

تولید آزمایشگاهی آلیاژ آلومیناید تیتانیوم گاما

بهزاد جباری پور^۱، مهرداد مطلب پور علیشاهی^۲

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

۲ کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۳۱

چکیده

ترکیبات آلومینایدهای تیتانیوم به این دلیل که ویژگی‌های حرارتی آلیاژهای پایه تیتانیوم را توسعه داده‌اند، جذابیت فراوانی دارند. باوجود داکتیلیته کمتر این دسته از مواد نسبت به آلیاژهای متداول پایه تیتانیوم، این ترکیبات گپ و خلأ موجود در قابلیت عملکردی مواد سبک وزن در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را پر کرده‌اند. آلیاژهای آلومیناید تیتانیوم براساس فازهای بین‌فلزی γ ($TiAl$) و α_2 (Ti_3Al) به‌عنوان موادی که از پتانسیل بالایی برای برآوردن نیازهای طراحی پیشرفته برای سیستم‌های تبدیل انرژی، که براساس دماهای سرویس‌دهی بالاتر، وزن‌های سبکتر و سرعت‌های عملیاتی بالاتر صورت می‌گیرند، شناخته می‌شوند. ترکیبات بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم براساس خواص مکانیکی خود می‌توانند در محدوده وسیعی از قطعات در صنعت خودروسازی، صنایع هوافضا، توربین‌های نیروگاه برق و موتورهای توربین گازی استفاده شوند. در این مقاله مراحل تولید آزمایشگاهی، عملیات حرارتی و کنترل کیفی شمش‌های γ - $TiAl$ تولیدشده به‌روش ریخته‌گری ذوب قوسی تحت خلأ تشریح می‌شود. همچنین برای اطمینان، بر روی شمش‌های تولیدشده آزمایشات XRD چگالی‌سنجی و متالوگرافی انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که آلیاژ تولیدشده γ - $TiAl$ با حجم تولید پایلوت آزمایشگاهی، با توجه به استانداردهای موجود، کیفیت مناسبی دارد.

واژگان کلیدی: ترکیب بین‌فلزی γ - $TiAl$ ، روش کوره ذوب قوسی تحت خلأ، ریخته‌گری

۱. مقدمه

طراحی پیشرفته سیستم‌های تبدیل انرژی و بهبود بازده این سیستم‌ها براساس دماهای سرویس‌دهی بالاتر، وزن‌های سبکتر و سرعت‌های عملیاتی بالاتر در دمای بالا برخوردارند، شناخته می‌شوند [۱]. ترکیبات بین‌فلزی^۱، مخصوصاً آنهایی که از عناصر سبک مانند Ti و Al تشکیل شده‌اند، به‌دلیل چگالی کم و

سیستم‌های فلزی مرسوم بیش از پنجاه سال است که توسعه یافته‌اند و برای دست‌یافتن به پیشرفت‌های بیشتر در این زمینه به کلاس‌های جدیدی از مواد نیاز است. آلیاژهای آلومیناید تیتانیوم براساس فازهای بین‌فلزی γ ($TiAl$) و α_2 (Ti_3Al) به‌عنوان موادی که از پتانسیل بالایی برای برآوردن نیازهای

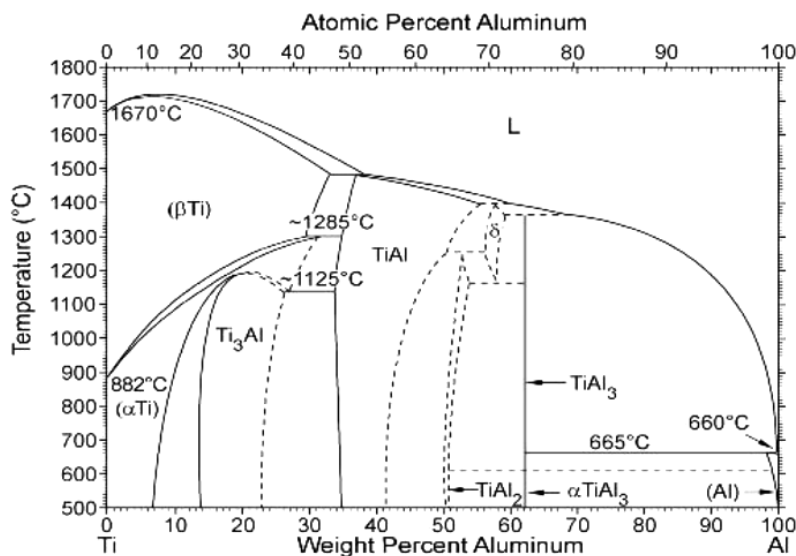
استحکام مناسب در دمای بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲]. اساساً خواص برجسته این مواد به دلیل ماهیت به شدت منظم و پیوندهای جهت‌دار ترکیبات آنهاست. این خواص شامل موارد زیر می‌باشد [۱]:

۱. چگالی پایین
۲. مدول الاستیسیته بالا
۳. پایداری ساختاری مناسب
۴. مقاومت زیاد در برابر اکسیداسیون و خوردگی
۵. مقاومت بالا در برابر احتراق در مقایسه با آلیاژهای مرسوم تیتانیوم
۶. استحکام کششی و خزشی در دمای بالا

بر اساس این خواص، ترکیبات بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم می‌توانند در محدوده وسیعی از قطعات در صنعت خودروسازی، صنایع هوافضا، توربین‌های نیروگاه برق و موتورهای توربین گازی استفاده شوند [۱]. این مواد جزء گروه اندکی از مواد هستند که پتانسیل استفاده در کاربردهای سازه‌ای در دمای بالا را، که در آنها استحکام ویژه (نسبت استحکام به چگالی) و سفتی ویژه (نسبت مدول الاستیسیته به چگالی) بسیار مهم است را دارند [۳]. کاربرد این مواد جدید در صنعت، صرف‌نظر از عملکرد بهبودیافته و نوآوری‌های احتمالی آنها، به قابلیت استفاده و میزان در دسترس بودن روش‌های فرآوری مناسب برای تولید قطعات بستگی دارد [۱]. این ترکیبات برای جایگزین‌شدن با سوپرآلیاژهای پایه آهن یا سوپرآلیاژهای

سنگین‌تر پایه نیکل در محدوده مشخصی از تنش و در دماهای بالا، در حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای استفاده و کاربرد در سیستم‌های پیشرفته تبدیل انرژی مورد نظر هستند، بنابراین باید خواص مکانیکی آنها در مقابل استاندارد بالای سوپرآلیاژها ارزیابی شود. ترکیبات بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل مزایای قابل توجهی در چگالی دارند [۴]. دیاگرام فازی $Ti-Al$ که در شکل ۱ آمده است، نشان می‌دهد که در این سیستم سه نوع ترکیب وجود دارد، Ti_3Al (α_2)، $TiAl$ (γ) و $TiAl_3$. فاز α_2 براساس ترکیب Ti_3Al دارای ساختار هگزاگونال و فاز γ بر اساس ترکیب $TiAl$ دارای ساختار تتراگونال می‌باشد [۲].

به دلیل خواصی چون تردی و چقرمگی شکست کم $\gamma-TiAl$ در دمای محیط تحقیقات بسیار محدودی در ارتباط با ماشینکاری این ترکیب بین فلزی صورت گرفته است. وینرت و همکاران (۲۰۰۶) با هدف تولید شاتون از جنس $\gamma-TiAl$ مطالعه‌ای در زمینه قابلیت ماشینکاری این ماده انجام داده‌اند [۵]. آنها ابتدا شمش $\gamma-TiAl$ را توسط مراحل ریخته‌گری قوسی تحت خلأ تولید کردند؛ سپس فرایندهای سوراخکاری، قلاویزکاری، فرزکاری و بورینگ را برای تولید شاتون انجام دادند و گزارش کردند که به دلیل سختی، تردی و استحکام بالای $\gamma-TiAl$ تنها می‌توان از ابزارهایی با جنس کاربایدیهای سماتنه یا مواد برشی سخت‌تر مانند PCD و CBN برای ماشینکاری این ماده استفاده نمود.



شکل ۱. دیاگرام فازی $Ti-Al$ [۲]

اسپینوال و همکاران نیز مطالعاتی را در زمینه روش‌های مختلف ماشینکاری γ -TiAl، به‌خصوص فرزکاری سرعت بالا انجام داده‌اند [۶-۷]. بررسی آنها نشان می‌دهد که از نظر سایش یا عمر ابزار، نیروهای برشی، دما، قابلیت تولید و مهمتر از همه سلامت سطح قطعه، ماشینکاری سنتی γ -TiAl بسیار مشکل‌تر از آلیاژهای تیتانیوم است. آنها همچنین بیان کردند که ماشینکاری این ماده به‌روش تخلیه الکتریکی و الکتروشیمیایی انجام‌پذیر و ممکن است. این مقاله نیز تحقیقاتی در ارتباط با ماشینکاری تخلیه الکتریکی این ترکیب بین فلزی انجام داده‌اند و نتایج را منتشر نموده‌اند [۸-۱۰].

۲. آماده‌سازی مواد اولیه برای ریخته‌گری γ -TiAl

به‌دلیل شرایط تحریمی، امکان تهیه ترکیب بین‌فلزی γ -TiAl از خارج کشور تقریباً مقدور نیست و باید ریخته‌گری و تهیه این ترکیب بین‌فلزی در داخل دنبال می‌شد. چون بهترین و نسبتاً کارآمدترین روش برای ریخته‌گری این ترکیب بین‌فلزی روش کوره ذوب قوسی تحت خلأ است، واحد ریخته‌گری دانشگاه تهران مد نظر قرار گرفت. شمش مورد نظر توسط کوره ذوب قوسی تحت خلأ با الکتروود تنگستن غیرمصرفی ریخته‌گری و ذوب مجدد شد. برای شارژ ریخته‌گری شمش مورد نظر از مواد اولیه خالص، تسمه تیتانیوم با درصد خلوص ۹۹/۸ درصد و شمش آلومینیوم با درصد خلوص ۹۹/۵ درصد استفاده شد. چون

شرایط ذوب و درصد تبخیر عناصر تیتانیوم و آلومینیوم در حین فرآیند ذوب‌ریزی نامعلوم بود و برای انتخاب اصولی‌تر ترکیب بین‌فلزی مناسب و مطلوب جهت انجام آزمایش‌های ماشینکاری در نظر گرفته شد که ۶ نمونه یا قرص بین‌فلزی TiAl به وزن ۲۰ گرم با محدوده متغیری از درصد اتمی آلومینیوم و تیتانیوم و با در نظر گرفتن نمودار تعادلی تیتانیوم - آلومینیوم ریخته‌گری شود و پس از ریخته‌گری ۶ نمونه با انجام تست چگالی‌سنجی، متالوگرافی و برای تعیین دقیق‌تر، تست XRD روی نمونه‌ها انجام شود و درصد تبخیر آلومینیوم و تیتانیوم مشخص گردد و با لحاظ نمودن این درصد تبخیرها، آلیاژی مناسب از تیتانیوم و آلومینیوم برای رسیدن به ترکیب γ -TiAl مطلوب، آماده‌سازی شود. برای آماده‌کردن ۶ نمونه، جهت چربی‌زدایی و تمیزکردن مواد اولیه، دستگاه تمیزکننده آلتراسونیک مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که مواد اولیه در یک بشر حاوی محلول استون قرار داده شد و سپس برای مدت زمان ۱۰ الی ۲۰ دقیقه در دستگاه تمیزکننده آلتراسونیک قرار گرفت. پیش از تمیزکاری قطعات بریده‌شده از تیتانیوم توسط محلولی حاوی ۴ نسبت اسید نیتریک، ۱ نسبت اسید فلئوئوریک و ۵ نسبت آب و تکه‌های آلومینیومی توسط محلول ۱ مولار سود و ۱ مولار اسید نیتریک شستشو شدند تا اکسیدهای سطحی برطرف گردد. در شکل ۲ تسمه‌های پاکسازی‌شده تیتانیومی و آلومینیومی قبل از توزین برای آماده‌سازی نمونه‌های ریخته‌گری نمایش داده شده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمایی از تسمه‌های پاکسازی شده تیتانیومی و آلومینیومی؛ (الف) تسمه‌های آلومینیومی، (ب) تسمه‌های تیتانیومی

با توجه به نمودار دو فاز تعادلی آلومینیوم - تیتانیوم در شکل ۱ و برای داشتن محدوده تغییرات آلومینیوم و تیتانیوم، آماده‌سازی

اکنون مواد اولیه برای توزین (با توجه به درصد وزنی مورد نظر تیتانیوم و آلومینیوم) جهت فرایند ریخته‌گری آماده شده‌اند.

۶ نمونه برای ریخته‌گری انجام شد. در جدول ۱ درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم برای ریخته‌گری ۶ نمونه با وزن ۲۰ گرم آمده است.

۳. ریخته‌گری شمش‌ها

عملیات ذوب و آلیاژسازی تحت گاز اتمسفر (آرگون) در فشار ۳۰۰ میلی‌بار در قالب مسی آبگرد صورت گرفت. در شکل ۳ دستگاه ریخته‌گری کوره ذوب قوسی تحت خلأ مورد استفاده در

فرایند ریخته‌گری، نمایش داده شده است. گفتنی است برای ایجاد ساختار یکنواخت، ترکیب بین‌فلزی تا سه بار تحت عملیات ذوب مجدد قرار گرفت و شش قرص ریخته‌گری مشابه شکل ۴ تولید شد. پس از انجام عملیات ریخته‌گری، برای بررسی ترکیب و ساختار آلیاژهای ریخته‌شده در ابتدا روی نمونه‌ها تست چگالی‌سنجی و متالوگرافی انجام شد. نتایج تست چگالی‌سنجی و تعیین درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم پس از عملیات ریخته‌گری در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم برای ریخته‌گری ۶ نمونه

نمونه	درصد وزنی تیتانیوم	درصد وزنی آلومینیوم
۱	۶۴	۳۶
۲	۸۴	۱۶
۳	۳۷	۶۳
۴	۶۲	۳۸
۵	۶۶	۳۴
۶	۷۰	۳۰



شکل ۳. دستگاه ریخته‌گری کوره ذوب قوسی تحت خلأ مورد استفاده در ریخته‌گری

با مشاهده جدول ۱ و نتایج جدول ۲ مشخص می‌شود که تیتانیوم دارای درصد تبخیر قابل توجهی است و درصد وزنی آن در نمونه‌های ریخته‌گری کاهش یافته است و به دنبال آن مشاهده می‌شود که چون درصد وزنی تیتانیوم کاهش یافته

است، درصد وزنی آلومینیوم در نمونه‌های ریخته‌گری شده نسبت به درصد در نظر گرفته شده در قبل از فرایند ریخته‌گری افزایش داشته است. در شکل ۵ درصد وزنی تبخیرشده تیتانیوم در حین فرایند ریخته‌گری نمایش داده شده است.



نمونه ۲



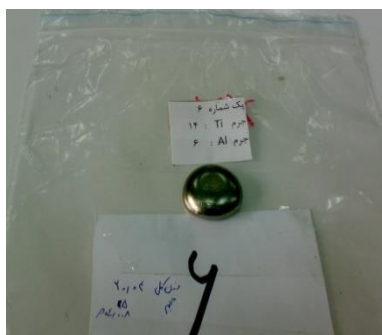
نمونه ۱



نمونه ۴



نمونه ۳



نمونه ۶



نمونه ۵

شکل ۴. شش قرص ریخته‌گری شده

جدول ۲. نتایج چگالی سنجی و تعیین درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم پس از ریخته‌گری

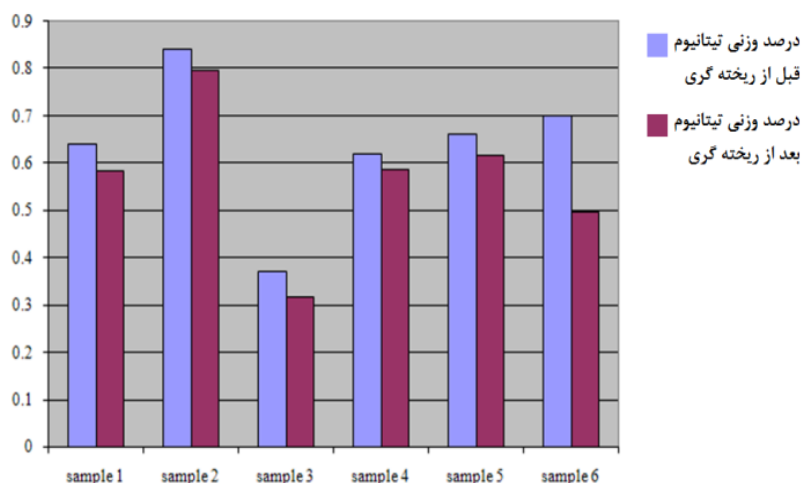
نمونه	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	درصد وزنی تیتانیوم	درصد وزنی آلومینیوم	درصد اتمی تیتانیوم	درصد اتمی آلومینیوم
۱	۳/۷۵۱۹	۵۸	۴۲	۴۴	۵۶
۲	۴/۱۳۳	۸۰	۲۰	۶۹	۳۱
۳	۳/۲۷۱۱	۳۲	۶۸	۲۱	۷۹
۴	۳/۷۵۲۴	۵۸	۴۲	۴۴	۵۶
۵	۳/۸۰۸۴	۶۲	۳۸	۴۷	۵۳
۶	۳/۵۹۲۷	۵۰	۵۰	۳۶	۶۴

ویکرز قرار گرفتند، که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که درصد تبخیر تیتانیوم حین فرایند

پس از فرایند ریخته‌گری برای کسب اطلاعات بیشتر شش نمونه ریخته‌گری شده تحت آزمایش سختی‌سنجی به‌روش

ریخته‌گری نمونه شماره ۶ غیرطبیعی بوده و با توجه به اطلاعات حاصل از سختی‌سنجی در جدول ۳ مشاهده می‌شود که این نمونه با وجود داشتن درصد تیتانیوم کمتر نسبت به نمونه شماره ۲، دارای بیشترین مقدار سختی است و احتمال وجود اشکالی در فرایند ریخته‌گری کوره ذوب قوسی تحت خلأ نمونه شماره ۶ وجود دارد، به همین دلیل این نمونه از ادامه آزمایشات و مراحل کنترل کیفی حذف می‌شود. در مرحله بعد، بخشی از هر نمونه

ریخته‌گری شده، به کمک وایرکات بریده و مانع شد. سطح نمونه‌ها با ورق سنباده ۸۰ تا ۲۵۰۰ سنباده زده شد و سپس به کمک پودر اکسید آلومینیوم پولیش شد و با محلول اچ *Kroll's* به مدت ۴۵ ثانیه اچ گردید و ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده به کمک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی‌های مختلف بررسی گردید که در شکل ۶ نمایش داده شده است. گفتنی است نمونه‌ها هنوز عملیات حرارتی نشده‌اند.



شکل ۵. درصد وزنی تیتانیوم در شش نمونه قبل و بعد از عملیات ریخته‌گری

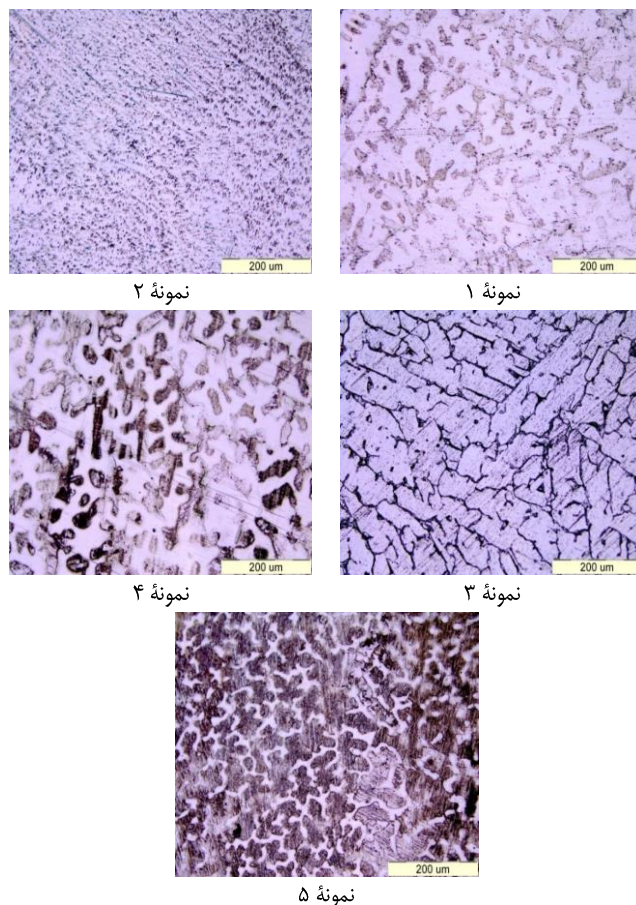
جدول ۳. نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های ریخته‌گری شده

نمونه	سختی ویکرز
۱	۲۸۶
۲	۴۴۰
۳	۳۴۱
۴	۲۷۶
۵	۲۹۲
۶	۴۷۳

با بررسی نتایج جدول ۲ و نمودار تیتانیوم - آلومینیوم نشان داده شده در شکل ۱ و همچنین جدول ۴ که به صورت خلاصه اطلاعات مربوط به فازهای مختلف نمودار تعادلی تیتانیوم - آلومینیوم را بیان کرده است، برای داشتن ترکیب بین‌فلزی γ - $TiAl$ ، درصد اتمی آلومینیوم باید در محدوده ۵۰ تا ۶۲ درصد باشد که برای نمونه‌های ریخته‌گری شده شماره ۱، ۴ و ۵ چنین شرایطی وجود دارد. اما نمونه شماره ۵ به دلیل سختی بیشتر

نسبت به دو نمونه دیگر (به سبب درصد وزنی بیشتر تیتانیوم) به عنوان ترکیب مطلوب انتخاب می‌گردد. تصاویر متالوگرافی نماش داده شده در شکل ۶ مربوط به قبل از عملیات حرارتی هستند. برای از بین بردن جدایش‌های میکروسکوپی، عملیات همگن‌سازی انجام شد. عملیات همگن‌سازی روی نمونه‌های ریخته‌گری در زیر دمای یوتکتوئید؛ یعنی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان کلی ۴۸ ساعت، با استفاده از عملیات حرارتی انجام

شده. در شکل ۷، تصویر متالوگرافی سطح نمونه ۵ ریخته‌گری شده پس از عملیات حرارتی نمایش داده شده است.

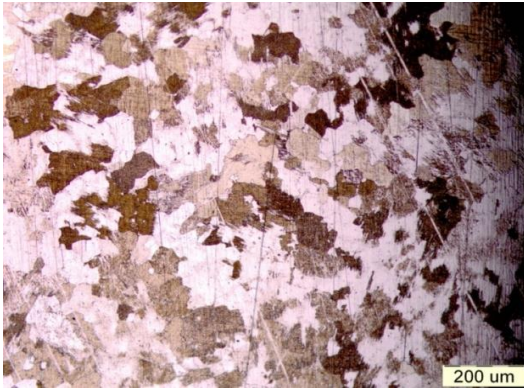


شکل ۶. تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه‌های ریخته‌گری شده (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

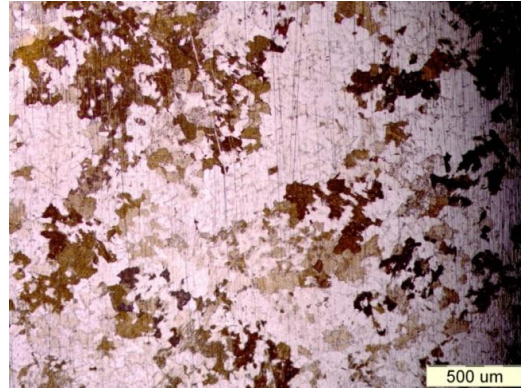
جدول ۴. اطلاعات مربوط به فازهای مختلف نمودار تعادلی تیتانیوم-آلومینیوم [۲]

Phase	Composition, at.% Al	Pearson symbol	Space group	Prototype	Lattice parameter, nm
TiAl ₃ (HT)	74.5-75.0	<i>tI8</i>	<i>I4/mmm</i>	TiAl ₃	<i>a</i> = 0.3849 <i>c</i> = 0.8609
TiAl ₃ (LT)	~75	<i>tI32</i>	<i>I4/mmm</i>	...	<i>a</i> = 0.3877 <i>c</i> = 3.3828
Ti ₃ Al ₁₁	66-71	(a)	<i>a</i> = 0.3953 <i>c</i> = 0.4104(b)
TiAl ₂	66-67	<i>tI24</i>	<i>I4₁/amd</i>	HfGa ₂	<i>a</i> = 0.3970 <i>c</i> = 2.4309
Ti _{1-x} Al _{1+x}	63-65	<i>tP4</i>	<i>P4/mmm</i>	AuCu	<i>a</i> = 0.4030 <i>c</i> = 0.3955
Ti ₃ Al ₅	62	<i>tP32</i>	<i>P4/mbm</i>	Ti ₃ Al ₅	<i>a</i> = 1.1293 <i>c</i> = 0.4038
TiAl(γ)	50-62	<i>tP4</i>	<i>P4/mmm</i>	AuCu	<i>a</i> = 0.4000 <i>c</i> = 0.4075(c)
Ti ₃ Al(α ₂)	~20-39	<i>hP8</i>	<i>P6₃/mnc</i>	Ni ₃ Sn	<i>a</i> = 0.5782 <i>c</i> = 0.4629

(a) Tetragonal. (b) Subcell parameters at 66 at.% Al. (c) At 50 at.% Al



(ب)



(الف)

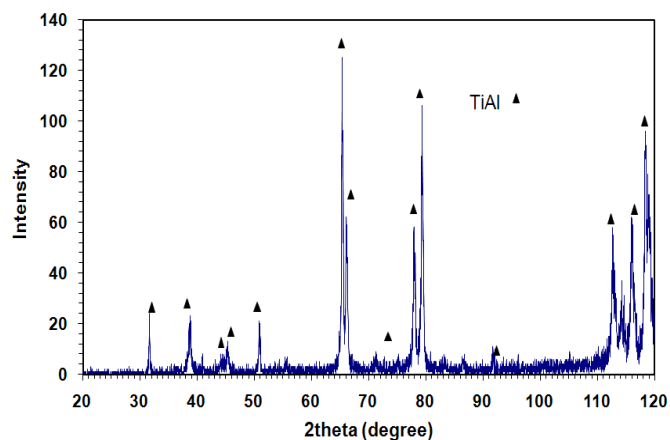
شکل ۷. تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه شماره ۵ ریخته‌گری شده پس از عملیات حرارتی

(الف) نمونه عملیات حرارتی شده، بزرگنمایی ۵۰ برابر، (ب) نمونه عملیات حرارتی شده، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

۴. جمع‌بندی

هدف از ارائه مقاله حاضر، بررسی چگونگی تولید آزمایشگاهی یکی از نوین‌ترین آلیاژهای صنعتی است که توانسته با وجود گذشت زمانی اندک از تولید کاربردهای مهم و متنوعی در صنعت پیدا کند. در این مقاله، ابتدا ۶ نمونه ترکیب بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم گاما در کوره ذوب قوسی تحت خلأ تولید و درصد وزنی تبخیرشده تیتانیوم در طول فرایند ریخته‌گیری محاسبه شد. سپس، سختی‌سنجی انجام و به‌دلیل مشکل در ریخته‌گری نمونه ششم، این نمونه از ادامه آزمایش حذف شد. همچنین از نمونه‌های تولیدشده قبل و بعد از عملیات حرارتی تصاویر متالوگرافی گرفته شد. در ادامه با توجه به درصد اتمی آلومینیوم که باید در محدوده مشخص ۵۰ تا ۶۲ باشد، نمونه‌های ۱، ۴ و ۵ به‌عنوان ترکیب بین‌فلزی آلومیناید تیتانیوم گاما انتخاب شدند. جهت اطمینان از اینکه نمونه ریخته‌گری همان ترکیب است و از طرفی دارای ساختار متالورژیکی تقریباً همگن می‌باشد، بر روی نمونه شماره ۵، که عملیات حرارتی شده است، آنالیز XRD انجام شد و نتیجه نشان داد این نمونه با اطمینان خوبی همان ترکیب بین‌فلزی مطلوب $\gamma-TiAl$ است. در انتها نمونه ۵ به‌دلیل داشتن بیشترین سختی به‌عنوان نمونه مورد نظر انتخاب شد. در انتها پنج شمش به وزن تقریبی ۲۰۰ گرم که مشابه شرایط نمونه ۵ ریخته‌گری شده بودند تولید گردید و برای اطمینان از ماده حاصل، هر پنج شمش تولیدی مورد آزمایش چگالی‌سنجی، سختی‌سنجی و آنالیز XRD قرار گرفتند. تمام شمش‌های ریخته‌گری شده دارای کیفیت و آنالیز مطلوب بودند.

جهت اطمینان از اینکه نمونه ریخته‌گری همان ترکیب بین‌فلزی $\gamma-TiAl$ می‌باشد و از طرفی دارای ساختار متالورژیکی تقریباً همگن است، روی نمونه ۵، که عملیات حرارتی شده است، آنالیز XRD انجام شد که نتیجه آن در شکل ۸ نمایش داده شده و بیانگر این است که نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده ۵، با اطمینان، همان ترکیب بین‌فلزی $\gamma-TiAl$ است. حال که ترکیب مورد نظر و درصد تبخیر عناصر در حین ریخته‌گری (براساس نمونه ۵) معلوم شده است، برای شروع عملیات ماشینکاری در مرحله بعدی آزمایشات مورد نظر محققان مقاله حاضر، باید شمش مناسب ریخته‌گری گردد. برای این منظور و لحاظ نمودن ابعاد قالب مسی موجود در کوره ذوب قوسی الکتریکی، که دارای ابعاد تقریبی $1/5 \times 2/5 \times 14$ سانتی‌متر است و با لحاظ نمودن دانسیته به‌دست آمده $3/81$ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای ترکیب مورد نظر، وزن شارژ مواد اولیه تیتانیوم و آلومینیوم درون قالب محاسبه شد و مطابق شرایط ذکرشده در مراحل قبل عملیات ذوب‌ریزی انجام شد که نمونه ریخته‌گری شده، در شکل ۹ آورده شده است. گفتنی است در تحقیق مورد نظر، برای انجام آزمایش‌های تجربی ماشینکاری به‌روش تخلیه الکتریکی، مجموعاً ۵ شمش مشابه شمش نمایش شده در شکل ۹، هر کدام به وزن تقریبی ۲۰۰ گرم ریخته‌گری، عملیات حرارتی و آماده شد. برای اطمینان از صحت و کیفیت ۵ شمش ریخته‌گری شده، تمام آنها مورد آزمایش چگالی‌سنجی، سختی‌سنجی و آنالیز XRD قرار گرفتند و تمام ۵ شمش ریخته‌گری شده $\gamma-TiAl$ کیفیت و آنالیز مطلوب داشتند.



شکل ۸ آنالیز XRD از سطح نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده شماره ۵



شکل ۹. یک شمش ریخته‌گری شده γ -TiAl جهت عملیات ماشینکاری

۵. مأخذ

- [1] Leyens, Christoph, Manfred Peters. *Titanium and titanium alloys*. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [2] Lütjering, G., J. C. Williams, *Titanium, Engineering Materials and Processes*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] Appel, F., U. Brossmann, U. Christoph, S. Eggert, P. Janschek, U. Lorenz, J. Müllauer, M. Oehring, J. D. H. Paul. "Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys." *Advanced Engineering Materials*, 2, 2000, pp. 1-11.
- [4] Soboyejo, W. O., T. S. Srivatsan, *Advanced Structural Materials, Properties, Design Optimization, and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [5] Weinert, K., S. Bergmann, C. Kempmann. "Machining Sequence to manufacture a γ -TiAl-Conrod for Application in Combustion Engines." *Advanced Engineering Materials*, 1, 2006, pp. 1-8.
- [6] Aspinwall, D. K., R. C. Dewes, A. L. Mantle. "The Machining of γ -TiAl Intermetallic Alloys." *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, 54, 2005, pp. 99-104.
- [7] Hood, R., D. K. Aspinwall, C. Sage, W. Voice. "High speed ball nose end milling of γ -TiAl alloys." *Journal of Intermetallics*, 32, 2013, pp. 284-291.
- [8] Jabbaripour, B., M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, H. Faraji. "Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic." *Journal of manufacturing processes*, 15, 2013, pp. 56-68.

- [9] Jabbaripour, B., M. Motallebpour alishahi, M. Payandehzad. "Investigating the Electrical Discharge Machinability of γ -TiAl Intermetallic Compound." *Modares Mechanical Engineering*, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, 2015, 349-353 (In Persian)
- [10] Jabbaripour, B., N. Mollaramezani, M. Motallebpour alishahi. "Experimental Investigation of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) on Intermetallic Compound γ -TiAl." *Modares Mechanical Engineering*, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, (2015), 354-359 (In Persian).

پی‌نوشت

-
1. vacuum arc re-melting
 2. intermetallic compounds