

## مطالعه رفتار ترمودینامیکی و فیزیکی سرب در سیستم Al-Pb تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی\*

محمد تقی حامد موسویان<sup>(۱)</sup> حامد سید حسین زاده<sup>(۲)</sup> جلیل وحدتی خاکی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این تحقیق پودرهای سرب و آلومینیوم (۲۵ درصد وزنی سرب) توسط دستگاه آسیای گلوله‌ای ماهواره‌ای به صورت مکانیکی آلیاژسازی شدند. سپس پودر به دست آمده با میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDS مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی خواص حرارتی، آزمایشات DSC بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و تغییرات نقطه ذوب سرب در اثر آسیاکاری بررسی گردید. همچنین به بررسی اثر آسیاکاری بر میزان انحلال سرب در آلومینیوم و تغییرات نقطه ذوب سرب در اثر ریز شدن ذرات پرداخته شد. علی‌رغم اینکه بر طبق دیاگرام تعادلی Al-Pb دو عنصر هیچ حلالیتی در هم ندارند نتایج به دست آمده، انحلال سرب در آلومینیوم و همچنین کاهش نقطه ذوب آن در اثر آسیاکاری را نشان داد. در هنگام گرم کردن نمونه‌های آسیاکاری شده، ذرات خیلی ریز سرب در دمایی حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد رسوب کرده و باعث کاهش نقطه ذوب سرب می‌شوند؛ به طوری که نقطه ذوب سرب از ۳۲۷/۲۵ درجه سانتیگراد در نمونه آسیا نشده به ۳۱۶ درجه سانتیگراد در نمونه ۴۸ ساعت آسیاکاری شده کاهش یافته و از طرفی میزان سرب حل شده در زمینه آلومینیوم از ۰/۶۵ درصد وزنی برای نمونه ۵ ساعت آسیاکاری شده به ۰/۸۹ درصد وزنی برای نمونه ۴۸ ساعت آسیاکاری شده رسید.

**واژه‌های کلیدی** سیستم Al-Pb، آلیاژسازی مکانیکی، آنالیز حرارتی، نقطه ذوب.

### To Study Thermodynamics and Physical Behavior of Pb in Al-Pb System Fabricated by Mechanical Alloying

M.T. Hamed Musavian

H. Seied Hossein Zadeh

J. Vahdati Khaki

**Abstract** In this research, Al and Pb powders (25 wt% Pb) were subjected to mechanical alloying, using a planetary ball mill. The ball milled mixture was studied by scanning electron microscope (SEM), equipped by EDS. To study thermal behavior, DSC experiments were performed and variation of melting temperature of Pb by ball milling was investigated. In addition, solid solubility of Pb in Al was studied during ball milling. Despite this fact that based on equilibrium phase diagram there is no solid solubility in Al-Pb system, formation of a non equilibrium solid solution of Pb in Al and also a reduction in melting point of Pb by ball milling could be observed. During heating-up of ball milled samples, very fine particles of solute Pb were precipitated at about 300 °C, which caused in lowering of melting point of Pb. Melting point of Pb decreased from 327.25 °C for un-milled to 316 °C in 48 hours milled sample and also the solved Pb in Al matrix increased from 0.65 wt% for 5 hours milled sample to 0.89 wt% in 48 hours milled sample.

**Key Words** Al-Pb system, Mechanical alloying, Thermal Analysis, Melting Point.

\* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۶/۲/۴ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۷/۱/۳۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد

(۳) استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد

حالی است که در اثر آسیاکاری، طی یک فرآیند گرماگیر، سرب و آلومینیوم محلول جامد تشکیل می‌دهند. همچنین مطالعات در این زمینه نشان داده است که ضریب نفوذ سرب از آلومینیوم بیشتر می‌باشد [8].

احتمال گسترش حلالیت در سیستم Al-Pb با روش آلیاژسازی مکانیکی توسط Fang و همکارانش مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج آنها نشان داد که حد حلالیت سرب در آلومینیوم طی فرآیند آسیاکاری کمتر از ۱ درصد اتمی می‌باشد. نتایج محاسبات تئوری، حلالیت سرب در زمینه آلومینیوم را حدود ۰/۱۹ درصد اتمی سرب برآورد می‌کند [9]. مقدار محاسبه شده گرمای انحلال سرب در زمینه آلومینیوم در حدود ۱/۶۰۹ الکترون ولت (۱۵۵ kJ/mol) گزارش شده است [9]. از طرفی گرمای ذوب سرب توده‌ای ۰/۴۹۷ الکترون ولت (۴/۸ kJ/mol) است. کاملاً مشاهده می‌شود که گرمای انحلال سرب در آلومینیوم ۳۲/۲۳ مرتبه بیشتر از گرمای ذوب سرب است. افزون بر این، انحلال در حالت جامد برای سیستم Al-Pb کاملاً غیر تعادلی بوده و در صورت مناسب بودن شرایط سینتیکی، تمایل شدیدی برای تفکیک دو فاز از حالت محلول جامد به سرب و آلومینیوم خالص (فرابندی گرمازا) وجود دارد [9]. در این تحقیق، تغییرات ساختاری و رفتار ترمودینامیکی سرب، از جمله میزان حلالیت سرب در زمینه آلومینیوم و تغییرات نقطه ذوب آن، در اثر انجام آسیاکاری بر روی مخلوط Al-Pb مورد مطالعه قرار گرفته است.

### روش تحقیق

پودرهای خالص سرب و آلومینیوم با خلوص % ۹۹ > با نسبت ۲۵ درصد وزنی سرب در آسیای ماهواره‌ای مورد آسیاکاری واقع شدند. ۲۰ گرم مخلوط پودری و ۴۰۰ گرم گلوله فولادی (نسبت گلوله به پودر ۱:۲۰) با قطرهای مختلف ۲ تا ۱۰ میلی‌متر در هر آزمایش مورد

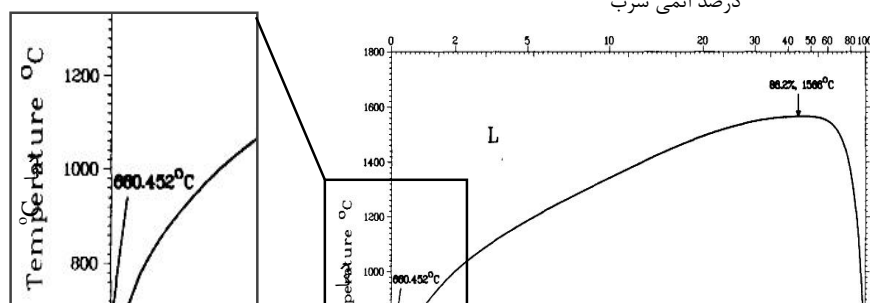
### مقدمه

در سال ۱۹۵۴ برای نخستین بار Takagi نشان داد که ذرات فوق العاده ریز پودر فلزات در دمای پایین‌تر از نقطه ذوب یک نمونه توده‌ای با همان ترکیب ذوب می‌شوند [1]. تعداد زیادی مدل ریاضی برای پیش‌بینی این رفتار توسط محققان ارائه شده است [2,6]. این مدل‌ها قادر به پیش‌گویی کاهش نقطه ذوب برای مواد با ابعاد کوچک، چه فلزی و چه کریستال‌های معدنی، می‌باشند. یکی از این مدل‌ها رابطه زیر را پیشنهاد می‌کند [6].

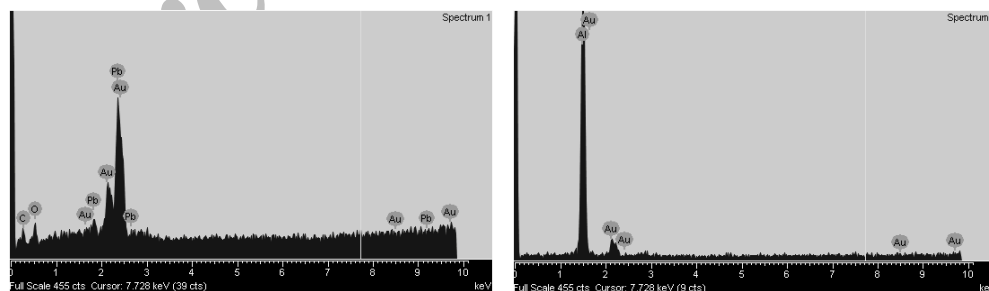
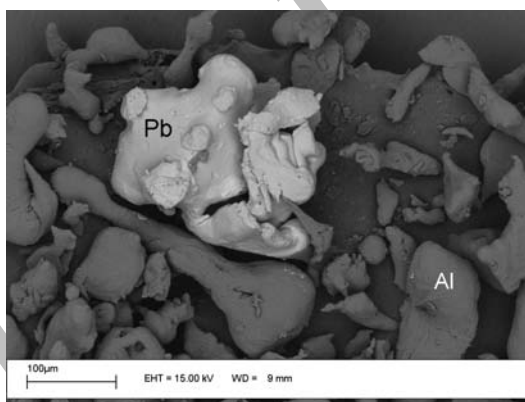
$$T_n = T_0 (1 - N/2n) \quad (1)$$

که  $T_n$  نقطه ذوب نانو ذره،  $T_0$  نقطه ذوب توده ماده،  $N$  تعداد اتم‌ها در سطح نانو ذره و  $n$  تعداد کل اتم‌های نانو ذره هستند. فرض اصلی این مدل در نظر گرفتن رابطه خطی بین انرژی پیوند با دمای ذوب است. این مدل در عین سادگی قادر به بررسی اثر اندازه ذره و همچنین شکل آن بر روی تغییرات نقطه ذوب نانو ذره می‌باشد. همان‌طور که از رابطه فوق پیداست با افزایش زمان آسیاکاری و ریز شدن ذره، نسبت اتم‌های سطح به اتم‌های کل تشکیل دهنده نانو ذره افزایش یافته و از این رو، نقطه ذوب کاهش می‌یابد.

تحقیقاتی بر روی نانو ذرات Al، In، Bi و همین‌طور نانو ذرات Pb محصور شده در زمینه Cu-Zn توسط محققان انجام شده است [2,5]. برای تهیه این نانو ذرات فلزی می‌توان از روش‌هایی مانند انجماد سریع، کاشت یونی، پاشش مذاب و آسیاکاری استفاده کرد. از این روش‌ها می‌توان برای تهیه ذرات فوق العاده ریز محصور شده در زمینه ماده دیگر نیز استفاده نمود [7]. اگر از روش آسیاکاری برای ریز کردن مخلوطی از پودرهای مختلف استفاده شود، در اثر کار مکانیکی احتمال انحلال عناصر در هم وجود دارد. در مورد سیستم Al-Pb که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است، مطابق دیاگرام فازی تعادلی، دو عنصر در حالت جامد در هم هیچ حلالیتی ندارند، (شکل ۱). این در درصد اتمی سرب



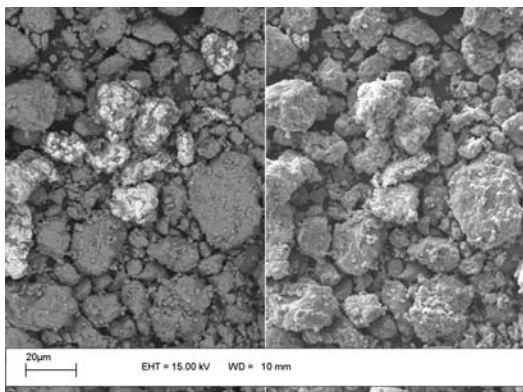
شکل ۱. دیاگرام فازی سیستم دوتایی آلومینیوم و سرب. قسمتی از دیاگرام بزرگ شده است تا عدم حلالیت تعادلی سرب در زمینه آلومینیوم نشان داده شود.



شکل ۲. تصویر الکترون برگشتی از پودرهای سرب و آلومینیوم و آنالیز EDS پودرها قبل از آسیاکاری

استفاده قرار گرفت. آسیاکاری در دمای محیط انجام شد. برای مطالعه نمونه‌ها، در زمان‌های معین مقدار کمی

آلومینیوم را کاهش می‌دهد که این امر باعث کاهش در ارتفاع پیک آلومینیوم می‌شود [10]. این مسئله در شکل (۴) قابل مشاهده است. در این شکل آنالیز اشعه ایکس نمونه مرجع و نمونه‌ای که ۴۸ ساعت آسیاکاری شده، آورده شده است. پهن شدن پیک‌های سرب و آلومینیوم مشهود است که مربوط به ریز شدن ذرات است. میزان پهن شدن برای پیک سرب بیشتر از این مقدار برای آلومینیوم است که نشان دهنده بیشتر ریز شدن ذرات سرب نسبت به آلومینیوم است. تغییری جزئی نیز در مکان پیک‌ها صورت گرفته است که مربوط به تغییر در ثابت شبکه می‌باشد. این تغییر در ثابت شبکه نیز مربوط به تغییر شکل شبکه کریستالی در اثر کار مکانیکی و همچنین تشکیل محلول جامد است.



شکل ۳ تصویر SEM از نمونه ۴ ساعت آسیاکاری شده. تصویر چپ توسط الکترون‌های برگشتی و تصویر راست توسط الکترون‌های ثانویه گرفته شده است. ناحیه روشن در تصویر سمت چپ مربوط به سرب می‌باشد.

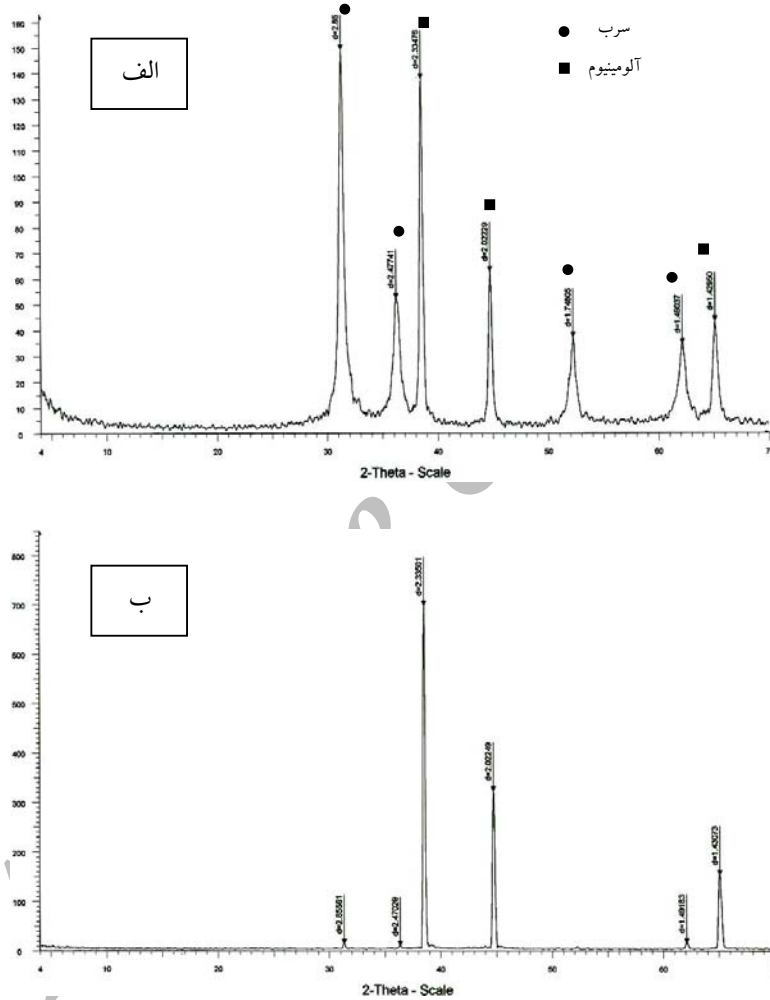
در اثر ۴ ساعت آسیاکاری، اندازه متوسط ذرات Al که در حدود ۲۰۰ میکرون در نمونه اولیه بوده، به کمتر از ۴۰ میکرون کاهش یافته است. در شکل (۳) از تصویر سمت چپ، برخی از ذرات خاکستری و برخی روشن‌تر هستند. در این تصویر تغییر رنگی از سفید تا خاکستری دیده می‌شود. آنالیز EDS این ذرات در

از مخلوط پودر آسیاکاری شده از داخل ظرف برداشته شد. زمان آسیاکاری از ۱ ساعت تا ۴۸ ساعت متغیر بود. هر کدام از نمونه‌ها برای بررسی خواص حرارتی، توسط دستگاه DSC مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، نمونه‌ای از پودرهای سرب و آلومینیوم به طور دستی مخلوط شده و به عنوان نمونه مرجع مورد آزمایش قرار گرفت. برای مطالعه تغییرات مورفولوژی و ساختاری نمونه‌ها در حین آسیاکاری، مطالعات میکروسکوپی با استفاده از SEM روی آنها انجام شد. در آزمایشات DSC، نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ ثابت ۱۰ °C/min حرارت داده شدند. دقت دستگاه DSC مورد استفاده ۱/۵ ± درجه سانتیگراد بود. همچنین برای بررسی تغییرات فازی و ساختاری از آنالیز اشعه ایکس نیز استفاده شد.

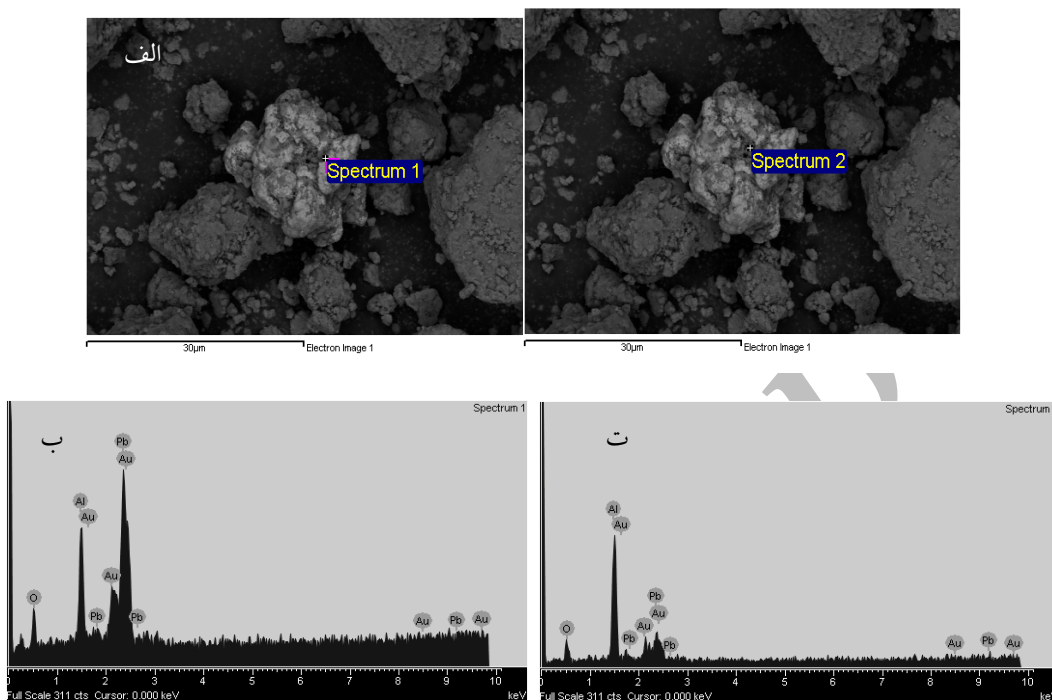
## نتایج و بحث

شکل (۲) تصویر SEM (الکترون‌های برگشتی) و آنالیز EDS پودرها را قبل از شروع آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد. در این شکل طیف سمت چپ مربوط به ذرات سفید و طیف سمت راست مربوط به ذرات خاکستری می‌باشد. در خصوص مطالعه تغییرات مورفولوژی ذرات پودر در حین آسیاکاری، شکل (۳) تصویر SEM از نمونه ۴ ساعت آسیاکاری شده را نشان می‌دهد. این شکل کاهش قابل ملاحظه اندازه ذرات آلومینیوم و سرب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ذرات سرب بسیار ریزتر شده و سطح ذرات Al را پوشانده‌اند. پوشانده شدن ذرات آلومینیوم توسط ذرات سرب به خوبی توسط آنالیز اشعه ایکس تایید می‌گردد. کاهش شدت پیک‌های آلومینیوم و افزایش آن برای سرب در آنالیز اشعه ایکس در اثر آسیاکاری مربوط به پوشیده شدن ذرات آلومینیوم با سرب است. لایه سربی که بر روی ذرات آلومینیوم ایجاد شده است با جذب اشعه ایکس، مقدار اشعه رسیده به ذرات

شکل (۵) نشان داده شده است. مناطقی که سفیدترند سرب بیشتری دارند. به علاوه این تصویر نشان می‌دهد که ذرات سرب خرد شده و روی ذرات آلومینیوم را پوشانده‌اند و هیچ ذره سرب مجزایی مشاهده نمی‌شود. در این نمونه‌های آسیا شده، ذرات سرب و آلومینیوم از یکدیگر قابل تفکیک نیستند.



شکل ۴ مقایسه آنالیز اشعه ایکس نمونه مرجع و نمونه‌ای که ۴۸ ساعت آسیاکاری شده است. الف) آنالیز نمونه‌ای که ۴۸ ساعت آسیاکاری شده است. ب) این نمودار مربوط به آنالیز نمونه مرجع است.

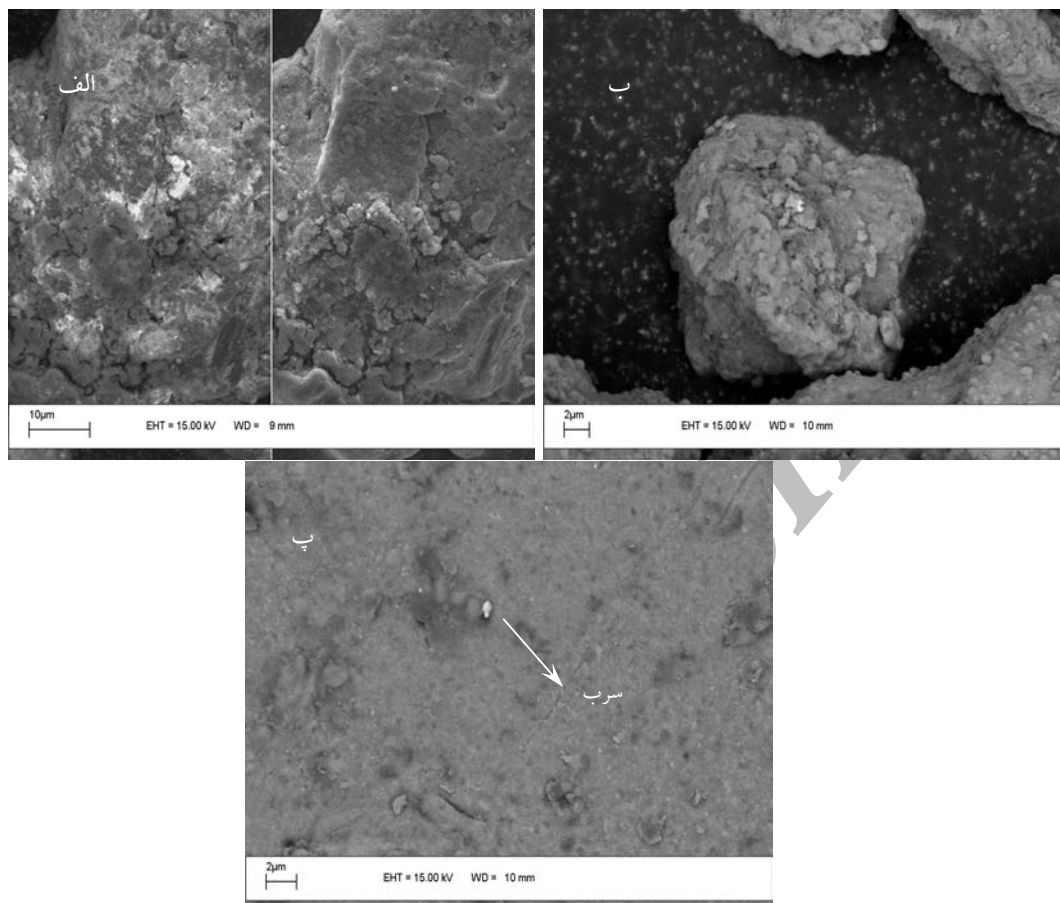


شکل ۵ الف) تصویر SEM نمونه ۴ ساعت آسیا شده ب) آنالیز EDS تصویر سمت چپ. ت) آنالیز EDS تصویر سمت راست. با مقایسه این دو آنالیز نشان داده می‌شود که مناطق سفید رنگ تر، سرب بیشتری دارند.

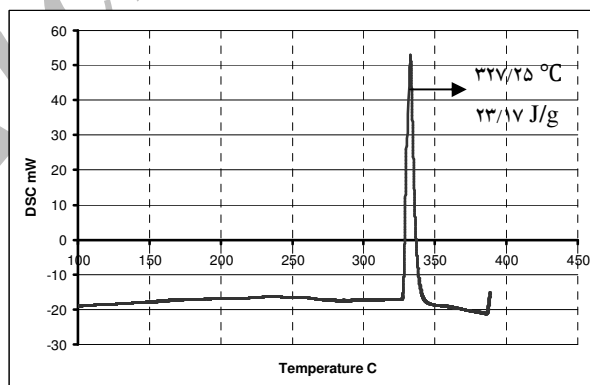
همه نمونه‌های آسیاکاری شده از ۱ تا ۴۸ ساعت انجام گرفته و نقطه ذوب سرب در هر مورد اندازه‌گیری شد. تغییرات نقطه ذوب سرب با زمان آسیاکاری در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در زمان‌های اولیه آسیاکاری افت شدیدی در نقطه ذوب سرب مشاهده می‌شود و با افزایش زمان، دمای ذوب تقریباً در یک مقدار مشخص ثابت می‌شود. نقطه ذوب سرب از  $327/15$  درجه سانتیگراد در نمونه آسیا نشده به  $316$  درجه سانتیگراد در نمونه ۴۸ ساعت آسیاکاری شده کاهش می‌یابد. مطابق مدل ریاضی ارائه شده در معادله ۱، دمای ذوب  $316$  درجه سانتیگراد متعلق به ذرات نانومتری سرب با ابعاد  $45$  نانومتری می‌باشد.

در شکل (۶) تصاویر SEM نمونه ۱۰ ساعت آسیا شده نیز نمایش داده شده که پراکندگی کامل سرب را روی سطح ذرات آلومینیوم نشان می‌دهد. بعد از بررسی‌های انجام شده توسط SEM و EDS، تمامی نمونه‌ها توسط آنالیز گرمایی DSC مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۷) آنالیز به دست آمده از DSC مخلوط اولیه پودرهای سرب و آلومینیوم قبل از آسیاکاری (نمونه مرجع) را نشان می‌دهد. نقطه ذوب سرب  $327/25$  درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. در مراجع این مقدار  $327/4$  درجه سانتیگراد گزارش شده است [11].

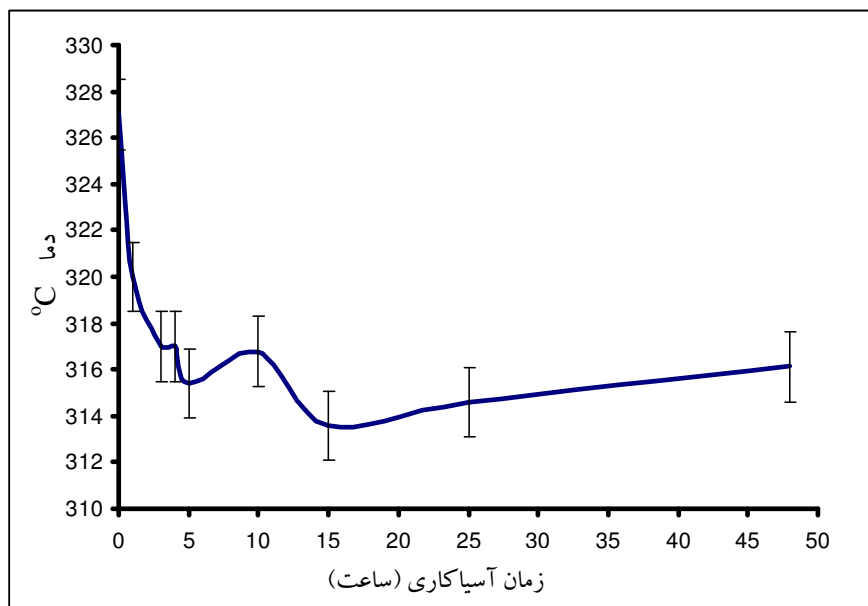
همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در منحنی DSC تنها یک پیک گرماگیر که مربوط به ذوب شدن ذرات سرب است، دیده می‌شود. آزمایش DSC بر روی



شکل ۶ تصاویر SEM از نمونه ۱۰ ساعت آسیا کاری شده (الف) تصویر سمت چپ توسط الکترون‌های برگشتی و تصویر سمت راست توسط الکترون‌های ثانویه گرفته شده است. ب و پ) تصویر الکترون‌های برگشتی در بزرگ‌نمایی بیشتر. نواحی سفید مربوط به سرب و نواحی خاکستری مربوط به آلومینیوم می‌باشد.



شکل ۷ آنالیز DSC مخلوط اولیه پودرهای سرب و آلومینیوم قبل از آسیاکاری



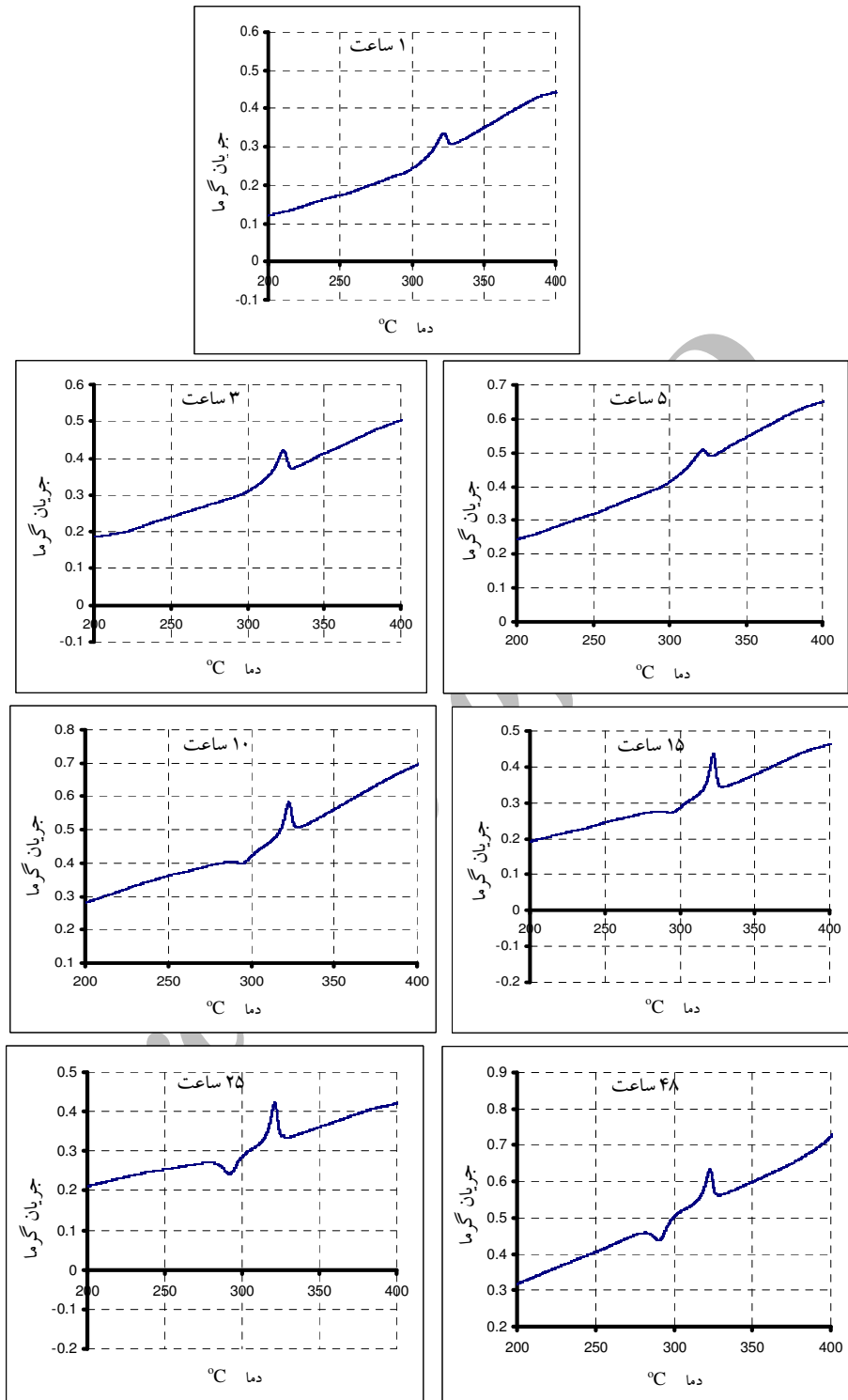
شکل ۸ تغییرات نقطه ذوب سرب با زمان آسیاکاری

برای تفکیک دو فاز از حالت محلول جامد به سرب و آلومینیوم خالص (فرآیندی گرمازا) وجود دارد، لذا می-توان این گونه استنباط نمود که در حین حرارت‌دهی نمونه‌های آسیاکاری شده، طی فرآیندی گرمازا سرب حل شده در زمینه Al در اثر آسیاکاری قبل از ذوب شدن از انحلال خارج می‌شود. در اثر این پدیده، اندازه ذرات سرب خارج شده از انحلال بسیار ریز بوده و لذا نقطه ذوب سرب کاهش می‌یابد. همانطور که نتایج DSC نشان می‌دهد، انحلال سرب در آلومینیوم در اثر آسیاکاری بسیار ناچیز بوده (۰/۸۹ درصد وزنی) و از این رو، در حین حرارت‌دهی نمونه آسیاکاری شده، اتم‌های خارج شده از شبکه آلومینیوم فرصت رشد زیادی پیدا نکرده و به صورت ذرات بسیار ریز سرب در مخلوط (روی ذرات آلومینیوم) توزیع می‌شوند. لذا ذرات سرب خارج شده از انحلال بسیار ریز بوده و نقطه ذوبی کمتر از نقطه ذوب تعادلی سرب خواهند داشت.

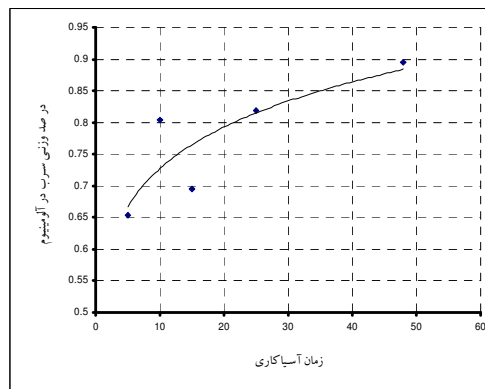
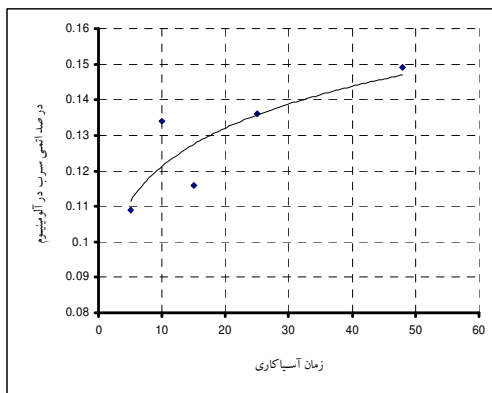
منحنی DSC نمونه‌های ۱ تا ۴۸ ساعت آسیاکاری شده نیز در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد، یک پیک گرمازا مشاهده می‌شود. این پیک در زمان‌های اولیه آسیاکاری مشاهده نمی‌شود و با افزایش زمان آسیاکاری در نمودار آنالیز حرارتی DSC ظاهر می‌شود و بر شدت آن نیز اضافه می‌گردد.

ارتباط این پیک گرمازا با اکسید شدن Al و یا Pb متفی می‌باشد. زیرا اگر این پیک مربوط به اکسید شدن نمونه باشد باید در نمونه‌های زمان‌های کمتر آسیاکاری شده نیز دیده می‌شد، چون سیکل گرم شدن تمامی نمونه‌ها در آزمایش DSC یکسان است. از طرفی همانطور که در مقدمه اشاره شد، در اثر کار مکانیکی، سرب طی یک فرآیند گرماگیر در زمینه آلومینیوم حل می‌شود. افزون بر این، انحلال در حالت جامد برای سیستم Al-Pb کاملاً غیر تعادلی بوده و تمایل شدیدی





شکل ۹ آنالیز DSC مخلوط پودر Al و Pb در زمان‌های مختلف آسیاکاری.



شکل ۱۰ تغییرات درصد اتمی و وزنی در اثر آلیاژ سازی مکانیکی

۰/۱۴۹ به ترتیب برای زمان‌های ۵ ساعت و ۴۸ ساعت آسیاکاری می‌باشد.

### نتیجه گیری

در آلیاژسازی مکانیکی Al-Pb توسط آسیاکاری، نقطه ذوب سرب با افزایش زمان آسیاکاری کاهش می‌یابد. میزان این افت دما در نقطه ذوب سرب با توان آسیا محدود می‌شود. بیشترین میزان افت دمای ذوب سرب در اثر آسیاکاری از ۳۲۷/۲۵ درجه سانتیگراد، در حدود ۱۲ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. این میزان افت دما در زمان‌های آسیاکاری بیشتر از ۱۰ ساعت مشاهده شد. خاطر نشان می‌سازد که تغییر نقطه ذوب سرب با افزایش زمان آسیاکاری (بیشتر از ۱۰ ساعت) به مقدار ثابتی در حدود ۳۱۵ درجه سانتیگراد رسید.

با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شد که ذرات سرب و آلومینیوم در اثر آسیاکاری خرد شده و از طرفی ذرات سرب بر روی ذرات Al می‌چسبند. اندازه متوسط ذرات آلومینیوم که کمتر از ۲۰۰ میکرون قبل از آسیاکاری بوده، به کمتر از ۴۰ میکرون در اثر ۱۰ ساعت آسیاکاری کاهش یافته است. از طرفی چسبیدن ذرات سرب بر روی ذرات

همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود این پیک گرمازا قبل از ذوب سرب ظاهر شده و در زمان‌های بیشتر آسیاکاری واضح‌تر می‌باشد؛ زیرا با افزایش زمان آسیاکاری میزان سرب حل شده به صورت غیر تعادلی در آلومینیوم افزایش یافته است. بعداً در آزمایش DSC و ضمن حرارت دادن، این سرب از حلالیت خارج شده و پیک گرمازا در منحنی DSC ایجاد می‌نماید. از طرفی مقدار محاسبه شده گرمای انحلال سرب در زمینه آلومینیوم در حدود ۱/۶۰۹ الکترون ولت برای یک اتم (۱۵۵ kJ/mol) گزارش شده است [۹]. با داشتن میزان گرمای آزاد شده برای هر کدام از نمونه‌ها در اثر این فرآیند گرمای به دست آمده از آنالیز DSC، می‌توان درصد انحلال اتم‌های سرب را در اثر آسیاکاری محاسبه کرد. تغییرات در صد وزنی سرب حل شده در زمینه آلومینیوم در اثر کار مکانیکی بر حسب زمان آسیاکاری محاسبه شده و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با افزایش زمان، میزان سرب حل شده در زمینه آلومینیوم از ۰/۶۵ درصد وزنی سرب در اثر ۵ ساعت آسیاکاری به ۰/۸۹ درصد وزنی سرب در اثر ۴۸ ساعت آسیاکاری رسیده است. تغییرات در صد اتمی سرب نیز در سمت چپ شکل ۱۰ نشان داده شده است که از ۰/۱۰۹ تا

آسیاکاری شده به ۰/۸۹ درصد وزنی سرب در نمونه ۴۸ ساعت آسیاکاری شده رسیده است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که در اثر آسیاکاری مخلوط سرب و آلومینیوم، سرب به صورت غیر تعادلی در آلومینیوم حل می شود. سپس در حین حرارت دهی نمونه آسیاکاری شده، ابتدا سرب در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سانتیگراد از انحلال خارج شده و در ادامه ذرات بسیار ریز سرب رسوبی در دمایی پایین تر از نقطه ذوب تعادلی ذوب می شوند.

آلومینیوم با آنالیز اشعه ایکس تأیید گردید. همچنین با آنالیز اشعه ایکس نشان داده شد که ذرات سرب بیشتر از آلومینیوم ریز شده اند.

در آنالیز DSC یک پیک گرمازا در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد که با بررسی ارتباط این پیک با خارج شدن اتم های سرب از زمینه آلومینیوم، نشان داده شد که با افزایش زمان آسیاکاری بر روی مخلوط پودرهای آلومینیوم و سرب (۲۵ درصد وزنی سرب)، میزان سرب حل شده در زمینه آلومینیوم از ۰/۶۵ درصد وزنی سرب برای نمونه ۵ ساعت

## مراجع

1. Jiang, Q., Zhang, Z. and Wang, Y.W., "Thermal stability of low dimensional crystals", *Mat. Sci. Eng. A*, 286, pp. 139-143, (2000).
2. Lai, S. L., Carlsson, J. R. A. and Allen, L. H., "Melting point depression of Al clusters generated during the early stages of film growth: Nanocalorimetry measurements", *Appl. Phys. Lett.*, 72(9), pp. 1098-1100 (1998).
3. Zhao, M. and Jiang, Q., "Melting and surface melting of low-dimensional In crystals", *Solid State Commun.*, 130, pp. 37-39, (2004).
4. Liang, L. H., Li, J. C. and Jiang, Q., "Size-dependent melting depression and lattice contraction of Bi nanocrystals", *Phys. B*, 334, pp. 49-53, (2003).
5. Goswami, R., Chattopadhyay, K. and Ryder, P. L., "Melting of Pb particles embedded in Cu-Zn matrices", *Acta mater.*, 46(12), pp. 4257-4271, (1998).
6. Qi, W. H., "Size effect on melting temperature of nanosolids", *Phys. B*, 368, pp. 46-50, (2005).
7. Sheng, H. W., Hu, Z. Q. and Lu, K., "Melting and freezing behaviors of Pb nanoparticles embedded in Al matrix", *NanoStr. Mater.*, 9, pp. 661-664, (1997).
8. Fang, F., Zhu, M., Deng, H. Q., Shu, X. L. and Hu, W. Y., "Self-diffusion of Al and Pb atoms in Al-Pb immiscible alloy system", *Mat. Sci. Eng. B*, 108, pp. 253-257, (2004).
9. Fang, F., Zeng, M. Q., Che, X. Z. and Zhu, M., "Embedded atom potential calculation of the Al-Pb immiscible alloy system", *J. Alloys Compd.*, 340, pp. 252-255, (2002).
10. Zhu, M., Che, X. Z., Li, Z. X., Lai, J. K. L. and Qi, M., "Mechanical alloying of immiscible Pb-Al binary system by high energy ball milling", *J. Mate. Sci.*, 33, pp. 5873 - 5881, (1998).
11. Dictionary of science and technology, Vol. 2, Chambers LTD, Edinburg (1982).