای تیتانیوم دارای هر دو فاز آلفا و بتا در دمای محیط هستند. در این آلیاژها، دامنه وسیعی از ریزساختارها از طریق عملیات حرارتی و عملیات ترمومکانیکی قابل حصول است [۱]. در حالت کلی این آلیاژها بهترین موازنه خواص مکانیکی را دارا هستند. هم‌چنین این آلیاژها دارای استحکام بالاتر و چقرمگی مشابه نسبت به آلیاژهای آلفا ولی استحکام کمتر و چقرمگی بالاتر نسبت به آلیاژهای بتا هستند [۱۴]. از طرف دیگر باید به این نکته توجه کرد که استحکام بخشی این آلیاژها از طریق فرایند ترمومکانیکی، عملیات حرارتی (محلول‌سازی و پیرسازی)، تغییر بافت و کنترل ترکیب شیمیایی صورت می‌گیرد [۱۴].

۲-۶-۴ - آلیاژ Ti-6Al-4V

آلیاژ Ti-6Al-4V متداول‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است که بیش از ۵۰ درصد کل تولید آلیاژهای تیتانیوم را به خود اختصاص داده است [۱و۲]. این آلیاژ در سال ۱۹۵۴ معرفی شده و به عنوان آلیاژ مناسب برای کاربردهای عمومی یا آلیاژ همه‌فن‌حریف صنعت[۲۹] شناخته شده است [۲۲].

آلیاژ Ti-6Al-4V یک آلیاژ آلفا + بتای غنی از فاز آلفا است. علاوه بر وزن سبک، این آلیاژ دارای استحکام بالا، مقاومت خوردگی خوب، سختی و چقرمگی شکست مناسب می‌باشد. این مشخصات باعث تبدیل این آلیاژ به گزینه جذاب برای کاربردهای مختلف هوافضا، شیمیایی، بیومواد و ورزشی شده است [۲]. این آلیاژ که در سیستم ASTM در گروه ۵ قرار می‌گیرد در ساخت تجهیزات مختلف صنایع هوایی، کاربردهای اورتوپدی، توربین‌ها، گلف و اسکلت هواپیما به شدت استفاده می‌شود [۱۶].

---

[29] Workhorse of the industry

دامنه دمایی مناسب برای استفاده از آلیاژ Ti-6Al-4V بین ۲۱۰- تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. چگالی این آلیاژ ۴٫۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که ۵۶ درصد چگالی فولاد است. دمای ذوب این آلیاژ، بین ۱۶۳۰ تا ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد [۲۲].

آلومینیوم و وانادیوم عناصر آلیاژی اصلی تشکیل‌دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V هستند. آلومینیوم یک عنصر پایدارکننده فاز آلفا است که وجود ۶ درصد از آن در این آلیاژ باعث استحکام‌بخشی فاز آلفا از طریق مکانیزم محلول جامد می‌گردد. در مقابل وانادیوم یک عنصر پایدارکننده فاز بتا است که از طریق مکانیزم محلول جامد در فاز بتا باعث افزایش استحکام می‌شود. اعتقاد بر این است که دگرگونی فازی بتا به فازآلفا اصولاً بوسیله نفوذ وانادیوم بین دو فاز کنترل می‌گردد. بر این اساس، صفحات آلفا که در نرخ‌های سرمایش آهسته‌تر تشکیل می‌گردد ضخیم‌تر از صفحات آلفا در شرایط نرخ سرمایش سریع‌تر است [۱].

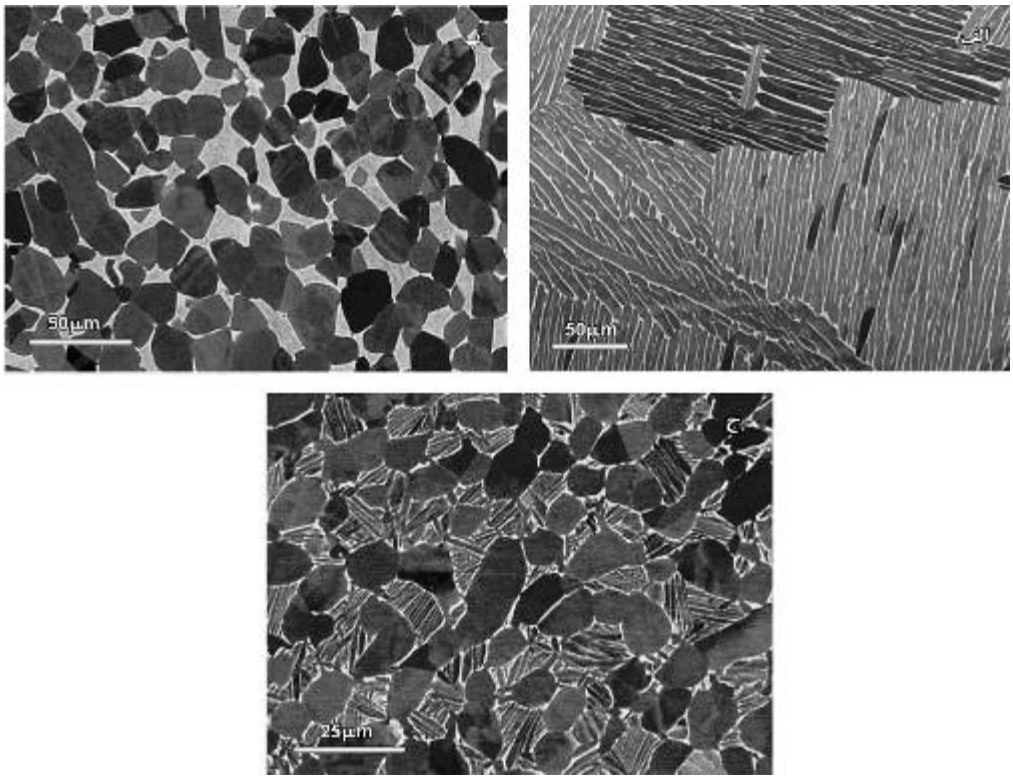
۲-۷- ریزساختار آلیاژهای تیتانیوم

دگرگونی فازی تبدیل فاز آلفا به فاز بتا در آلیاژهای تیتانیوم منجر به ایجاد تنوع وسیعی از ریزساختارها می‌شود که از طریق عملیات حرارتی و یا فرایندهای ترمومکانیکی قابل حصول هستند [۱]. با توجه به گستردگی تولید و کاربرد آلیاژهای دوفازی آلفا + بتای تیتانیوم در این بخش تنها به بررسی ریزساختار این آلیاژها با تکیه به آلیاژ مورد بررسی در این پژوهش یعنی آلیاژ Ti-6Al-4V پرداخته می‌شود.

بطور کلی ریزساختارهای آلیاژهای آلفا + بتا را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد که عبارتند از (۱) ریزساختار لایه‌ای کامل[۳۰]، (۲) ریزساختار هم‌محور کامل[۳۱] و (۳) ریزساختار بی‌مدال[۳۲]. تصاویر میکروسکوپی این ریزساختارها در شکل ۲-۶ نشان داده شده است [۱]. در ادامه این بخش ابتدا به بررسی ساختار لایه‌ای کامل پرداخته شده و سپس ساختارهای هم‌محور کامل و بی‌مدال معرفی شده‌اند.

---

[30] Fully lamellar
[31] Fully equiaxed
[32] Bimodal



شکل ۲-۶- ریزساختارهای آلیاژهای آلفا + بتای تیتانیوم (الف) لایه‌ای کامل، (ب) هم‌محور و (ج) بی‌مدال [۱].

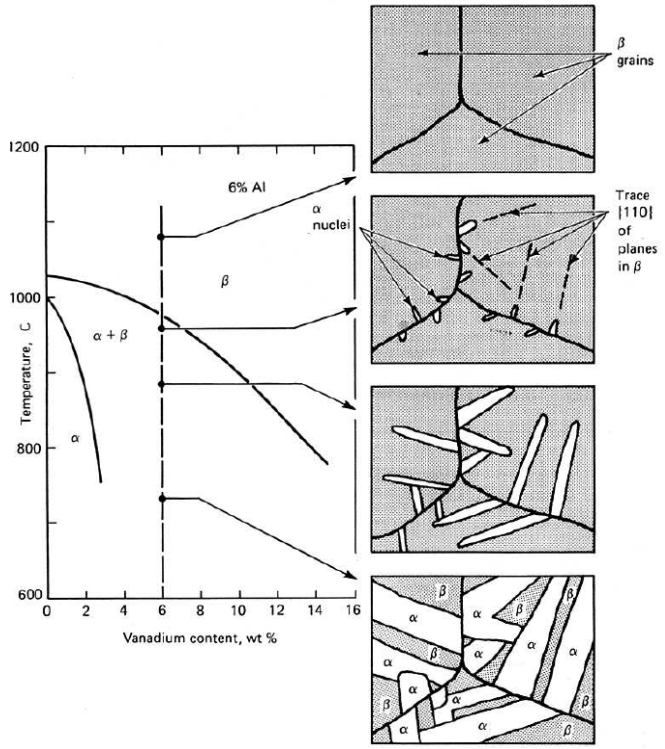
۲-۷ -۱- ریزساختار لایه‌ای کامل

ریزساختار لایه‌ای کامل در نتیجه اعمال فرایند ترمومکانیکی یا عملیات حرارتی آلیاژهای آلفا + بتا در دماهای بالاتر از دمای دگرگونی بتا و سرمایش با نرخ نزدیک به شرایط تعادلی حاصل می‌شود. حین سرمایش، رسوبات صفحه‌ای شکل آلفا با مکانیزم جوانه‌زنی و رشد بوجود می‌آیند. در نهایت ساختاری حاصل می‌گردد که در آن صفحات فاز آلفا بوسیله فاز بتا از هم مجزا شده‌اند. در این شرایط، ارتباط جهتی برگر[۳۳] بین صفحات آلفا و بتا پدید می‌آید که صفحات و جهات متراکم دو فاز را موازی با هم قرار می‌دهد [۱].

هنگامی که آلیاژ دوفازی آلفا + بتا از دماهای بالاتر از دمای دگرگونی بتا به آهستگی سرد شود، جوانه‌زنی فاز آلفا در پایین‌تر از دمای دگرگونی بتا از مرزهای دانه بتا آغاز می‌شود. در ادامه به علت انرژی پایین فصل مشترک در برخی صفحات مشخص، رشد فاز آلفا در امتداد این صفحات به سمت نواحی دورتر از مرز دانه‌های بتا شتاب گرفته و ضخامت آنها در جهت عمود بر مرزهای دانه بتا به آهستگی افزایش می‌یابد و آلفای صفحه‌ای شکل توسعه پیدا می‌کند. مکانیزم تشکیل این ریزساختارکه ریزساختار ویدمن‌اشتاتن[۳۴] نیز نامیده می‌شود به صورت

[33] Burger
[34] Widmanstätten

شماتیک در شکل ۲-۷ نشان داده شده است [۲۳]. معروف است که این ساختار استحکام متوسط و انعطاف-پذیری کم ولی در عین حال چقرمگی شکست و مقاومت خزشی عالی دارد [۲۱].



شکل ۲-۷- تشکیل ریزساختار ویدمن اشتاتن در آلیاژ Ti-6Al-4V [۲۳].

نقشه فرایندی به منظور تهیه ریزساختار لایه‌ای کامل در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. پس از تغییر شکل در دامنه فازی بتا یا دامنه فازی آلفا + بتا، عملیات پیرسازی و تنش‌زدایی روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد [۱].

مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده ریزساختار در ساختار لایه‌ای کامل نرخ سرمایش از دمای بالای دمای دگرگونی بتا می‌باشد [۴]. همان طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود، ریزساختار به شدت تحت تاثیر نرخ سرمایش تغییر می‌کند [۲۳]. نمونه‌ها در دمایی بالاتر از دمای دگرگونی بتا عملیات حرارتی شده و سپس تا دمای محیط سرد شده‌اند. روش‌های سرد کردن شامل سرد کردن در هوا (نرخ سرمایش متوسط)، سرد کردن در ورمیکولیت[۳۵] (نرخ سرمایش آهسته) و کوینچ کردن در آب (نرخ سرمایش زیاد) بوده است. نکته قابل توجه این است که ضخامت صفحات آلفا در نمونه دوم حدود ۵ برابر نمونه اول است. هم‌چنین نواحی شامل لایه‌های موازی آلفا که کولونی[۳۶]های آلفا نامیده می‌شوند در نمونه آرام سرد شده بزرگ‌تر هستند [۲۳].

[35] Vermiculite
[36] Colony