تاثیر فاز تقویت کننده و آنیلینگ بر ریزساختار کامپوزیت نانوساختار Al-Mg/Al O تولید شده توسط فرایند آلیاژسازی مکانیکی

منوچهر سبحانی*۱

' دانشگاه سمنان، دانشکاره مهندسی مواد و متالورژی، سمنان، ایران.

تاريخ ثبت اوليه: ١٣٩٢/١٢/١٢، تاريخ دريافت نسخة اصلاح شده: ١٣٩٥/١/١٩، تاريخ پذيرش قطعى: ١٣٩٥/٢/٢٤

چکیده در تحقیق حاضر تاثیر افزایش درصد آلومینا به مقدار ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی و فرایند آنیلینگ بر ریزساختار کامپوزیت ۸۰ Mg/A۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. فرایند آسیاکاری در یک آسیای سیارهای انرژی بالا تحت اتمسفر آرگون انجام شد. سپس پودرها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۵ دقیقه آنیل شدند. برای بررسی مورفولوژی و اندازه ذرات پودر از تکنیک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. آنالیز پراش اشعه ایکس(XRD) برای تعیین اندازه دانه، کرنش شبکه، پارامتر شبکه و تشخیص فازهای تشکیل شده، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ذرات آلومینا باعث تسریع در فرایند آلیاژسازی مکانیکی شده و یک حالت پایا در ذرات پودر حاصل می شود. افزایش درصد آلومینا منجر به کاهش اندازه دانه از حدود ۳۲ میکرون به ۱۵ میکرون، افزایش کرنش شبکه تا ۲٫۰ درصد و افزایش پارامتر شبکه قبل از آنیل و ممانعت از افزایش بیش از حد اندازه دانه از خدود ۳۲ میکرون فرایند آلیلینگ به دلیل پدیده آگلومراسیون افزایش اندازه ذرات پودر ماصل می شود. افزایش درصد آلومینا منجر به کاهش اندازه دانه از حدود ۳۲ میکرون فرایند آنیلینگ به دلیل پدیده آگلومراسیون افزایش اندازه ذرات پودر ماهده گردید. همچنین به دلیل انجام فرایند بازبلوری (rerystallization) افزایش اندازه دانه، کاهش کرنش شبکه و کاهش پارامتر شبکه مشاهده شد. برای نمونه های با درصد بالاتر فایند بازبلوری (rerystallization) افزایش اندازه دانه، کاهش کرنش شبکه و کاهش پارامتر شبکه مشاهده شد. برای نمونه های با درصد بالاتر فاز تقوبت کننده تغییرات ریزساختار بعد از شد. همچنین بعد از آنیل تشکیل فاز بارهای داری در یکهای XRD مشاهده شده که این فاز تا حدی از فرایند بازبلوری در نمونهها جلوگیری میکند.

كلمات كليدى: كامپوزيت نانوساختار، آلياژسازى مكانيكى، ريزساختار، آنيلينگ.

Reinforcement and Annealing Effect on Microstructural Properties of Al-10Mg/Al₂O₃ Nanocomposites Prepared with Mechanical Alloying Techniques

Manoochehr Sobhani*1

¹ Semnan University, Faculty of Materials & Metallurgical Engineering, Semnan, Iran.

Abstract In the present work the Al_2O_3 content (0, 5, 10, 15 wt%) and annealing effect on the microstructural properties of Al-10Mg alloy was investigated. The milling process of the composites was carried out under argon atmosphere. Milled powders were pressed and annealed at 400 °C for 45 min. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) devices were applied to microstructural and phase transformations studies of the prepared composites. The results show that the mechanical alloying process accelerates due to alumina content increment and it results in the formation of a steady-state condition. The alumina increasing cause to decrement of the matrix grain size from 32 to about 15 µm before annealing and it prevent the abnormal grain growth after annealing. Increasing in the grain size occurs after annealing process due to the particles agglomeration. Also, grain growth, lattice strain decrement and lattice parameter decrement were observed as a result of recrystallization. The microstructural did not show significant changes for the samples with high quantity of alumina. Formation of Al_3Mg_2 phase after annealing, observed at the X-ray patterns, can prevent from further grain growth.

Keywords: Nanostructured Composite, Mechanical Alloying, Microstructure, Annealing.

نشانی: سمنان، روبروی پارک سوکان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، تلفن: ۲۳۳۳۴۹۹۷۶ - ۹۱۵۵۰۲۲۳۷۹، دورنگار: ۲۳۳۳۶۵۴۱۱۹

پیام نگار: m.sobhani@semnan.ac.ir

فصلنامه مواد و فناوریهای پیشرفته

۱ – مقدمه

كامپوزیتهای زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی تهیه شده توسط فرایند آلیاژسازی مکانیکی و به ویژه کامپوزیتهای Al-AlrOr به دلیل همگن بودن خواص آنها در جهات مختلف و قابلیت شکل پذیری خوب این مواد به طورگسترده در صنایع خودروسازی و صنایع هوافضا مورد مطالعه و استفاده قرار گرفتهانـد [۶–۱]. بـا وجـود تحقيقـات انجام شده بر بهبود خواص کامپوزیتهای زمینه آلومینیم تولید کامپوزیتهای زمینه آلومینیم تقویت شده با آلومینا به روش آلیاژسازی مکانیکی، استفاده از زمینه آلومینیم آلیاژی یا استفاده از زمینه های دوتایی Al-X (...) X= Cu, Mg, Si, ...) ما به جای آلومینیم خالص خیلی کم بررسی شده است. در این میان آلیاژ آلومينيم- منيزيم (Al-Mg) به دليل استحكام مخصوص بـالا و مقاومت به خوردگی خوب که باعث کاربرد زیاد این آلیاژ در صنایع هوافضا، اتومبیل سازی و بسیاری دیگر از کاربردهای ساختاری شده، به عنوان زمینه برای کامپوزیتها مورد توجه قرار گرفته است [٧]. مقدار تعادلی حلالیت منیزیم در آلومینیم در دمای اتاق، زیر یک درصد اتمی [۸] گزارش شده که طبق تحقیقات انجام شدہ این مقدار بے کمک فرایند آلیاژسازی مکانیکی تا حد زیادی افزایش مییاب۔د [۱، ۹]. تقویـت زمینـه آلومینیمی نرم با تقویت کنندههای سفت تـر و سـخت تـر مثـل اکسیدها یک ترکیبی از خواص هر دوی زمینه و فاز ثانویه را تامین میکند که این باعث اصلاح خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت میشود. از طرفی خـواص مکـانیکی کامپوزیـت بـا افزایش کسر حجمی و کاهش اندازه ذرات تقویت کننده بهبود مى يابد [١٠،١١].

در اغلب موارد هدف از آسیاکاری انرژی بالا تولید مواد بالک یا ترکیباتی با خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب میباشد. در این موارد، یکپارچه سازی پودر آسیا شده یک فرایند ضروری برای به دست آوردن اهداف نهایی است. از طرفی حفظ ساختار نانو در نمونه نهایی به منظور خواص خوب مواد ضروری میباشد. بنابراین با توجه به کاربردهای مواد کامپوزیتی به خصوص در دماهای بالا، بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر تغییرات ریزساختار و خواص این کامپوزیتها امری اجتنابناپذیر است. بنابراین هدف از تحقیق

حاضر بررسی اثر افزایش درصد فاز تقویت کننده (AlrOr) و عملیات حرارتی بر مورفولوژی و ریزساختار کامپوزیت نانوساختار ۱۰ Mg/AlrOr اماست.

۲– روش تحقيق

در این تحقیق برای تهیه نمونه کامپوزیتی Al-۱۰ Mg/Al_rO_r ، > ۲۳ میکرون) با ۱۰ درصد وزنی Mg (۹۹٪ ، > ۱۳۶ میکرون) به ترتیب با ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی یودر Al_rO_r (> ۱۳۵ میکرون) که همگی محصول کمپانی Merck بودند در یک آسیای سیارهای انرژی بالا مدل Fritsch با کاپ و گلوله فولادی تحت اتمسفر آرگون آسیا شدند. نسبت گلوله به پودر استفاده شده ثابت و برابر ۱ : ۲۰ و سرعت حرکت محفظه آسیا ۲۵۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ ساعت انتخاب گردید [۶]. سپس نمونههای یودری به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد تحت اتمسفر آرگون تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. مورفولوژی و شکل ذرات پودر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan MV۲۳۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین اندازه ذرات پودر به روش Tangential method از روی تصاویر SEM محاسبه شد. برای بررسی اثر افزایش آلومینا بر اندازه دانه زمینه و میزان کرنش اعمال شده به ذرات پودربه کمک الگوی تفرق اشعه ایکس (XRD) از رابطه زير كه معروف به رابطه ويليامسون – هال است استفاده شد [۱۲].

 $\beta_{\rm s} \cos\theta = 2(\epsilon) \sin\theta + k\lambda/D$

معادله (۱)

در این رابطه λ طول موج اشعه ایکس θ . هستند. θ . هستند. $(K=\cdot/9)$ و λ ثابت شرر ($K=\cdot/9$) هستند. زاویه تفرق، D اندازه دانههای کریستالی، ٤ کرنش داخلی ذرات پودر و β_s پهنای پیک در نصف ارتفاع ماکزیمم (بر حسب رادیان) میباشند. همچنین جهت کاهش خطاهای دستگاهی مقادیر β_s و 20 با استفاده از نتایج نمونه مرجع سیلیکونی تصحیح شدند.



Al – ۱۰ Mg/۱۰Al₂O₃ (c) Al – ۱۰ Mg/۵ Al₂O₃ (b) Al – ۱۰ Mg (a) شکل ۱. تصاویر SEM نمونههای (c) Al – ۱۰ Mg/۱۵ Al₂O₃ (d) بعد از ۲۰ ساعت آسیاکاری.

$$\sin^2 \theta_{k\alpha_1} = \left(\frac{\lambda^{2K\alpha_1}}{\lambda^{2K\alpha_2}}\right) \sin^2 \theta_{K\alpha_2}$$
 (۴) معادله ($\lambda_{K\alpha_1} = \cdot/10^{\circ} \cdot 0^{\circ}$ و $\lambda_{K\alpha_2} = \cdot/10^{\circ}$

درصد آلومینا از روش کوهن [۱۳] استفاده شد و نتایج با کارت (JCPDS (۰۰۴–۰۷۸۷ مقایسه گردید. در این روش با محاسبه مقادیر α=h۲+k۲+۱۲ و همچنین δ=۱۰Sin^۲۲θ و جایگذاری آنها در معادلات زیر یک دستگاه دو معادله دو مجهول تشکیل میشود.

برای بررسی تغییرات پارامتر شبکه (a₀) با افزایش

$$\sum \alpha \sin^2 \theta_{K\alpha_1} = A \sum \alpha^2 + C \sum \alpha \delta \qquad (1)$$

$$\sum \delta \sin^2 \theta_{K\alpha_1} = A \sum \alpha \delta + C \sum \delta^2 \qquad (2)$$
Analog (2)

با حل این دستگاه مقادیر ثابت A و C به دست میآیند. سپس با قرار دادن مقدار A در رابطه زیر پارامتر شبکه (a₀) محاسبه میشود:

$$A = \lambda_{K\alpha_1}^2 4a_0^2 \qquad \qquad (a)$$

شکل (۱) تصویر SEM نمونههای پودری با ترکیبات مختلف آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت را نشان میدهد. برای نمونه تقویت نشده یک مورفولوژی با اندازه ذرات درشت و توزیع غیر یکنواخت مشاهده می شود.



شکل ۲. تصاویر SEM نمونههای (Al - ۱۰ Mg/۵ Al_rOr (b) Al - ۱۰ Mg (a) آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت و سپس آنیل شده.

این غیر یکنواختی بیانگر غالب بودن فرایند جوش سرد در این مرحله می باشد [۱۴]. با افزایش درصد فاز تقویت کننده AlrOr اندازه ذرات پودر ریزتر و توزیع ذرات پودر یکنواخت میشود. این نشان میدهد که ذرات آلومینا باعث ایجاد یک تعادل بین مکانیزم جوش سرد و فرایند شکست و همچنین یک حالت پایا در ذرات پودر حاصل میگردد[۳، ۱۵]. ذرات آلومینا با دو مکانیزم متفاوت بر کاهش اندازه ذرات پودر زمینه تاثیر می گذارد، اولا با قرار گرفتن در بین ذرات پودر زمینه باعث افزایش کارسختی پودر زمینه میشود و ثانیا چون ذرات آلومینا ترد و شکننده هستند در اثر تغییر فرم زیاد در حین آسیاکاری شکسته شده و منشا ایجاد ترک در زمینه آلومینیمی میگردند. در نتيجه به دليل ترد شدن ذرات پودر با افزايش كار سختي آنها شکسته شده و اندازه ذرات پودر کاهش مییابد. بنابراین افزایش ذرات آلومینا باعث تسریع در فرایند آلیاژسازی مکانیکی و ایجاد یک حالت پایا در مورفولوژی ذرات پودر می شود. شکل (۲) تصویر SEM نمونه های Al – ۱۰Mg و Al -۱۰ Mg/۵AlrOr بعد از عملیات حرارتی نشان میدهد. همان طور که از شکل مشخص میباشد بعد از آنیل پودرها به هم چسبیده و فرایند آگلومراسیون تا حدی در ذرات پودر اتفاق افتاده و اندازه ذرات پودر درشتتر شدهاند. با این وجود فرايند آگلومراسيون در حضور ذرات تقويت کننده ترد و شکننده Al_rO_r کمتر ایجاد شده است. اندازه ذرات پودر در نمونههای مختلف قبل و بعد از آنیلینگ در شکل (۳) مشاهده می شود. همان طور که از شکل مشخص است با افزایش درصد فاز تقویت کننده اندازه ذرات پودر از حدود ۳۲ میکرون به ۱۵ میکرون کاهش می یابد، که این به دلیل حضور فاز ترد و

شکننده آلومینا در زمینه کامپوزیت می باشد. بعد از عملیات حرارتی به دلیل آگلومره شدن ذرات پودر اندازه آنها افزایش می یابد. در نمونه تقویت نشده به دلیل نرمتر بودن پودرها آگلومراسیون بیشتری اتفاق می افتد و در نمونه با ۱۵ درصد وزنی - Al_rO_r آگلومراسیون کمتری ایجاد می شود.



بعد از آنیلینگ.

شکل (۴) الگوی پراش اشعه ایکس نمونههای کامپوزیتی با ترکیبات مختلف آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت قبل از آنیلینگ (شکل ۴۵) و بعد از آنیلینگ (شکل ۴۵) را نشان میدهد. در الگوی XRD همه نمونهها قبل از عملیات حرارتی فقط پیکهای مربوط به محلول جامد آلومینیم – منیزیم (۸(Mg)) دیده میشود زیرا منیزیم در آلومینیم حل شده و پیکهای آن حذف و تشکیل محلول جامد میدهد [۱۹– ۱۶]. همچنین شدت پیکهای آلومینا به دلیل کاهش اندازه این ذرات بعد از ۳۰ ساعت آسیاکاری تا زیر میکرون کاهش یافته [۲۰،۱۰] و

دیده نمی شوند. با افزایش درصد فاز تقویت کننده افزایش پهنا و کاهش در شدت پیکها مشاهده می شود که نشان دهنده کاهش اندازه کریستالها و افزایش کرنش داخلی شبکه است [۱]. در الگوی پراش XRD این نمونه بعد از فرایند آنیلینگ کاهش در پهنا و افزایش در شدت پیکها مشاهده می گردد که نشان دهنده کاهش کرنش داخلی شبکه و افزایش اندازه کریستالها است. همچنین تشکیل فاز ۸lm Kg در اندازه کریستالها است. همچنین تشکیل فاز می مشاهده شد. الگوی پراش XRD همه نمونهها بعد از آنیلینگ مشاهده شد. کم بودن شدت پیکهای این فاز را می توان به حجم کم فاز تشکیل شده و ریز بودن ذرات آن نسبت داد [۱۰].



شکل ۴. الگوهای پراش اشعه ایکس نمونههای پودری مختلف آسیا شده به مدت ۲۰ ساعت (a) قبل از آنیلینگ (b) بعد از آنیلینگ.

شکل (۵) تغییرات اندازه کریستال بر حسب افزایش درصد آلومینا قبل و بعد از آنیلینگ را نشان میدهد. همان طور که مشخص است قبل از آنیلینگ با افزایش درصد فاز تقویت کننده کاهش تا زیر ۱۰ نانومتر را نشان میدهد. به طور کلی تغییر فرم پلاستیک شدید در ذرات پودر حین آسیاکاری منجر با افزایش عیوب کریستالی مثل عیوب نقطهای، نابجاییها و غیره میشود [۱۳، ۲۱]. وجود عیوب کریستالی باعث افزایش

انرژی سیستم و افزایش کرنش شبکه می گردد. به منظور جبران اثر ذکر شده نابجاییها به یک سمتی با انرژی کمتر تغییر جهت داده و دانه های فرعی را تشکیل می دهند. در نهایت در اثر کار مکانیکی با چرخیدن دانههای فرعی و لغزش مرزدانهها، دانههای فرعی به دانههای اصلی تبدیل میشوند که این امر باعث ریزدانگی و تشکیل ساختار نانوکریستالی در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی میگردد [۱۳، ۲۱، ۲۲]. از طرف دیگر ذرات آلومينا ذرات سختي هستند كه وقتي در بين ذرات فاز زمينه قرار مي گيرند، اطراف خود يک کرنش موضعي ايجاد مي كنند كه اين امر باعث افزايش دانسيته نابجايي ها مي شود. در نتيجه با افزايش درصد فاز تقويت كننده كاهش اندازه دانه تسریع می گردد. بعد از فرایند آنیلینگ به دلیل فرایند باز بلوری اندازه دانه برای همه نمونهها افزایش می یابد. از طرفی افزایش اندازه کریستالها برای مقادیر بالاتر آلومینا با سرعت کمتری اتفاق افتاده است. ذرات آلومینا در حین فرایند آسیاکاری خرد شده و درزمینه پراکنده می گردد و می توانند مانعی برای افزایش انداره دانه شوند. همچنین تشکیل فاز AlrMgr بعد از عملیات حرارتی نیز می تواند فرایند بازیابی و تبلور مجدد را به تاخیر انداخته و از رشد بیش از حد اندازه دانه ها جلوگیری کند.



شکل ۵. تغییرات اندازه کریستال برحسب درصد فاز تقویت کننده قبل و بعد از آنیلینگ.

بعد از آنیل کردن اندازه کریستال همه نمونه ها در حد نانومتری باقی می ماند. میزان کرنش شبکه نمونه های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود نمونه تفویت نشده کم ترین و برای نمونه با ۱۵ درصد وزنی اما ۲۰۲۰ بالاترین مقدار کرنش شبکه را دارند. این افزایش کرنش به دلیل ورود نابجایی ها، تهی جاها و دیگر عیوب شبکهای به

درون ماده میباشد که با افزایش فاز تقویت کننده درصـد ایـن عیوب بیشتر میشود.



بعد از فرایند آنیلینگ کاهش کرنش شبکه برای همه نمونهها قابل توجه است ولی این کاهش برای نمونههای کامپوزیتی با مقادیرتقویت کننده بیشتر کمتر میباشد. این امر نشان میدهد که فرایند باز بلوری برای نمونه تقویت نشده بیشتر اتفاق افتاده و سپس متوقف شده است. شکل ۷ اندازه پارامتر شبکه را برای نمونههای کامپوزیتی با درصدهای مختلف آلومینا نشان میدهد. با افزایش درصد فاز تقویت کننده پارامتر شبکه افزایش بیشتری دارد [۲۳]. این موضوع را میتوان بعد از فرایند آنیلینگ به دلیل افزایش اندازه دانه، پارامتر شبکه برای همه نمونهها کاهش مییابد. از طرفی در نمونه تقویت نشده به دلیل افزایش بیشتر اندازه دانه، پارامتر شبکه نشده به دلیل افزایش بیشتر اندازه دانه، پارامتر شبکه



۴- نتیجه گیری

. افزایش ذرات آلومینا باعث کاهش اندازه ذرات پودر از ۳۲ به ۱۵ میکرون، تسریع در فرایند آلیاژسازی مکانیکی و ایجاد یک حالت پایا در مورفولوژی ذرات پودر میشود.

. افزایش درصد مAl_tOr منجر به کاهش اندازه کریستالیدها به کمتر از ۱۰ نانومتر، افزایش کرنش شبکه و افزایش پارامتر شبکه نمونههای کامپوزیتی میشود.

. بعد از فرایند آنیلینگ به دلیل ایجاد فرایند آگلومراسیون اندازه ذرات افزایش مییابد ولی در نمونههای تقویت شده با ذرات آلومینا افزایش اندازه ذرات با سرعت کمتری اتفاق میافتد.

. بعد از فرایند آنیلینگ اندازه کریستالها افزایش مییابد ولی با افزایش آلومینا افزایش اندازه دانهها با سرعت کمتری انجام میشود و در محدوده زیر ۴۰ نانوباقی میماند. همچنین کرنش شبکه و پارامتر شبکه نمونهها کاهش مییابد. . بعد از فرایند آنیلینگ تشکیل فاز ۲۰۲۰ Alr میتواند فرایند بازیابی و تبلور مجدد را کند کرده و در نهایت آن را متوقف کند.

مراجع

- Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling, Journal of Progress in Materials Science, 2001, 46, 1-184.
- Fogagnolo, J.B., Ruiz-Navas, E.M., Robert, M.H., Torralba, J.M., The effects of mechanical alloying on the compressibility of aluminium matrix composite powder, *journal of Materials Science and Engineering A*, 2003, 355, 50-55.
- Fogagnolo, J.B., Robert, M.H., Torralba, J.M., Mechanically alloyed AlN particle-reinforced Al-6061 matrix composites: Powder processing, consolidation and mechanical strength and hardness of the as-extruded materials, *journal of Materials Science and Engineering* A, 2006,426, 85-94.
- Tavoosi, M., Karimzadeh, F., Enayati, M.H., Fabrication of Al–Zn/α-Al₂O₃ nanocomposite by mechanical alloying, *Journal of Materials Letters*, 2008, 62, 282– 285.
- Huo, H., Woo, K.D., In situsynthesis of Al₂O₃ particulate-reinforced Al matrix composite by low temperature sintering, *Journal of Materials Science and Engineering*, 2006, 41, 3249–3253.
- Zebarjad, S.M., Sajjadi, S.A., Dependency of physical and mechanical properties of mechanical alloyed Al– Al₂O₃ composite on milling time, *Journal of Materials* and Design, 2007, 28, 2113–2120.
- Al-Aqeeli, N., Mendoza-Suarez, G., Suryanarayana, C., Drew, R.A.L., Development of new Al-based nanocomposites by mechanical alloying, *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2008, 480, 392– 396.

- Scudino, S., Sakaliyska, M., Surreddi, K.B., Eckert, J., Mechanical alloying and milling of Al–Mg alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 483, 2-7.
- Crivello, J. C., Nobuki, T., Kuji, T., Limits of the MgeAl g-phase range by ball-milling, Intermetallics, 2007, 15, 1432-1437.
- Hamana, D., Baziz, L., Bouchear, M., Kinetics and mechanism of formation and transformation of metastable β'-phase in Al–Mg alloys, *Materials Chemistry and Physics*, 2004, 84, 112-119.
- Singh, D., Suryanarayana, C., Mertus, L., Chen, R.H., Extended homogeneity range of intermetallic phases in mechanically alloyed Mg–Al alloys *Intermetallics*, 2003, 11, 96-99.
- Zhao, L., Zwick, J., Lugscheider, E., The influence of milling parameters on the properties of the milled powders and the resultant coatings, *Surface and Coatings Technolog*, 2003,168, 179–185.
- Saberi, Y., Zebarjadb, S.M., Akbari, G.H., On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484, 637-640.
- Zhang, F.L., Wangb, C.Y., Zhu, M., Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling, *Scripta Materialia*, 2003, 49, 1123–1128.
- Delshad Chermahinia, M., Sharafi, S., Shokrollahi, H., Zandrahimia, M., shafyei, A., The evolution of heating rate on the microstructural and magnetic properties of milled nanostructured Fe₁-_xCo_x (x = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and 0.7) powders, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484, 54-58

- 8. Massalski, T.B., Binary alloy phase diagrams, *ASM international*, 1991, p. 170.
- Umbrajkar, S.M., Schoenitz, M., Jones, S.R. Dreizin, E.L., Effect of temperature on synthesis and properties of aluminum-magnesium mechanical alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 402, 70–77.
- Saboor Bagherzadeh, E., Dopita, M., Mütze, T., Peuker, U.A., Morphological and structural studies on Al reinforced by Al2O3 via mechanical alloying, *Advanced Powder Technology*, 2015, 26, 487-493.
- Ozdemir, I., Ahrens, S., Mucklich, S., Wielage, B., Nanocrystalline Al–Al₂O₃p and SiCp composites produced by high-energy ball milling, *journal of materials processing technology*, 2008, 205, 111–118.
- Koch, C.C., Ovidko, I.A., Seal, S., Veprek, S., Structural Nanocrystalline Materials Fundamentals and Applications, New York, *Cambridge University Press*, 2007.
- Suryanarayana, C., Norton, M.G., X-Ray Diffraction A Practical Approach, *Plenum Press*, New Yourk and London, 1998.
- 14. Hafizpour, H.R., Simchi, A., Parvizi, S., Analysis of the compaction behavior of Al-SiC nanocomposites using linear and non-linear compaction equations, *Advanced Powder Technology*, 2010, 21, 273-278.
- 15. Fogagnolo, J.B., Velasco, F., Robert, M.H., Torralba, J.M., The effects of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders, *journal of Materials Science and Engineering A*, 2003, 342, 131-143.