بررسی رفتار احتراقی آلیاژهای پرانرژی آلومینیوم-تیتانیوم تولید شده به روش فعال سازی مکانیکی

سعید جبارزارع[1]*، اکبر چمی[2]

۱- مربی، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*saeidjabbar@pmt.iaun.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۰۹)

چکیده:

فلزات با انتالپی احتراق بالا همچون آلومینیوم از جمله مواد افزودنی به مواد منفجره، پیرو تکنیک ها و پیشرانه ها می باشند.آلومینیوم لازم است بصورت کامل مشتعل گردد و درجه حرارت احتراق آن پایین باشد. برای این منظور عوامل فعال همچون تیتانیوم به آلومینیوم افزوده می شوند. در این پژوهش از فرایند فعال سازی مکانیکی برای تولید آلیاژهای آلومینیوم- تیتانیوم در نسبت گلوله به بار ۲۰ استفاده شده است. برای آلیاژ آلومینیوم با مقادی رمتفاوت تیتانیوم از ۵ تا ۴۰درصد با تغییر به میزان ۵ درصد وزنی تیتانیوم حد حلالیت تیتانیوم، درجه حرارت اشتعال و میزان آلومینیوم مشتعل نگردیده تعیین گردیده است. با افزایش میزان تیتانیوم تا ۴۰ درصد وزنی حد حلالیت تیتانیوم تا ۱۵/۸۹ درصد وزنی افزایش و درجه حرارت اشتعال آلومینیوم تا ۸۹۳ درجه سانتیگراد کاهش می یابد. در آلیاژ آلومینیوم با بیشتر از ۳۰ درصد وزنی تیتانیوم احتراق به صورت کامل خواهد بود.

واژه های کلیدی:

مواد پر انرژی -آلیاژ آلومینیوم و تیتانیوم -فعال سازی مکا نیکی.

۱- مقدمه

به منظور افزایش حرارت انفجار مواد منفجره، پیشرانه و پیرو تکنیک علاوه بر عوامل اکسید کننده عناصر با قابلیت احتراق بالا نیز به آنها اضافه می گردد. بریلیوم، بور، لیتیم، آلومینیوم، منیزیم و روی به ترتیب دارای بیشترین حرارت احتراق می باشند و در این میان آلومینیوم با توجه به میزان در دسترس بودن مناسب ترین عامل می باشد. در یک ترکیب انفجاری آلومینیوم با محصولات گازی که کمبود اکسیژن داشته و یا حتی اکسیژن آزاد ندارند واکنش داده و باعث افزایش حرارت آزاد شده و تداوم فشارهای بالا می گردد. از این اثر در ترکیب های انفجاری برای انفجار هوایی، بالا بردن، پرت کردن و ایجاد حباب های بزرگ در زیرآب استفاده می شود[۱].

افزودن آلومینیوم به مواد پرانرژی با اندازه ذرات میکرو سایز انجام می گیرد. وجود لایه اکسیدی بر روی سطح ذرات آلومینیوم که همیشه قبل از اشتعال تشکیل می گردند، باعث تاخیر در اشتعال آلومینیوم می شود. به منظور اشتعال، عامل اکسید کننده و یا سوخت باید درضخا مت لایه اکسیدی نفوذ کرده و با رسیدن به آلومینیوم احتراق صورت گیرد. باتوجه به پیوستگی لایه سطحی اکسید آلومینیوم و غیر قابل نفوذ بودن اکسیژن و سوخت در آن احتراق با تاخیر انجام می گیرد. از طرفی عوامل اکسید کننده زودتر از ذرات فلز مشتعل شده که در این شرایط ذرات فلزی قبل از اشتعال ذوب و آگلومره می گردند. آگلومره های با اندازه بزرگ اصلاً آتش نگرفته و یا بعد از یک تأخیر طولانی مشتعل می گردند در حالیکه هدف از اشتغال در مواد منفجره آزاد شدن مقدار زیاد انرژی بصورت ناگهانی بوده که اثر آن بصورت موج انفجار، تشعشع حرارتی ویونی و به جلورانده شدن هوا با فشار زیاد بوده که باید در یک مدت زمان محدود انجام گیرد. ذرات درشت به آرامی سوخته و با توجه به کامل نشدن احتراق در آنها مقدار زیادی از آلومینیوم بصورت عمل نکرده باقی می ماند که به میزان قابل توجهی بازده انفجار را کاهش می دهد[۲].

به منظور بهبود شرایط احتراق می توان اندازه ذرات پودر فلزی را کاهش داد. ریز کردن اندازه ذرات آلومینیوم از حد میکرو سایز به نانوسایز بدلیل افزایش سطح فصل مشترک و کاهش ضخامت لایه اکسیدی باعث افزایش سرعت احتراق ، کاهش دمای احتراق و کاهش زمان احتراق می گردد. به دلیل اندازه نانومتری ذرات و نواحی فازی آنها و بالا بودن آنتالپی واکنش ها بین اجزای نانو ترکیب نهایی فازها، مورفولوژی و خواص ترمودینامیکی مواد نانو فعال متفاوت ازمواد با اجزاء با دانه بندی میکرو می باشد. امروزه بررسی و تحقیق به منظور تولید مواد نانو فعال در حال انجام می باشد تا با توجه به سطح بسیار زیاد موادنانو و حساسیت زیاد آنها روش های صنعتی مناسب معرفی گردد[۳-۴]. روش دیگر برای بهبود شرایط احتراق، آلیاژ کردن آلومینیوم با عناصر با حرارت احتراق بالا می باشد. با توجه به فعال بودن این عناصر، روش های معمول آلیاژ سازی ممکن نبوده و از طرفی حد انحلال تعادلی این عناصر در یکدیگر محدود می باشد. به کمک روش های غیر تعادلی انجماد سریع از حالت مذاب، فرآوری به روش پلاسما، تشکیل رسوب از فاز بخار و آلیاژ سازی مکانیکی می توان با ایجاد محلول های جامد فوق اشباع، شبه پایدار، به میزان قابل توجهی بیشتر از حالت تعادلی با ا نحلال عناصر در یکدیگر به آلیاژ سازی پرداخت[۵]. در فرایند آلیاژ سازی مکانیکی، مخلوط پودر فلزی درون آسیای تحت چرخش در حضور گلوله های فولادی پیوسته تحت ضربه و سایش قرار می گیرد. در این فرایند دانسیته بالایی از نواقص کریستالی همچون جاهای خالی، نابجاییها و مرز دانه ها توأم با کاهش اندازه ذرات روی می دهد. این نواقص می توانند اتم های عناصر آلیاژی را در خود جای داده و محلول های جامد فوق اشباع ایجاد نمایند. در استفاده از محلول های فوق اشباع همچون آلیاژهای Al-Mg، Al-Mg-H، Mg-B، Al-B، Ti-B، Al-Li وAl-Ti در مواد منفجره، بهبود سرعت احتراق، کاهش دمای شروع احتراق و کاهش میزان آلومینیوم عمل نکرده گزارش شده است[۶-۷]. دراین پژوهش هدف تعیین حدحلالیت تیتانیوم بصورت فوق اشباع درآلومینیوم و تأثیر آن بر کاهش دمای احتراق و میزان آلومینیوم عمل نکرده در آلیاژهای با درصدهای مختلف از تیتانیوم می باشد. در شکل ۱ نمودار تعادلی آلومینیوم- تیتانیوم نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد میزان انحلال تیتانیوم بصورت تعادلی در آلومینیوم با توجه به اختلاف نوع شبکه کریستالی بسیار محدود می باشد. به روش غیر تعادلی فعال سازی مکانیکی می توان حد انحلال تیتانیوم در آلومینیوم را افزایش داد[۸].

۲- روش تحقیق

در این پژوهش برای آلیاژ سازی از پودر خالص آلومینیوم با دانه بندی کمتر از ۱۵۰ میکرون و پودر خالص تیتانیوم با با دانه بندی کمتر از ۷۰ میکرون با خلوص۹۹/۹ درصد استفاده شده است. درشکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی آلومینیوم و

تیتانیوم خالص نشان داده شده است. مخلوط کردن پودرها در نسبت گلوله به بار۲۰به۱در تولید آلیاژهای پایه آلومینیوم با تیتانیوم در درصدهای وزنی مختلف ۵، ۱۰، ۱۵،۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و۴۰ صورت گرفته است. فرایند فعال سازی مکانیکی در ظرفیت کم در آسیای گلوله ای-ارتعاشی در نسبت گلوله به بار ۱۰به۱ و برای آسیای ماهواره ای معمولا در نسبت ۲۰ به ۱ انجام می گیرد[۹]. به منظور ممانعت از چسبیده شدن و آگلومره شدن ذرات به یکدیگر از اسید استاریک، C_{18} H_{36} O_2، به میزان ۲درصدوزنی استفاده شده است. فعال سازی در آسیای گلوله ای ماهواره ای مدل FP4 با بدنه فولادی و گلوله های فولادی با سرعت چرخش ۶۰۰rpm انجام گرفته است، در حالیکه فضای داخل محفظه ها بعد از خروج هوا با گاز آرگون پر شده است. تعیین ثابت شبکه، فازهای پایدار و میزان آلومینیوم عمل نکرده پس از اشتعال به کمک پیک های حاصل از تفرق اشعه X به کمک دستگاه(XRD(X Ray Diffraction مدل PW3040 Philips انجام شده است. تعیین درجه حرارت اشتعال نمونه ها به روش DTA بارسم تغییرات گرمابرحسب درجه حرارت در گرم کردن نمونه هاانجام گرفته است. بررسی شکل مواد اولیه و محصولات فعال سازی شده به توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO مدل VP435 انجام شده است.

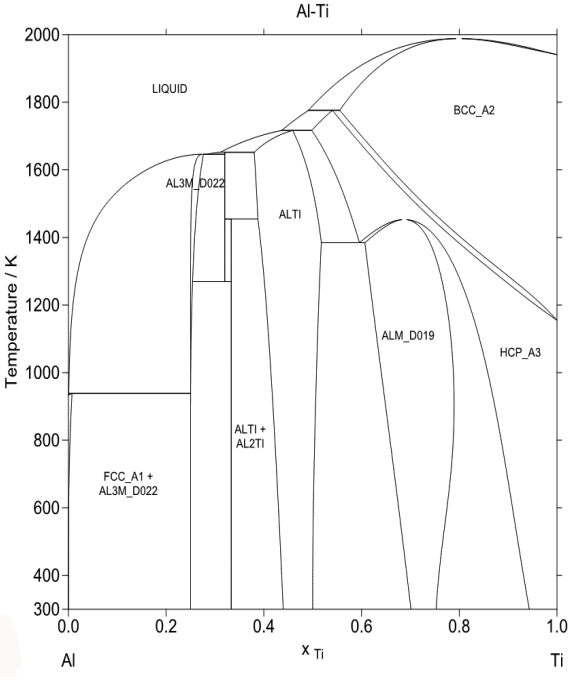
به کمک پراش های اشعهX می توان در هرزمان فعال سازی به کمک روابط۱و۲ و با توجه به مفروض بودنλ=۱/۵۴$\AA$ برای دستگاهXRD مورد استفاده، ثابت شبکه کریستالی را تعیین نمود.

$$\frac{1}{d^2}=\frac{h^2+k^2+l^2}{a^2}$$ رابطه۱

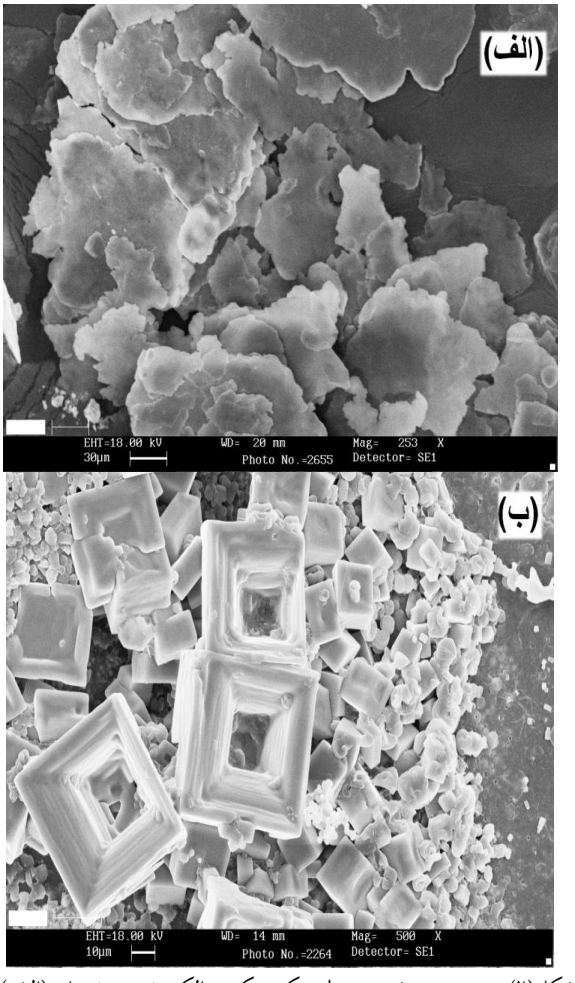
$$\lambda=\theta 2dSin$$ رابطه۲

تعیین میزان آلومینیوم مشتعل نگردیده به روش نسبت شیب ها، روش منشی، انجام می گیرد. در این روش برای تعیین میزان کمی یک ماده همچون آلومینیوم به کمک پیک های حاصل از تفرق اشعه X لازم است عاملی همچونCaF_2 بعنوان عامل استاندارد در نمونه های خام استفاده شود. لازم است پس از سوختن نمونه ها، حداقل یک پیک شاخص CaF_2 با یک پیک شاخص عنصر مورد نظر برای آنالیزکمی که دراین بررسی آلومینیوم می باشد همپوشانی نداشته باشد. با تغییر نسبت وزن پودر مورد آنالیز به وزن عامل استاندارد برای چند وزن در یک نمونه آلیاژ می توان تغییرات نسبت شدت آلومینیوم به شدت عامل استاندارد را برحسب نسبت وزن پودر مورد آنالیز به وزن عامل استاندارد رسم کرد. شیب این تغییرات را شیب خط آنالیز گویند. همین بررسی برای نمونه های آلومینیوم خالص همراه با پودر استاندارد در وزن های مختلف انجام گرفته که شیب این تغییرات را شیب خط هم سنجی گویند. با توجه رابطه ۳ درصد وزنی آلومینیوم عمل نکرده در نمونه ها را می توان تعیین نمود[۱۰].

$$\text{درصد وزنی آلومینیوم} = \frac{\text{شیب خط آنالیز}}{\text{شیب خط هم سنجی}} \times (\text{خلوص آلومینیوم}) \times ۱۰۰$$ رابطه ۳



شکل(۱): نمودار تعادلی آلومینیوم –تیتانیوم

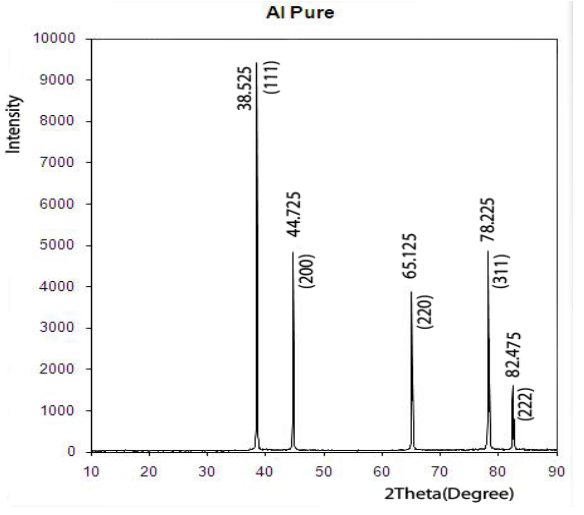


شکل(۲): تصویرتهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از: (الف): آلومینیوم خالص، (ب): تیتانیوم خالص

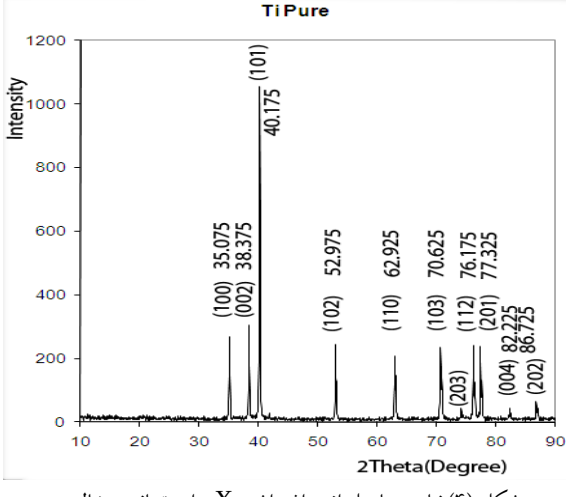
۳- نتایج و بحث

۳-۱-بررسی اثر زمان بر فعال سازی آلیاژهای Al-Ti

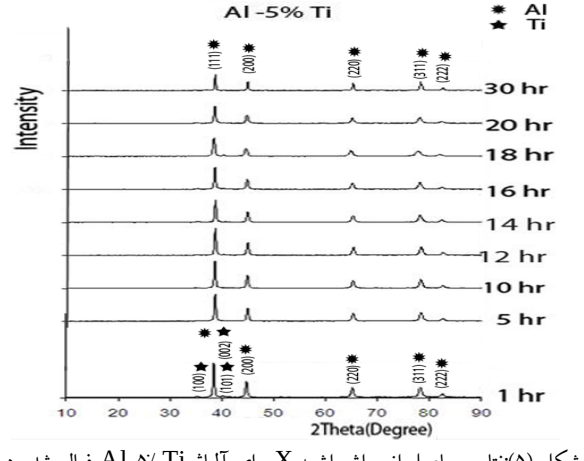
به منظور بررسی اثر زمان بر فرایند فعال سازی آلیاژهای آلومینیوم – تیتانیوم برای هر آلیاژ، فعال سازی بر روی نمونه ها در زمان های مختلف انجام گرفته و سپس بررسی پراش اشعه X بر روی نمونه ها صورت گرفته است. نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلومینیوم و تیتانیوم خالص با ذکر زوایای پراش برای صفحه های مختلف در شکل های۳و۴ و نتایج حاصل از پراش اشعهX برای آلیاژهای آلومینیوم حاوی۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و۴۰درصد تیتانیوم در زمان های مختلف به ترتیب در شکل های ۵ الی ۱۲ نشان داده شده است.



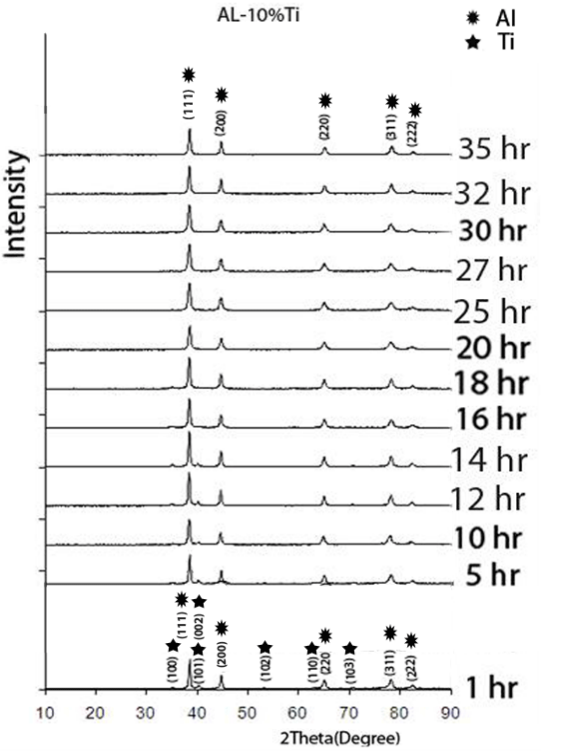
شکل (۳):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلومینیوم خالص



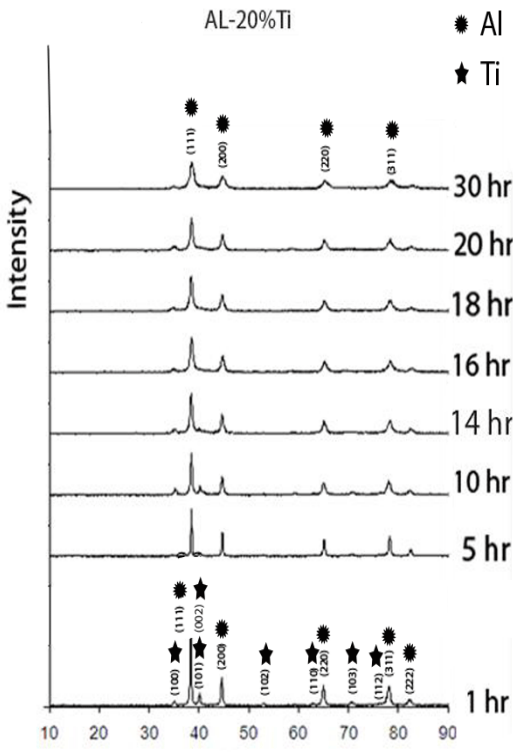
شکل (۴):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای تیتانیوم خالص



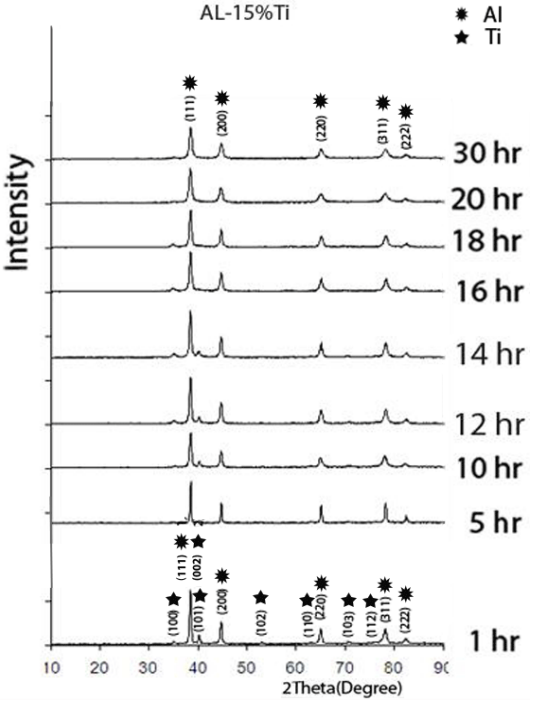
شکل (۵):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۵٪ Ti فعال شده در زمان های مختلف



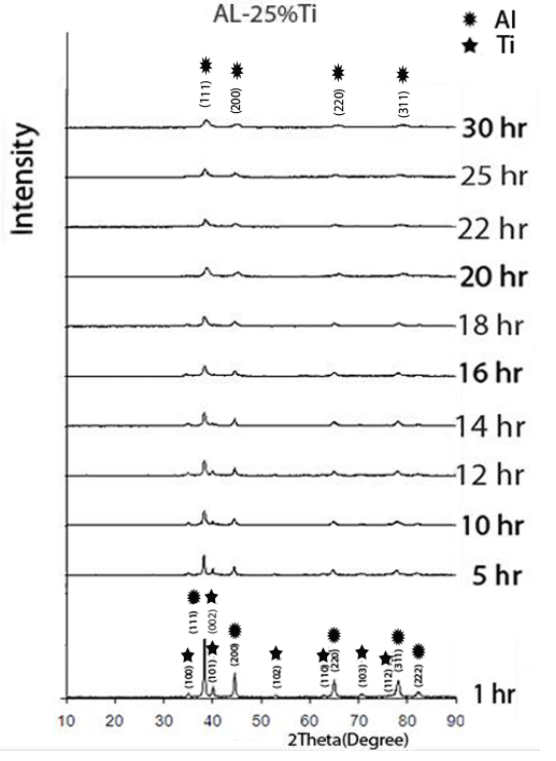
شکل (۶):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۱۰٪Ti فعال شده در زمان های مختلف



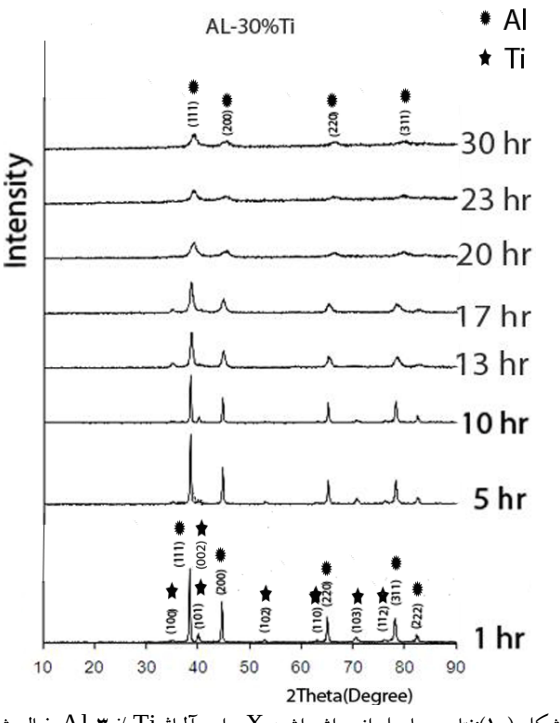
شکل (۸):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۲۰٪Ti فعال شده در زمان های مختلف



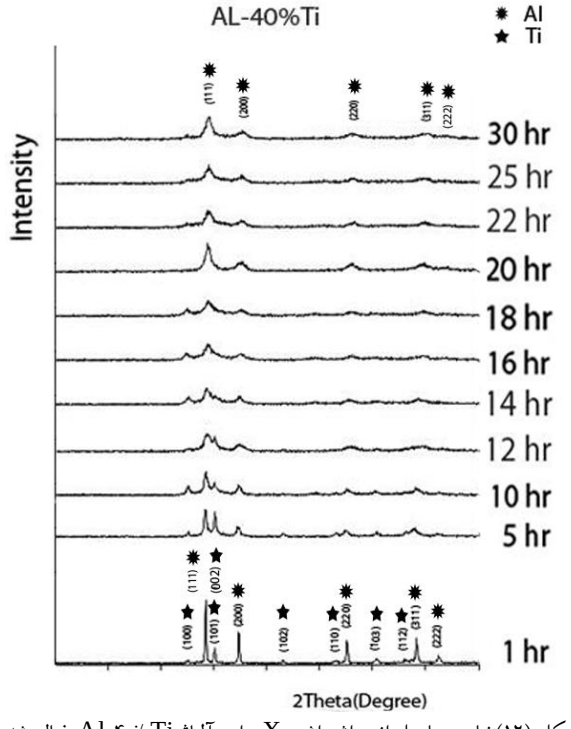
شکل (۷):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۱۵٪Ti فعال شده در زمان های مختلف



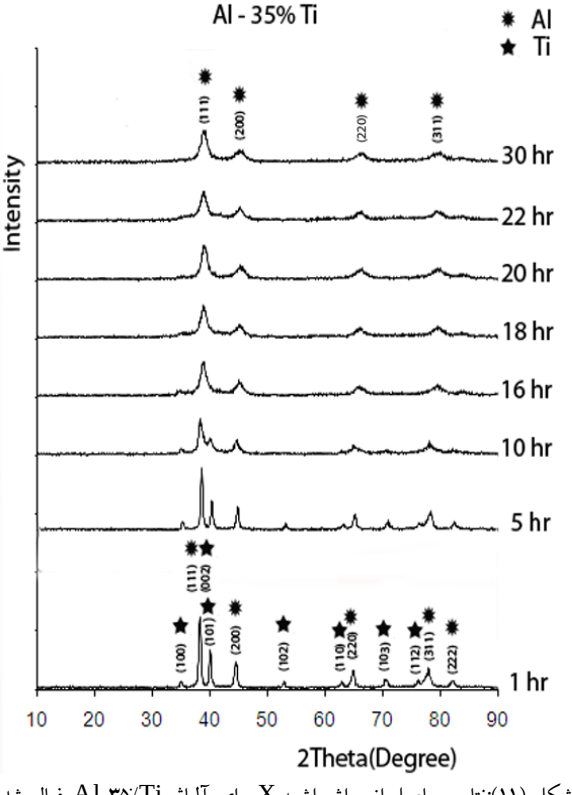
شکل (۹):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۲۵٪Ti فعال شده در زمان های مختلف



شکل (۱۰):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۳۰٪ Ti فعال شده در زمان های مختلف



شکل (۱۲):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۴۰٪ Ti فعال شده در زمان های مختلف



شکل (۱۱):نتایج حاصل از پراش اشعه X برای آلیاژ Al-۳۵٪Ti فعال شده در زمان های مختلف

فعال سازی آلومینیوم- تیتانیوم در یک سیستم فعال سازی شامل اجزاء انعطاف پذیر- ترد انجام می گیرد که جزءانعطاف پذیر آن آلومینیوم می باشد. در فرایند فعال سازی در اوایل آسیا کاری ذرات فلزی انعطاف پذیر در اثر برخوردهای وارده ناشی از غلتیدن همراه با اصطکاک بین گلوله ها و جداره ظرف، برخورد بین گلوله ها و بین گلوله ها وجداره ظرف بصورت تخت و ورقه ای در آمده در حالی که بر روی ذرات ترد خردایش انجام می گیرد. در ادامه خرده های ذرات ترد بوسیله اجزاء نرم دربرگرفته می شود. با افزایش زمان آسیا کاری، کار سخت شدن ذرات نرم باعث خرد شدن وکاهش اندازه ذرات می گردد. در صورت انحلال ناپذیر بودن، ذرات ترد در زمینه نرم به صورت یکنواخت پراکنده خواهند شد. در اصل درآلیاژ سازی مکانیکی دو پدیده جوش سردوشکست ذرات پودر تحت برخوردهای با انرژی بالا مرتبا انجام می گیرد. طی این فرایند در نتیجه شکست ذرات بطورمداوم ذرات پودر حاوی سطوح تمیز در تماس با یکدیگر قرارگرفته وفاصله نفوذی کاهش می یابد[۹]. چگالی بالای

عیوب تشکیل شده در زمان طولانی آسیا کاری باعث افزایش میکروسختی ذرات پودر می گردد. به دلیل تغییرشکل پلاستیکی شدیدوشکست مداوم، ابعاد بلوری ذرات به محدوده نانومتری کاهش می یابد. پهن شدن پیک هایXRD گواه این ادعا می باشد. ناپدیدشدن پیک های تیتانیوم بیانگر انحلال وتشکیل تیتانیوم باساختار نانومتری می باشد. ازطرفی پهن شدگی پیک های آلومینیوم نیزبیانگرتشکیل بلورهای نانومتری وکرنش ناشی ازانحلال اتم های تیتانیوم درآلومینیوم می باشد. باتوجه به حلالیت کم تیتانیوم در آلومینیوم، آسیاکاری باعث توزیع همگن ذرات ریز تیتانیوم در زمینه آلومینیوم می گردد. نفوذ تیتانیوم درآلومینیوم نیز باعث اعوجاج درشبکه کریستالی آلومینیوم شده که خود باعث افزایش چگالی نابجایی ها می گردد. بنابراین افزایش فعال سازی باعث افزایش اعوجاج وبهم ریختگی شده و نهایتا باعث ایجاد ساختار غیربلوری می گردد.

باتوجه به شکل های ۵ الی۱۲ برای فعال سازی آلیاژهای مختلف آلومینیوم- تیتانیوم در زمان های فعال سازی متفاوت ملاحظه می گردد، در تمامی نمونه ها پیک شاخص مربوط به صفحه (۰۰۲) تیتانیوم کاملاً توسط پیک شاخص مربوط به صفحه(۱۱۱) آلومینیوم همپوشانی شده است. در حالیکه در فرایند فعال سازی با کاهش شدت و افزایش پهنای پیک ها ، پیک مربوط به صفحه (۱۰۱) تیتانیوم در پیک مربوط به صفحه (۱۱۱) آلومینیوم ادغام شده است. این ادغام در شکل های۱۱و۱۲برای آلیاژهای حاوی ۳۵ و۴۰درصد تیتانیوم با افزایش زمان به خوبی قابل مشاهده می باشد. پیک مربوط به صفحه (۱۰۰)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳)، (۱۱۲) و سایر صفحه های مربوط به تیتانیوم نیز با افزایش زمان فعال سازی با توجه به کاهش شدت پیک ها، افزایش پهن شدگی و جابجایی پیک ها کاملاً حذف گردیده اند. حذف این پیک ها به معنای کامل بودن انحلال و تشکیل محلول جامد برای تمامی آلیاژها نمی باشد. بلکه این پدیده ناشی ازهمپوشانی پیک های آلومینیوم و تیتانیوم ، ریز شدن دانه های تیتانیوم توزیع شده در نمونه و مقداری ناشی از ایجاد محلول جامد پایه آلومینیوم با انحلال تیتانیوم در ساختار کریستالی آلومینیوم می باشد [۱۱].

۳-۲-تعیین حد حلالیت تیتانیوم در آلیاژهای فعال شده Al-Ti

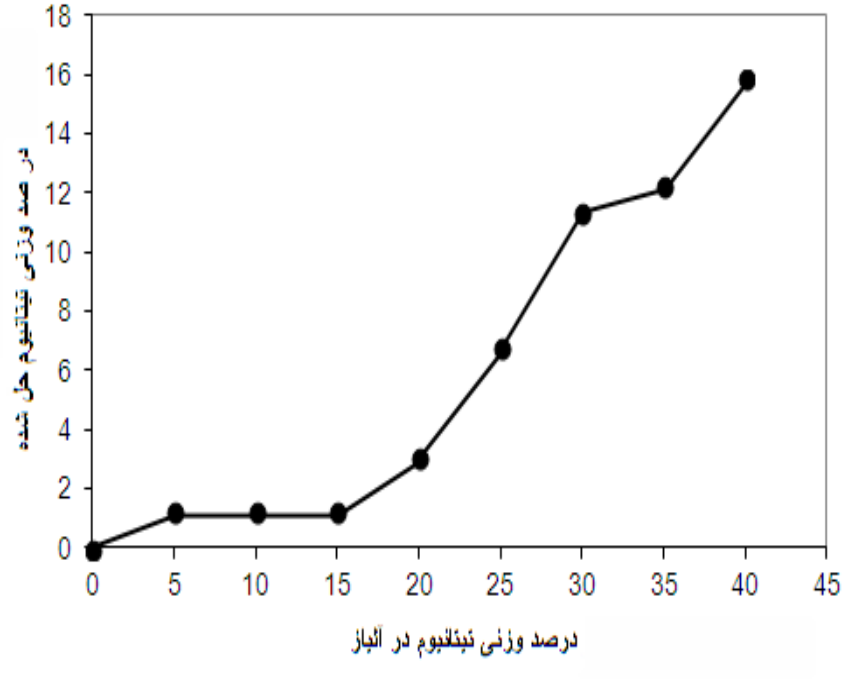
دراین پژوهش بررسی فعال سازی مکانیکی برروی سیستم آلومینیوم- تیتانیوم انجام گرفته است که دلیل آن حلالیت کم تیتانیوم درشرایط تعادلی درآلومینیوم می باشد. نظر به تفاوت ساختار اتمی آلومینیوم (با ساختار مکعبی با سطوح مرکز دار) باتیتانیوم (با ساختار اتمی هگزاگونال)، و تفاوت شعاع اتمی این دو عنصر (شعاع اتمی آلومینیوم ۱/۴۳ و شعاع اتمی تیتانیوم ۱/۴۷ آنگستروم) و تفاوت در سرعت نفوذ این دو عنصر در دمای محیط (سرعت نفوذ تیتانیوم در آلومینیوم cm^2/sec $^{-23}$ ۱۰×۲/۹ و برای آلومینیوم درتیتانیوم cm^2/sec $^{-21}$ ۰×۱/۰۶)، انحلال تیتانیوم در آلومینیوم نمی تواند به راحتی انحلال عناصری همچون منیزیم در آلومینیوم بصورت کامل باشد[۹]. باتوجه به نتایج حاصل از پراش اشعهX، فعال سازی باعث انحلال تیتانیوم درآلومینیوم و ریز و پخش شدن تیتانیوم باقیمانده درزمینه آلومینیوم می گردد. پهن شدن و کاهش شدت پیک های آلومینیوم و حذف شدن پیک های تیتانیوم گویای این پدیده می باشد. نفوذ تیتانیوم در آلومینیوم باعث اعوجاج درشبکه کریستالی آلومینیوم شده که خود باعث افزایش چگالی نابجایی ها می گردد. بنابراین افزایش فعال سازی باعث افزایش اعوجاج و بهم ریختگی در ساختار کریستالی آلومینیوم شده و نهایتا باعث ایجاد ساختار غیر بلوری در آلومینیوم می گردد که در این شرایط هیچگونه پیک مشخصه ای از آلومینیوم و تیتانیوم در پراش اشعه X وجود نخواهد داشت [۱۱]. از این لحا ظ تعیین حد حلالیت در آلومینیوم در آلیاژ های مختلف برای زمانی از فعال سازی بررسی گردیده که پیک های شاخص تیتانیوم کاملا حذف شده باشند و ادامه فعال سازی صرفا باعث ایجاد ساختار غیر بلوری می گردد.

انحلال تیتانیوم در آلومینیوم در حالت جامد در فرایند فعال سازی مکانیکی باعث کاهش ثابت شبکه آلومینیوم می گردد. این اثر در نمودارهای پراش اشعه X با تغییر زاویه پراش به مقادیر بزرگتر برای صفحه های شاخص آلومینیوم قابل مشاهده می

باشد. به ازاء انحلال ۱ درصد وزنی تیتانیوم درآلومینیوم، ثابت شبکه آلومینیوم به میزان ۰/۰۰۵۴Aکاهش می یابد [۱۲]. در جدول ۱ مقدار زاویه پراش برای صفحه (۱۱۱)، مقدار ثابت شبکه، مقدار کاهش ثابت شبکه و حد انحلال تیتانیوم در آلومینیوم در آلیاژها با درصدهای متفاوت تیتانیوم آورده شده است، رسم تغییرات میزان تیتانیوم حل شده برحسب درصد تیتانیوم در آلیاژ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مکانیزم فعال سازی شامل فرایند شکست و جوش سردبین اجزاء بوده که بطور مرتب تکرار می گردد. در هر شکست و جوش سرد، سطوح جدید در تماس با یکدیگر قرار می گیرند. با افزایش میزان تیتانیوم و یا افزایش زمان فعال سازی، تماس بین دو جزء با یکدیگر بیشتر گردیده که با توجه به مساعد بودن شرایط از لحاظ دانسیته بالای عیوب کریستالی در ساختار آلومینیوم، انحلال بیشتر صورت گرفته است[۸و۱۳].

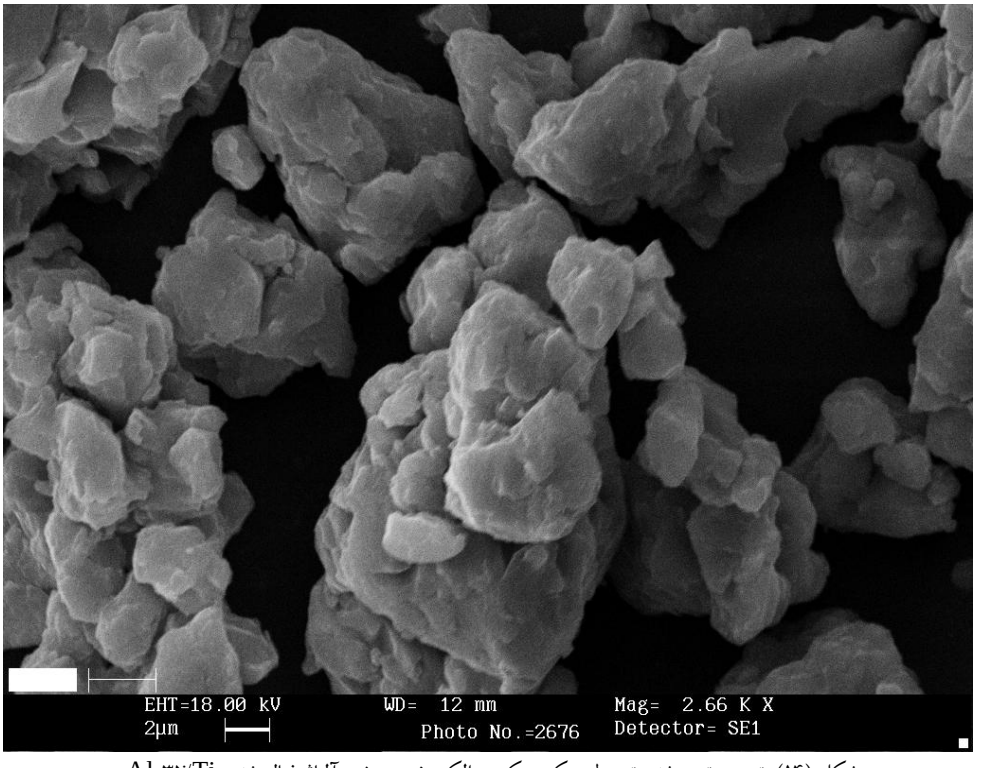
جدول (۱):میزان تیتانیوم حل شده برحسب مقدار تیتانیوم در آلیاژبا آلومینیوم

آلیاژ	زاویه پراش صفحه (۱۱۱) (2θ)	پارامتر لاتیس شبکه (Å)	Δa (Å)	میزان تیتانیوم حل شده (wt%)
Al-۵٪Ti	۱۹/۲۶۲۵	۴/۰۴۲۷	۰/۰۰۶۷	۱/۲۴
Al-۱۰٪Ti	۱۹/۲۶۲۵	۴/۰۴۲۷	۰/۰۰۶۷	۱/۲۴
Al-۱۵٪Ti	۱۹/۲۶۲۵	۴/۰۴۲۷	۰/۰۰۶۷	۱/۲۴
Al-۲۰٪Ti	۱۹/۳۱۲۵	۴/۰۳۲۶	۰/۰۱۶۸	۳/۱۱
Al-۲۵٪Ti	۱۹/۴۱۲۵	۴/۰۱۲۷	۰/۰۳۶۷	۶/۸۰
Al-۳۰٪Ti	۱۹/۵۳۷۵	۳/۹۸۷۹	۰/۰۶۱۵	۱۱/۳۹
Al-۳۵٪Ti	۱۹/۵۶۲۵	۳/۹۸۳۱	۰/۰۶۶۳	۱۲/۲۸
Al-۴۰٪Ti	۱۹/۶۶۲۵	۳/۹۶۳۶	۰/۰۸۵۸	۱۵/۸۹



شکل (۱۳):تغییرات درصد وزنی تیتانیوم حل شده برحسب درصد وزنی تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم

در شکل ۱۴ تصویر مربوط به نمونه مخلوط شده و فعال شده مربوط به آلیاژ Al-۳۵% Ti نشان داده شده است. شکل نمونه فعال شده بیانگر توزیع نامنظم و پراکنده ذرات بصورت چند لایه و بصورت گروهی از ذرات کوچک بهم چسبیده شده و آگلومره می باشد. بررسی آنالیز نقطه ای به روشEDX برروی نمونه های فعال شده بیانگرتوزیع تیتانیوم درتمام زمینه آلومینیوم می باشد.



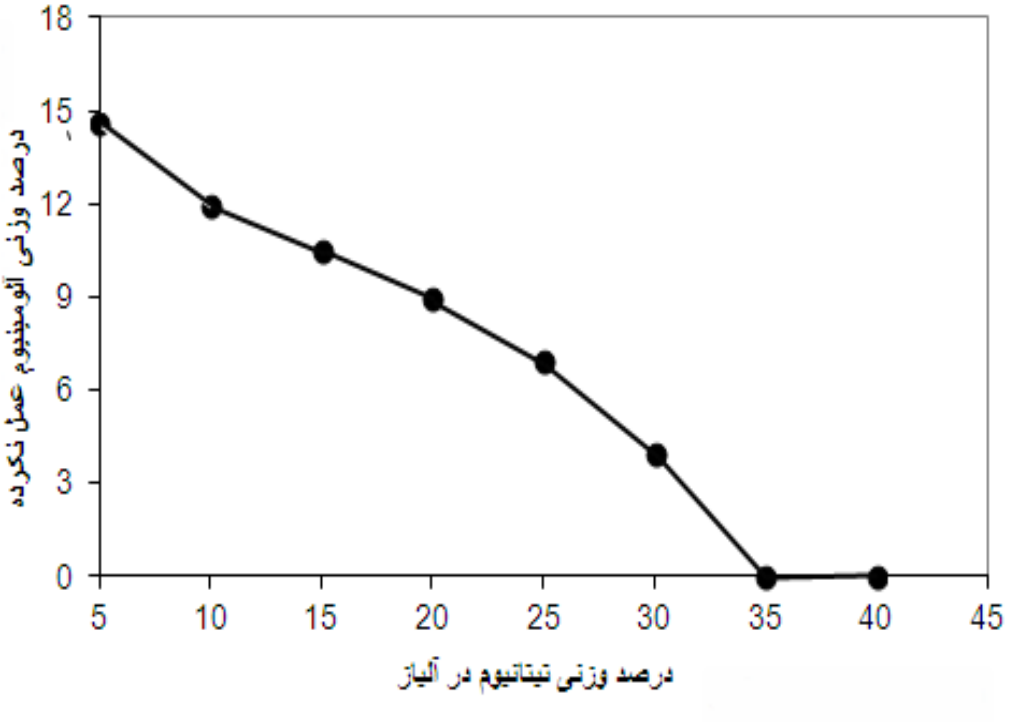
شکل (۱۴): تصویرتهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی آلیاژ فعال شده Al-۳۵٪Ti

۳-۳-تعیین میزان آلومینیوم باقیمانده در آلیاژهای سوخته Al-Ti

برای تعیین میزان آلومینیوم عمل نکرده در فرایند احتراق تحت شرایط کنترل شده، سوزاندن آلیاژ با درصدهای متفاوت از تیتانیوم درون کوره انجام گرفته است. تعیین میزان آلومینیوم باقیمانده به روش نسبت شیب ها، روش منشی، مطابق رابطه ۳ انجام گرفته است[۱۲]. در جدول ۲ و شکل ۱۵ میزان آلومینیوم عمل نکرده پس از احتراق در آلیاژ با درصد های مختلف تیتانیوم نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد با افزایش میزان تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم فعال شده به روش مکانیکی پس ازاحتراق میزان آلومینیوم عمل نکرده کاهش یافته و از حدی از تیتانیوم، آلومینیوم بطور کامل محترق گردیده است.

جدول (۲):میزان آلومینیوم عمل نکرده در احتراق آلیاژهای آلومینیوم – تیتانیوم

درصد تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
درصد آلومینیوم باقیمانده	۱۴/۶	۱۲	۱۰/۵	۹	۷	۴	۰	۰



شکل (۱۵):تغییرات درصد آلومینیوم عمل نکرده برحسب درصد تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم

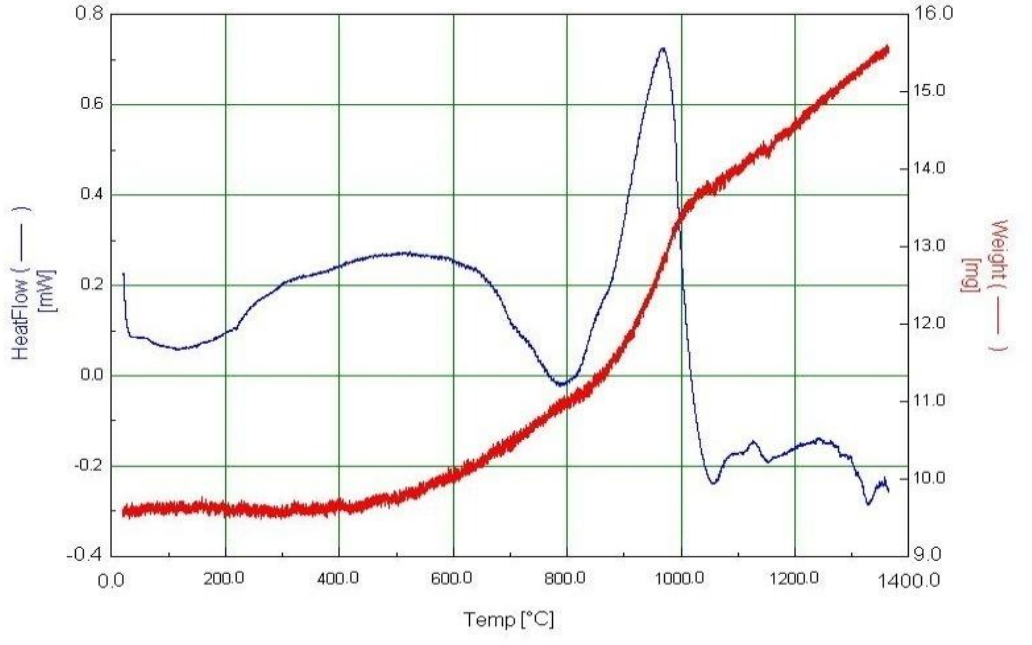
در فرایند احتراق آلومینیوم خالص، لازم است آلومینیوم در حضور اکسیژن به اکسید تبدیل گردد. در حالیکه برای آلیاژ آلومینیوم- تیتانیوم احتراق با تشکیل ترکیب های بین فلزی Al_3Ti و$AlTi$ انجام می گیرد. ترکیب هایی که تشکیل آنها گرمازا بوده و در دمایی به مراتب پایین تر از دمای اشتعال آلومینیوم خالص تشکیل آنها می تواند باعث اشتعال آلیاژ گردد [۱۱]. با توزیع تیتانیوم درحد اتمی در ساختار کریستالی، آلومینیوم با تشکیل محلول جامد و پخش شدن تیتانیوم در زمینه آلومینیوم تشکیل این ترکیب های بین فلزی در فرایند احتراق تسهیل می گردد. از این لحاظ با افزایش میزان تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم، میزان آلومینیوم محترق نگردیده کاهش یافته است.

۳-٤-تعیین درجه حرارت اشتعال آلیاژهای فعال شده Al-Ti

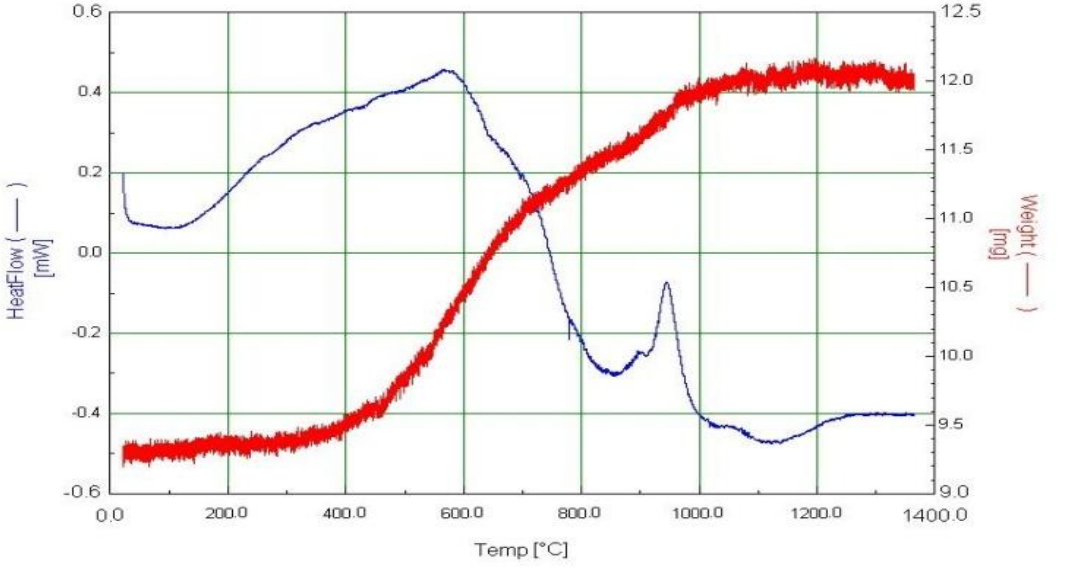
تعیین درجه حرارت اشتعال به روش DTA با اندازه گیری تغییرات گرما بر حسب درجه حرارت در گرم کردن نمونه های فعال شده انجام گرفته است. نمونه این نتایج در شکل ۱۶ و ۱۷ برای آلیاژآلومینیوم به ترتیب حاوی ۲۵و۳۰درصدوزنی تیتانیوم آورده شده است. پیک ماکزیمم گرما، درجه حرارت اشتعال نمونه فعال شده بوده که بیانگرتشکیل ترکیب های بین فلزی در فرایند احتراق می باشد. با افزایش میزان تیتانیوم به صورت محلول جامد با آلومینیوم و توزیع ذرات پراکنده تیتانیوم درزمینه آلومینیوم شرایط برای تشکیل ترکیب های میانی Al_3Ti و$AlTi$ تسهیل می گردد. در حالیکه درجه حرارت تشکیل $AlTi$ پایین تر از درجه حرارت تشکیل Al_3Ti می باشد. بنابراین کاهش درجه حرارت اشتعال برای آلیاژ فعال شده آلومینیوم- تیتانیوم با افزایش تیتانیوم می تواند ناشی از تشکیل این ترکیب های میانی باشد (شکل ۱۸).

جدول (۳):درجه حرارت اشتعال در احتراق آلیاژهای آلومینیوم – تیتانیوم

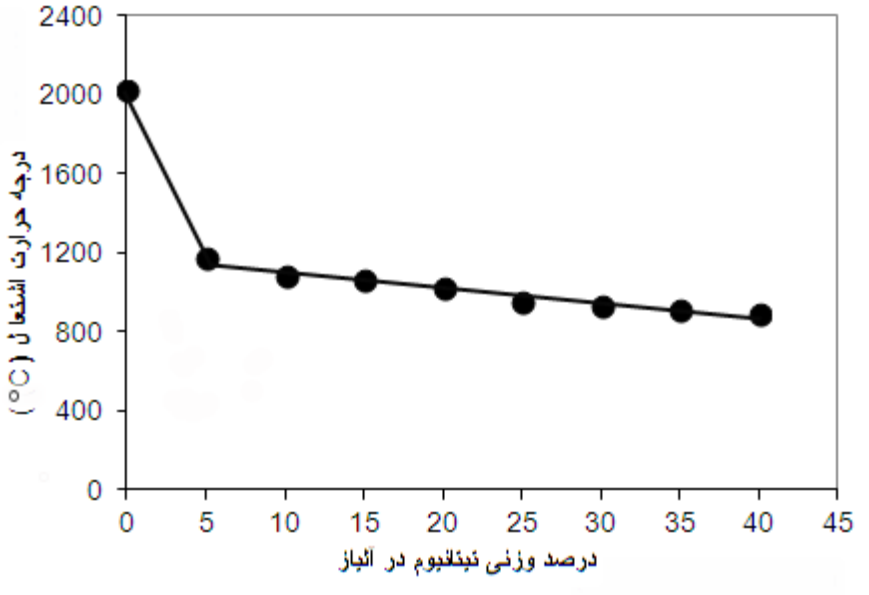
درصد تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
درجه حرارت اشتغال $(^{\circ}C)$	۱۱۸۰	۱۰۹۵	۱۰۷۵	۱۰۳۲	۹۶۰	۹۳۵	۹۱۵	۸۹۳



شکل (۱۶): نمودار DTA برای آلیاژ Al-۲۵٪Ti



شکل (۱۷): نمودار DTA برای آلیاژ Al-۳۰٪Ti



شکل (۱۸): تغییرات درجه حرارت اشتعال آلومینیوم برحسب درصد تیتانیوم در آلیاژ با آلومینیوم

٤- نتیجه گیری

۱- با افزایش زمان فعال سازی در آلیاژ آلومینیوم با درصد های متفاوت تیتانیوم کاهش شدت و پهن شدگی پیک ها رخ داده و از یک زمان پیک های تیتانیوم کاملا حذف گردیده که بیانگر انحلال تیتانیوم در آلومینیوم با تشکیل محلول جامد و توزیع تیتانیوم باقیمانده در زمینه آلومینیوم می باشد.

۲- افزایش میزان تیتانیوم حل شده با توجه به افزایش نواقص کریستالی در ساختار آلومینیوم در آلیاژ های آلومینیوم به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۲۴، ۱/۲۴، ۳/۱۱، ۶/۹۰، ۱۱/۳۹، ۲۸/۱۲ و ۱۵/۸۹ درصد وزنی تعیین گردید.

۳- کاهش میزان آلومینیوم محترق نگردیده با توجه به تغییر مکانیزم احتراق آلیاژ آلومینیوم- تیتانیوم با تشکیل ترکیب های بین فلزی نسبت به مکانیزم اکسید شدن آلومینیوم خالص در آلیاژ های آلومینیوم به ترتیب ۱۴/۶، ۱۲، ۱۰/۵، ۹، ۷، ۴، ۰، ۰ درصد وزنی تعیین گردید.

۴- کاهش درجه حرارت اشتعال با توجه به تسهیل در تشکیل ترکیب های میانی با افزایش تیتانیوم در آلیاژ های آلومینیوم به ترتیب ۱۱۸۰، ۱۰۹۵، ۱۰۷۵، ۱۰۳۲، ۹۶۰، ۹۳۵، ۹۱۵ و۸۹۳ درجه سانتیگراد تعیین گردید.

۵- مراجع

[1] T. J. Janssen, “Explosive Materials, Classification, Composition and Properties”, Nova Science Publishers, Inc, 2010.

[2] A. K. Sikder & N. Sikder, “A review of advanced high performance,insensitive and thermally stable energetic materials emerging for military and space applications”, Journal of Hazarados Materials, Vol. 112, pp.1–15, 2004.

[3] E. L .Dreizin, “Metal - Based reactive nanomaterials”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, pp. 141–167, 2009.

[4] P. Brousseau & C. J. Anderson, “Nanometric Aluminum in Explosives”, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 27, pp.300–306, 2002.

[5] X. Zhu, M. Schoenitz, & E. L. Dreizin, “Oxidation of Mechanically Alloyed Al-rich Al–Ti Powders” Oxidation of Metals, Vol. 65, pp.357–376, 2006.

[6] M. Kubota, “Properties of nano-structured pure Al produced by mechanical grinding and spark plasma sitering”, Journal of Alloys and Compounds, pp. 294–297, 2007.

[7] E. L. Dreizin, M. A. Trunov & M. Schoenitz, “Ignition of Al-Mg Mechanical Alloys Ninth International Workshop on Combustion and Propulsion ”, Novel Energetic Materials and

Applications, Lerici, La Spezia, Italy, pp. 36-40, 2003.

[8] Y. L. shoshin, & E. L. Dreizin, "Particle combustion rates for mechanically alloyed Al–Ti and aluminum powders burning in air" Combustion and Flame, Vol. 145, pp.714-722, 2006.

[۹] ا. عطایی، س. شیبانی، غ. خیاطی وس. اسدی کوهنجانی، "آلیاژ سازی وفعال سازی مکانیکی-فناوری تهیه نانو مواد"، انتشارات جهاد دانشگاهی شعبه واحد تهران،۱۳۸۵.

[10] A. Monshi, M. R. Foroghi & M. R. Monshei, "Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crysallite Size Using XRD", Scientific Research, Vol. 2, pp. 154-160, 2012.

[11] F. Zhang, L. Lu & M. O. Lai, "Study of thermal stability of mechanically alloyed Ti-75%Al powders", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 297, pp. 211–218, 2000.

[12] A. Tonejec & A. Bonefacic, "Al-RICH METASTABLE Al-Ti SOLID SOLUTIONS", Scripta Metall, Vol. 3, pp. 145-148, 1969.

[13] Y .L. Shoshin, M .A. Trunov, X .Zhu, M. Schoenitz & E. L. Dreizin, "Ignition of aluminum-rich Al–Ti mechanical alloys in air", Combustion and Flame, Vol. 144, pp.688-697. 2006.