آلیاژهای تیتانیوم

آلیاژهای تیتانیوم، رده‌ای از آلیاژهای سبک هستند که عنصر اصلی سازنده آن‌ها تیتانیوم است. این رده از آلیاژها علاوه بر استحکام کششی و چقرمگی بالا (حتی در دماهای زیاد)، از مقاومت به خوردگی و خزش بی نظیری نیز برخوردارند. اما هزینه بالای تولید و پردازش آن‌ها مانع از اقبال عمومی در تمامی صنایع شده و تنها کاربرد آن‌ها را به صنایع نظامی، هوافضا، برخی تجهیزات پزشکی و ایمپلنت‌ها و برخی تجهیزات الکترونیکی محدود ساخته است.

اگرچه تیتانیوم «خالص تجاری» دارای خواص مکانیکی قابل قبولی برای برخی کابردها از جمله ایمپلنت‌های دندانی است، اما برای بهبود خواص تیتانیوم، آن را با برخی عناصر دیگر همچون آلومینیوم و وانادیوم آلیاژ می‌کنند. آلیاژ سازی در آلیاژهای تیتانیوم از روش‌های گوناگونی همچون تشکیل محلول جامد یا عملیات حرارتی می‌تواند باعث افزایش شدید خواصی همچون استحکام، سختی و چقرمگی در این فلزات شود.

ساختار بلوری و استحاله

تیتانیوم در دما و فشار محیط دارای ساختار بلوری HCP با نسبت فشردگی(c/a) برابر با ۱٫۵۸۷ می‌باشد (فاز α). در دمای ۸۹۰ درجه سلسیوس، تیتانیوم در اثر یک استحاله آلوتروپی به فاز β با ساختاربلوری BCC تبدیل می‌شود که این ساختار تا دمای ذوب (۱۶۷۸ درجه سلسیوس) پایدار باقی می‌ماند.

بعضی از عناصر می‌توانند دمای تبدیل آلفا به بتا را افزایش یا کاهش دهند؛ عناصری که در فاز آلفا حل می‌شومد همچون آلومینیوم، گالیم، ژرمانیم، کربن، اکسیژن و نیتروژن باعث افزایش دمای انتقال می‌شوند و به عناصر پایدارکننده آلفا مشهورند. اما عناصری همچون مولیبدن، وانادیم، تانتال، آهن، کروم، کبالت، نیکل، مس و سیلیکون دمای انتقال را کاهش داده و پایدارکننده فاز بتا هستند.[۱]

طبقه‌بندی آلیاژی بر اساس ساختار بلوری

آلیاژهای تیتانیوم را می‌توان بر اساس ساختار بلوری آن‌ها به چهار دسته تقسیم‌بندی کرد:[۲]

- آلیاژهای آلفا که دارای عناصر آلیاژی خنثی (همچون قلع) و/یا عناصر پایدار ساز فاز آلفا (همچون آلومینیوم یا اکسیژن) هستند. مثال‌ها عبارتند از: Ti-5AL-2SN-ELI و Ti-8AL-1MO-1V.
- آلیاژهای نزدیک به آلفا که حاوی مقدار اندکی فاز بتای شکل پذیر هستند. این گروه علاوه بر عناصر پایدارساز فاز آلفا، با مقدار کمی (۱ تا ۲٪) از پایدار سازهای فاز بتا مانند مولیبدن، سیلیکون یا وانادیم آلیاژسازی می‌شوند. مثال‌ها عبارتند از:
- Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo ,Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo IMI 685 و Ti 1100.
- آلیاژهای آلفا/بتا، که از لحاظ ترمودینامیکی آلیاژهای شبه پایداری بوده و عموماً شامل ترکیبی از پایدارسازهای فاز آلفا و بتا هستند. این سری از آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی دارند. مثال‌ها عبارتند از:

Ti-6Al-4V ,Ti-6Al-4V-ELI و Ti-6Al-6V-2Sn.

- آلیاژهای بتا نیز از لحاظ ترمودینامیکی شبه پایدار بوده و حاوی مقادیر کافی از عناصر پایدارساز فاز بتا هستند که به این آلیاژها امکان می‌دهد تا فاز بتا را هنگامی که کوئنچ می‌شوند، حفظ کنند. این آلیاژها همچنین قابلیت عملیات پیرسختی به منظور افزایش استحکام را دارند. مثال‌ها عبارتند از: Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al ,Ti-13V-11Cr-3Al ,Ti-10V-2Fe-3Al Beta C, و Ti-15-3.[۳]

تیتانیوم بتا

آلیاژهای تیتانیوم بتا ساختار bcc دارند. عناصر مورد استفاده در این آلیاژها عبارتند از مولیبدن، وانادیم، نئوبیوم، تانتالیوم، زیرکونیوم، منگنز، آهن، کرم، کبالت، نیکل و مس هستند که در مقادیر مختلف و به صورت تکی یا چندتایی به تیتانیوم اضافه می‌شوند. این آلیاژ قابلیت شکل پذیری عالی دارد و به راحتی جوشکاری می‌شود.[۴] تیتانیوم بتا امروزه به صورت گسترده در ارتودنسی به کارگرفته می‌شود. این نوع آلیاژ در کاربردهای خاصی می‌تواند جایگزین فولاد زنگ نزن شود، همانظور که پیش از این در ارتودنسی از فولاد زنگ نزن استفاده می‌شد. مدول الاستیسیته و استحکام این گروه تقریباً دو برابر فولاد زنگ نزن ۸–۱۸ است و تغییر شکل الاستیک بزرگ‌تری در فنرها از خود نشان می‌دهد.

خواص و کاربردها

درون‌کاشت استخوانی از جنس تیتانیوم با رده پزشکی، پوشش دهی شده به روش لایه نشانی اتمی

در کل، فاز بتا شکل پذیری بیشتری دارد و فاز آلفا گرچه استحکام بیشتری دارد، اما شکل پذیری آن نسبت به فاز بتا کمتر است. دلیل آن، بیشتر بودن صفحات لغزش در ساختار bcc فاز بتا در مقایسه با ساختار hcp فاز آلفا است. آلیاژهای آلفا/بتا نیز از خواصی مابین این دو فاز برخوردارند.

تیتانیوم دی اکسید در فلزات در دماهای بسیار بالا حل می‌شود و شکل‌دهی آن انرژی زیادی می‌طلبد. این دوعامل نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از اکسیژن به صورت محلول در آن وجود دارد و از این رو می‌توان آن را به نوعی آلیاژ Ti-O در نظر گرفت. رسوبات اکسید استحکام نسبی را ارائه می‌دهند امّا در مقابلِ عملیات حرارتی به خوبی پاسخگو نیستند و می‌توانند چقرمگی آلیاژ را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند.

بسیاری از آلیاژها از تیتانیوم یه صورت جزئی بهره می‌گیرند. امّا از آنجایی که آلیاژها بر اساس آن که کدام عنصر بیشترین مقدار ماده را تشکیل می‌دهد، طبقه‌بندی می‌شوند، این‌ها معمولاً به عنوان آلیاژ تیتانیوم در نظر گرفته نمی‌شوند. تیتانیوم به تنهایی یک فلز سبک و مستحکم است. این فلز از فولادهای کم کربن معمول مستکحم تر است، در حالی که ۴۵٪ از آن سبک‌تر است. همچنین این فلز دوبرابر مستحکم ترآلیاژهای ضعیف آلومینیوم است، درحالی که تنها ۶۰٪ از آن‌ها سنگین تر است. تیتانیوم از مقاومت به خوردگی بی نظیری در برابر آب دریا برخوردار است و به همین دلیل بخش‌هایی از شناور که در معرض آب دریا قرار می‌گیرند، همچون محور پروانه از آلیاژهای تیتانیوم ساخنه می‌شوند. تیتانیوم در راکت‌ها، موشک‌ها و هواپیماها کاربرد زیادی دارند، چراکه این آلیاژها نه تنها نسبت استحکام به وزن بالایی دارند بلکه از مقاومت زیادی در برابر دمای بالا نیز برخوردارند. علاوه براین، از آنجایی که تیتانیوم با بدن انسان واکنش نمی‌دهد، خود و آلیاژهایش در ساخت لگن مصنوعی، پین‌های مورد استفاده در ترمیم شکستگی استخوان‌ها و ایمپلنت‌ها استفاده می‌شود

رده‌های آلیاژهای تیتانیوم

انجمن مواد و آزمون آمریکا (به اختصار ASTM) استانداردهایی را برای دسته‌بندی آلیاژهای تیتانیوم ارائه کرده‌است که از آن بین می‌توان به استاندارد میله‌ها و شمش‌های تیتانیومی با مشخصه ASTM B348[۵] و همچنین ASTM B265[۶] برای ورق‌ها و صفحات تیتانیومی اشاره کرد؛ شایان ذکر است که استانداردهای کمتر شناخته شده‌ای همانند ASTM B381 برای آلیاژهای مخصوص آهنگری یا استاندارد JIS H4600 (مربوط به سازمان استاندارد صنعتی ژاپن) نیز برای دسته‌بندی آلیاژهای تیتانیوم وجود دارد.

مشخصات و شرایط عملیات حرارتی بعضی از این آلیاژها بر اساس استانداردهای ASTM B265/B348 مطابق زیر است (باید اشاره کرد که در کل ۳۹ رده مختلف آلیاژی در استاندارد ASTM B265/B348 وجود دارد): آلیاژهای Ti در شرایط زیر عرضه می‌شوند: گریدهای ۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۹، ۳۵ و ۳۶ تحت عملیات آنیلینگ یا پیرسازی قرار می‌گیرند. گریدهای ۹، ۱۸، ۲۸ و ۳۸ کار سرد، تنش زدایی و آنیل می‌شوند. گریدهای ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نیز تحت عملیات انحلالی یا عملیات انحلالی و پیرسازی توأماً قرار می‌گیرند.[۷]

- **گرید ۱** انعطاف‌پذیرترین و نرم‌ترین آلیاژ تیتانیوم است. این آلیاژ گزینهٔ خوبی برای شکل‌دهی سرد و محیط‌های خورنده است.
- **گرید ۲** تیتانیوم غیرآلیاژی، اکسیژن استاندارد.
- **گرید ۳** تیتانیوم غیر آلیاژی، اکسیژن متوسط.

گریدهای ۱ تا ۴ غیرآلیاژی هستند و با نام خالص تجاری یا "CP" اطلاق می‌شوند. به‌طور کلی برای گریدهای خالص با افزایش شماره گرید، استحکام تسلیم و شکست افزایش می‌یابد. تفاوت در خواص فیزیکی آن‌ها اصولاً به مقادیر عناصر درون شبکه‌ای مربوط می‌شود. این گروه در جاهایی که مقاومت به خوردگی، هزینه، سهولت ساخت و قابلیت جوشکاری اهمّیّت دارند، به کار می‌روند.

- **گرید ۵** که همچنین تحت عنوان Ti6Al4V یا Ti 6-4 شناخته می‌شود، پراستفاده‌ترین آلیاژ تیتانیوم می‌باشد و دارای ترکیب شمیایی ۶٪ آلومینیم، ۴٪ وانادیم، ۰/۲۵٪(حداکثر) آهن، ۰/۲٪(حداکثر) اکسیژن و تیتانیوم به عنوان عنصر اصلی می‌باشد. این آلیاژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سخت‌تر از تیتانیوم خالص تجاری است در حالی که سفتی و خواص حرارتی یکسانی دارند (به جز هدایت حرارتی که در تیتانیوم گرید ۵، ۶۰٪ کمتر از تیتانیوم خالص تجاری است). از جمله مزایای بسیار آن، قابلیت عملیات حرارتی است. این گرید ترکیبی از استحکام، مقاومت به خوردگی و قابلیت جوشکاری را ارائه می‌دهد. این آلیاژ آلفا-بتا، اسب بارکش صنعت تیتانیوم است. آلیاژ مذکور تا اندازه مقطع ۱۵ میلی‌متر قابلیت عملیات حرارتی دارد و تقریباً تا دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد مورد استفاده است. این آلیاژ در ساخت بدنه هواپیماها، قطعات موتور، صنایع دریایی و به خصوص صنایع تولید نیرو استفاده می‌شود.

«کاربردها به طور جزئی: پره‌های توربین، دیسک‌ها، بدنه هواپیماها، اتصالات، شناورها، توپی‌ها، رینگ‌ها و ایمپلنت‌ها.» عموماً Ti6Al4v در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود. این آلیاژ چگالی در حدود ۴۴۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۱۲۰ گیگاپاسکال و استحکام کششی ۱۰۰۰ مگاپاسکال را داراست. در مقایسه، فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ آنیل شده از چگالی ۸۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۱۹۳ گیگاپاسکال و استحکام کششی ۵۷۰ مگاپاسکال

برخوردار است یا برای آلومینیم ۶۰۶۱ تمپر شده، این پارامترها به ترتیب برابر با ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ۶۹ گیگاپاسکال و ۳۱۰ مگاپاسکال است.

- **گرید ۶** حاوی ۵٪ آلومینیم و ۲/۵٪ قلع می‌باشد. همچنین به عنوان Ti5Al2.5Sn شناخته می‌شود. این آلیاژ به سبب قابلیت جوشکاری خوب و حفظ پایداری و استحکام در دمای بالا در ساخت بدنه هواپیماها و موتور جت استفاده می‌شود.
- **گرید ۷** حاوی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ درصد پالادیم است و مشابه گرید ۲ است. مقدار کم پالادیم مقاومت به خوردگی آلیاژ در دماهای بالا و پایین را افزایش می‌دهد.[۸]
- **گرید H۷** مشابه گرید ۷ است با مقاومت به خوردگی بالاتر.[۸]
- **گرید ۹** حاوی ۳ درصد آلومینیم و ۲/۵ درصد وانادیم است. این گرید هم قابلیت جوشکاری و ساخت آسان گریدهای خالص را دارد و هم استحکام بالای گرید ۵. این آلیاژ معمولاً در ادوات هیدرولیک هواپیماها و تجهیزات ورزشی استفاده می‌شود.
- **گرید ۱۱** حاوی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵٪ پالادیوم است. این گرید مقاومت به خوردگی را افزایش داده است.[۹]
- **گرید ۱۲** حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن و ۰/۸ درصد نیکل است.[۹]

عملیات حرارتی

آلیاژهای تیتانیوم به دلایل متعددی عملیات حرارتی می‌شوند که اصلی‌ترین آن‌ها استحکام بخشی از طریق عملیات انحلالی (ایجاد محلول جامد) و پیرسازی و همین‌طور بهینه‌سازی خواصی مانند چقرمگی شکست، استحکام خستگی و مقاومت به خزش در دمای بالا می‌باشد.

آلیاژهای آلفا و نزدیک به آلفا نمی‌توانند با عملیات حرارتی به‌طور قابل توجهی تغییر یابند. تنش زدایی و آنیلینگ روش‌های عملیات حرارتی هستند که می‌توانند برای این دسته از آلیاژهای تیتانیوم به کار روند. سیکل‌های عملبات حرارتی آلیاژهای بتا کاملاً با آلیاژهای آلفا و نزدیک به آلفا متفاوت است. آلیاژهای بتا نه تنها می‌توانند تنش زدایی یا آنیل شوند بلکه قابلیت عملیات انحلالی و پیرسازی را دارند. آلیاژهای آلفا-بتا آلیاژهای دوفازی هستند. (هر دو فاز در دمای محیط وجود دارند) ترکیب فاز، اندازه و توزیع فازها در آلیاژهای آلفا-بتا می‌توانند توسط عملیات حرارتی تا اندازه معینی تغییر کنند و خواص تعدیل یابند.