

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت های $Al-Al_2O_3$ تولید شده به روش پلاسمای جرقه ای (SPS)

داود خادمی^{۱*}، ابوالفضل باباخانی^۲

چکیده

در پژوهش حاضر، کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ به روش SPS که یکی از روش های نوین تف جوشی پودرهای فلزی است، تولید شد. ریز ساختار نمونه های تولید شده با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد و تشخیص عناصر و ترکیبات حاضر در ساختار کامپوزیت با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم EDS صورت گرفت. هم چنین به منظور بررسی اثر مقادیر Al_2O_3 ، آزمون های استحکام فشاری، سختی و بررسی دانسیته نسبی بر روی نمونه های حاوی (۰-۱۵) درصد وزنی Al_2O_3 انجام شد. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد Al_2O_3 سختی برینل نمونه ها تا حدود ۹۵٪ افزایش یافته است. در نمونه با ۵ درصد وزنی Al_2O_3 استحکام نسبت به نمونه آلومینیوم خالص حدود ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است و توزیع یکنواخت ذرات Al_2O_3 در زمینه Al مشاهده می شود؛ اما با افزایش درصد وزنی ذرات Al_2O_3 در نمونه های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد، کاهش استحکام دیده می شود که دلیل آن، با توجه به بررسی های ریزساختاری و کاهش دانسیته نسبی از ۰/۹۸ به حدود ۰/۸۸، مربوط به عدم فشرده شدن مناسب و ایجاد تخلخل در این نمونه ها است.

واژه های کلیدی: کامپوزیت های زمینه آلومینیومی، Al_2O_3 ، پلاسمای جرقه ای، استحکام فشاری.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، گروه مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

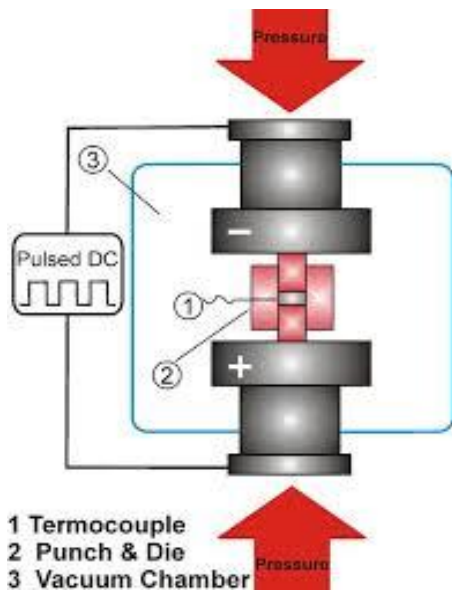
*- نویسنده مسئول مقاله: dav.khademi@gmail.com

پیشگفتار

استحکام، مدول یانگ و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم نسبت به فلزاتی چون آهن، نیکل و تیتانیوم ضعیف‌تر می‌باشد. لذا از آلومینیوم صرفاً به صورت آلیاژی یا زمینه کامپوزیت یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شود تا از خواص مکانیکی بهتری در کنار دانسیته کم‌تر و انعطاف پذیری مطلوب برخوردار باشد. بر همین اساس کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی طی دو دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲،۱]. آلومینیوم یکی از عمومی‌ترین زمینه‌ها برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی با چگالی کم و با قابلیت رسوب سختی، مقاومت خوردگی خوب و هدایت حرارتی بالا می‌باشد و از مزیت‌های مهم آن، در دسترس بودن و فراوانی آن است [۳-۵]. از ذرات سرامیکی مقاوم در برابر حرارت مثل Al_2O_3 , TiB_2 , SiC یا TiC جهت مقاوم کردن آلومینیوم و تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم استفاده می‌شود. چنین تقویت‌کننده‌هایی امکان کنترل ریزساختار، خواص مکانیکی و سطحی کامپوزیت را از طریق کنترل حجمی، اندازه و توزیع اجزاء فراهم می‌کنند. در این میان Al_2O_3 بسیار مورد توجه است؛ زیرا با زمینه در دماهای بالا واکنش نمی‌دهد و هم‌چنین فاز نامطلوب ایجاد نمی‌کند [۶]. روش‌های زیادی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفته است. در روش‌های حالت مایع، ذرات سرامیکی با هم زدن به آلومینیوم مذاب، قبل از ریخته‌گری اضافه می‌شوند. که در این روش، تفاوت میان چگالی آلومینیوم و ذره سرامیکی مانع از توزیع یکنواخت این ذرات در زمینه آلومینیومی می‌شود و از طرف دیگر تر شونده‌گی ضعیف ذرات سرامیکی، سبب ایجاد فصل مشترک ضعیف بین فاز تقویت‌کننده و زمینه می‌شود که بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده تاثیر به‌سزایی دارد [۷]. با استفاده از روش‌های حالت جامد تا حدودی می‌توان بر این مشکلات غلبه کرد. روش‌های حالت جامد که بر پایه متالورژی پودر استوار هستند در مقایسه با روش‌های مذاب، دمای کاری پایین‌تری دارد و به همین دلیل از تولید فازهای ناخواسته میان فاز زمینه و تقویت‌کننده جلوگیری می‌شود. افزون بر این، می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویت‌کننده در زمینه، و هزینه تولید پایین‌تر دست یافت [۸].

از جمله روش‌هایی که به سرعت جهت تولید محدوده وسیعی از مواد پیشرفته مثل نانوکریستال‌ها، نانوکامپوزیت‌ها و غیره توسعه یافته است روش SPS است [۹ و ۱۰]. در این روش، پودر به داخل قالبی استوانه‌ای شکل از جنس گرافیت و یا مواد عایق ریخته شده و دو پنچ از بالا و پایین آن را فشرده

می‌سازند. اعمال جریان الکتریکی به توده پودر، نیروی محرکه لازم برای تف جوشی را فراهم کرده و سبب می‌شود، فرایند تولید در زمانی اندک به اتمام رسد [۱۱]. شکل (۱) شماتیک فرایند تف جوشی به کمک جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که پنچ‌ها افزون بر اعمال پالس‌های الکتریکی، فشاری را به طور ثابت و یا متغییر بر توده پودر اعمال می‌کند که این موجب تف جوشی و همگیر شدن پودر با چگالی و خواص مورد نظر می‌گردد.



شکل ۱- شماتیک دستگاه SPS [۱۱]

مخلوط پودری که در این فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرد، از نظر الکتریکی می‌تواند رسانا و یا عایق الکتریکی باشد. در رابطه با پودرهای رسانا، قالب می‌تواند رسانا و یا عایق باشد در حالی که برای پودرهای عایق باید از قالبی رسانا استفاده نمود. این مسئله از این جهت دارای اهمیت است که برای ایجاد گرمای ژول و انجام تف جوشی همواره باید مدار الکتریکی بسته باشد [۹]. ویژگی مهم این روش، تف جوشی فلزات و سرامیک‌ها به ویژه مواد دیرگداز تا نزدیک چگالی تئوری در زمانی اندک می‌باشد [۱۲]. وجه تمایز این روش با روش‌های سنتی تف جوشی در متالورژی پودر عبور جریان الکتریکی از درون توده پودر و محفظه نگهدارنده آن برای تولید حرارت می‌باشد. تف جوشی به این روش شامل دو مکانیزم عمده است. نخست، اعمال جریان الکتریکی از درون توده پودر رسانا، سبب ایجاد جرقه در بین ذرات شده که یک منطقه

پودر آلومینیوم به گلوله‌ها یا دیواره ظرف، از متانول به عنوان عامل کنترل کننده (PCA^۳) استفاده شد.

سپس پودرهای مخلوط شده $Al-Al_2O_3$ را درون قالب استوانه‌ای شکلی از جنس گرافیت با قطر داخلی ۶ mm ریخته شد تا تف جوشی پودر ذکر شده با استفاده از دستگاه SPS در محیط خلاء (10^{-2} Torr) با اعمال جریان الکتریکی مستقیم پالسی با دانسیته $7A/mm^2$ به مدت زمان ۴۵۰ ثانیه در دمای $560^\circ C$ انجام شد. این در حالی است که به طور همزمان فشار تک محوری ۳۲ Mpa به نمونه پودری در حین تف جوشی اعمال شد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های استفاده از روش SPS، سرعت گرمایش بسیار بالای این روش نسبت به روش‌های مشابه تف جوشی و هم‌چنین دمای کم‌تر تف جوشی کردن پودر مورد نظر است [۱۶]. در پژوهش حاضر، بررسی تغییرات دما در حین تف جوشی پودر $Al-Al_2O_3$ با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. برای این منظور در جداره بیرونی قالب گرافیتی حفره‌ای به قطر ۳ mm ایجاد شد تا ترموکوپل درون این حفره قرار گیرد و در تماس با قالب گرافیتی باشد. تغییرات دمای نمونه با گذشت زمان به وسیله یک سیستم داده‌گیر Advantech 4718 با قابلیت ثبت حداقل ۱۰ داده در ثانیه ثبت گردید. جهت محاسبه سرعت گرمایش (متوسط)، دمایی که تف جوشی در آن انجام شده، بر کل زمان تف جوشی تقسیم شد. پس از تف جوشی شدن پودرهای مورد نظر در دمای $560^\circ C$ ، جریان الکتریکی قطع شده و نمونه به صورت طبیعی در محیط ذکر شده، سرد شد. در نهایت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۶ mm و طول ۱۰ mm تولید شدند. به منظور بررسی تاثیر مقدار Al_2O_3 بر روی خواص مکانیکی، آزمون فشار تک محوری در دمای اتاق با نرخ کرنش $0.3s^{-1}$ بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل انجام گرفت. طبق استاندارد (ASTM E9)، نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها ۱/۵ بود. در این کار تحقیقاتی چگالی نمونه‌ها با وزن سنجی به وسیله یک ترازوی حساس الکتریکی و محاسبه حجم نمونه‌ها به روش هندسی محاسبه شد (محاسبه حجم استوانه با قطر و طول مشخص) و با مقدار چگالی تئوری مقایسه شد. جهت بررسی سختی، سختی سنجی برینل با اعمال بار ۵ کیلوگرم بر روی سطح پولیش شده نمونه‌ها انجام شد.

موضعی با درجه حرارت خیلی بالا ایجاد می‌کند، دوم بر طبق قانون ژول، عبور جریان الکتریکی از مواد رسانا در اثر مقاومت الکتریکی تولید حرارت می‌کند [۱۳]. همین موضوع اساس و شالوده روش تف جوشی به کمک جریان الکتریکی می‌باشد. این روش به دلیل برتری‌های تکنیکی و اقتصادی که نسبت به روش‌های معمول تف جوشی دارا می‌باشد، جذابیت خاصی برای محققین پیدا کرده است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به نرخ گرمایش سریع‌تر، دمای تف جوشی پایین‌تر، زمان کم‌تر نگهداری در دما، تف جوشی موادی که به سختی تف جوشی می‌گردند، عدم نیاز به مواد کمکی برای تف جوشی، عدم نیاز به فشردن پودر پیش از تف جوشی، حساسیت کم‌تر به ویژگی‌های اولیه پودر و بهبود خواص مواد تف جوشی شده اشاره کرد [۱۴ و ۱۵]. در پژوهش حاضر، کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ به روش SPS تولید شده است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه استفاده شده در این پژوهش، شامل پودر Al_2O_3 آلومینیوم که از شرکت مرک تهیه شده و پودر که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

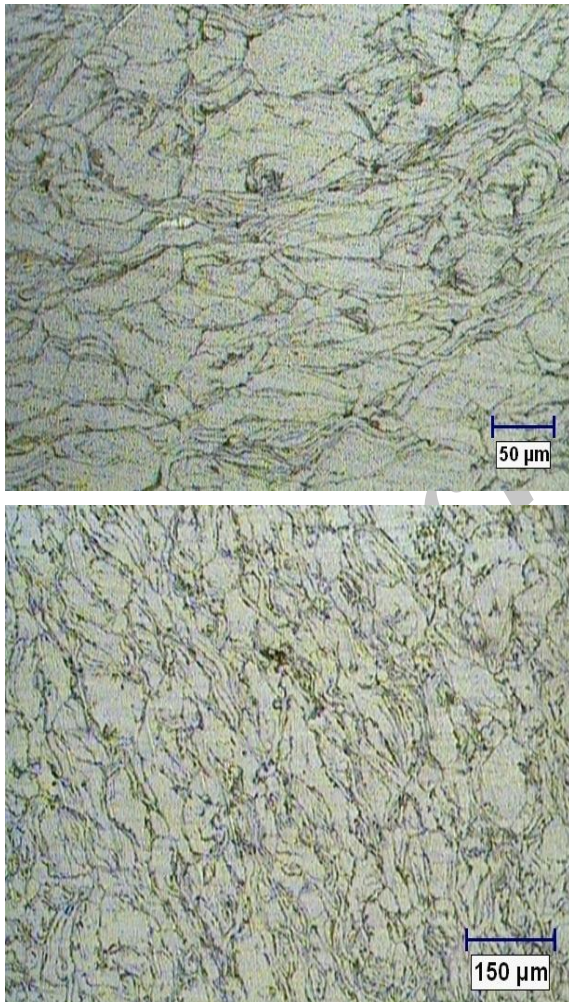
جدول ۱- مواد مورد استفاده در پژوهش

مواد	متوسط اندازه ذرات	خلوص %
پودر آلومینیوم	۴۵ μm	۹۹
پودر Al_2O_3	۵ μm	۹۹

به منظور تولید کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ با درصد‌های وزنی مختلف Al_2O_3 (۵، ۱۰، ۱۵% Al_2O_3) باید ذرات Al_2O_3 به صورت یکنواخت در بین ذرات پودر آلومینیوم پخش شوند که به این منظور از فرایند آسیاکاری گلوله‌ای ماهواره‌ای استفاده شد. آسیاکاری پودر آلومینیوم به همراه تقویت کننده‌اش (Al_2O_3) در محیط گاز آرگون به مدت زمان یک ساعت با سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه و با نسبت وزنی گلوله به پودر (۱۰:۱) انجام شد. هم‌چنین در طی آسیاکاری به منظور جلوگیری از ذوب یا به هم چسبیدن پودرها یا چسبیدن ذرات

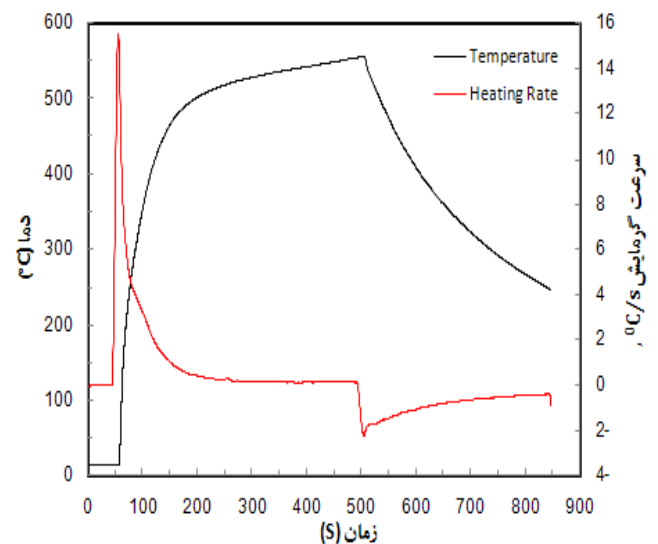
بحث و نتایج

شکل (۳)، تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌های آلومینیوم خالص پس از تف جوشی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، ذرات پودر آلومینیوم پس از یک ساعت آسیاکاری در محیط گاز آرگون، کشیده شده و ساختار لایه‌ای موازی تشکیل داده‌اند. که دلیل آن می‌تواند، آسیاکاری در اتمسفر آرگون باشد؛ زیرا در غیر این صورت در اثر حضور اکسیژن در اتمسفر و ایجاد لایه‌های اکسید سطحی بر ذرات پودر، کارایی فرایند آسیاکاری کاهش می‌یابد. ذرات پودر آلومینیوم اکسید شده، ترد و شکننده هستند و طی آسیاکاری می‌شکنند و خرد می‌شوند؛ اما با حضور گاز آرگون ذرات نرم آلومینیوم کشیده شده و مورفولوژی پولکی ایجاد کرده‌اند [۱۷].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های آلومینیوم خالص

شکل (۲)، تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تف جوشی پودر آلومینیوم به وسیله SPS را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود به محض اعمال جریان الکتریکی، دما به شدت افزایش می‌یابد. ابتدا به دلیل ایجاد جرقه در فضای بین ذرات پودر آلومینیوم، سرعت گرمایش (شیب نمودار دما- زمان) بسیار زیاد است و به حدود $15^{\circ}C/Sec$ می‌رسد. هنگامی که این تخلیه الکتریکی و ایجاد جرقه در فضای بین دو ذره صورت می‌گیرد، یک منطقه موضعی با درجه حرارت بسیار بالا به صورت لحظه‌ای تشکیل می‌شود. این موضوع، سبب ذوب و یا تبخیر بر روی سطح ذرات و در نتیجه تشکیل گلوبی می‌گردد [۱۴]. پس از آن جریان الکتریکی مستقیم پالسی از ذره‌ای به ذره‌ی دیگر، از طریق گلوبی اتصال دهنده‌ی آن‌ها جریان می‌یابد. در این مرحله گرمایش ژولی به واسطه مقاوت الکتریکی پودر ذکر شده، باعث افزایش دما می‌شود که سرعت گرمایش نسبت به حالت قبل (ایجاد جرقه) کم‌تر شده و به صورت کاهش شیب در نمودار مشاهده می‌شود.

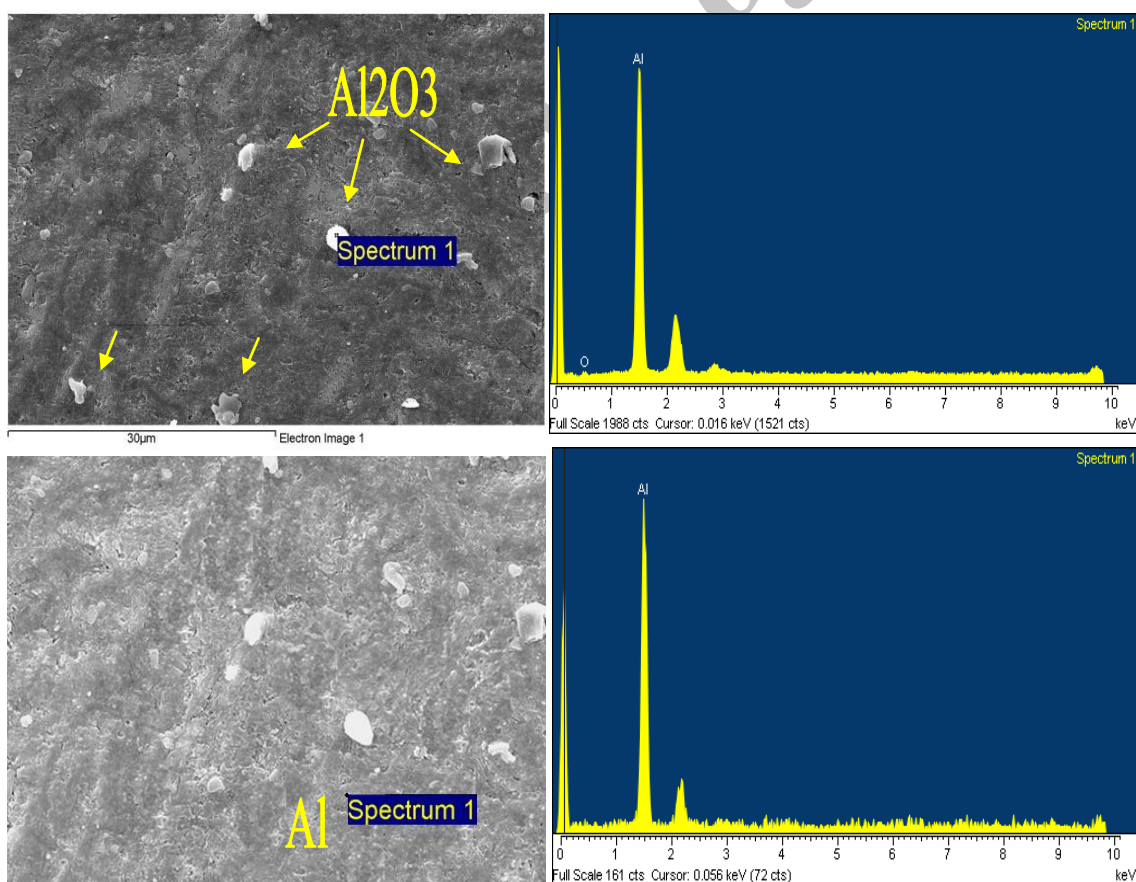


شکل ۲- نمودار تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تف جوشی پودر آلومینیوم به وسیله SPS

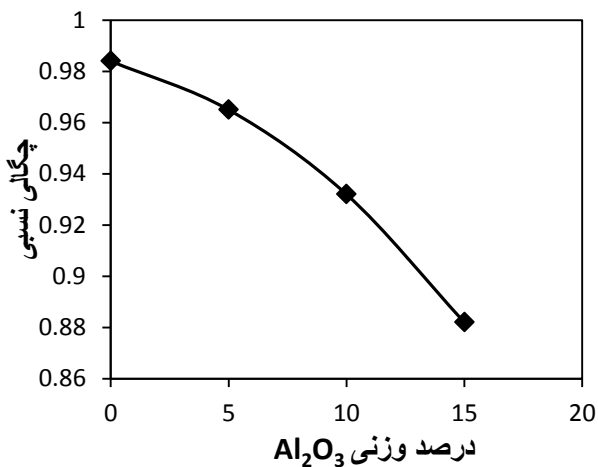
متخلخل شدن زمینه آلومینیومی را در این نمونه نشان می‌دهد، در شکل (۵) آورده شده است.

همان گونه که در تصاویر شکل (۳) مشاهده می‌شود، تف جوشی پودر آلومینیوم در دمای 560°C به خوبی صورت گرفته و ذرات پودر به خوبی با هم اتصال پیدا کرده‌اند. همچنین اعمال همزمان فشار تک محوری به نمونه‌ها در حین تف جوشی، باعث اتصال بهتر ذرات به یکدیگر شده و تف جوشی در دمای کم‌تری نسبت به دیگر روش‌های معمول انجام می‌شود.

شکل (۴) تصاویر SEM تهیه شده از نمونه حاوی ۵ درصد وزنی Al_2O_3 را به همراه آنالیز EDS آن نشان می‌دهد. همان گونه که در تصاویر دیده می‌شود، در نمونه با ۵ درصد وزنی Al_2O_3 توزیع تقریباً یکنواخت ذرات Al_2O_3 در زمینه آلومینیومی وجود دارد و همچنین تخلخل یا حفره در این نمونه مشاهده نمی‌شود؛ اما با افزایش درصد وزنی Al_2O_3 در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد، تخلخل‌هایی در این نمونه‌ها مشاهده می‌شود که دلیل آن حضور ذرات سخت Al_2O_3 است که مانند یک شبکه سخت مانع از فشرده شدن کامل پودر در این نمونه‌ها شده و در نتیجه میزان تخلخل افزایش می‌یابد. تصویر SEM تهیه شده از نمونه با ۱۰ درصد وزنی Al_2O_3 که



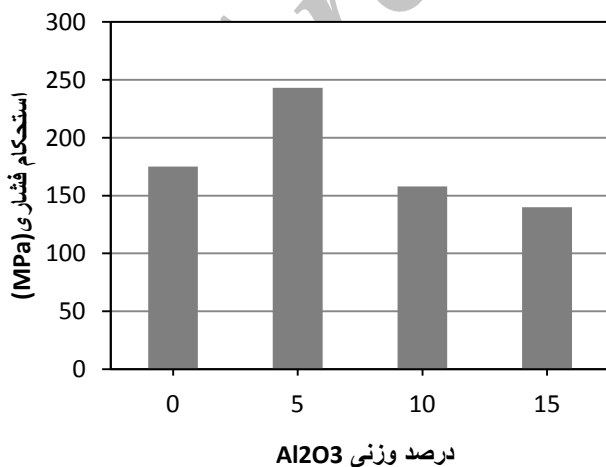
شکل ۴- تصویر SEM از نمونه با ۵ درصد وزنی Al_2O_3 ، به همراه آنالیز EDS از نقاط مختلف



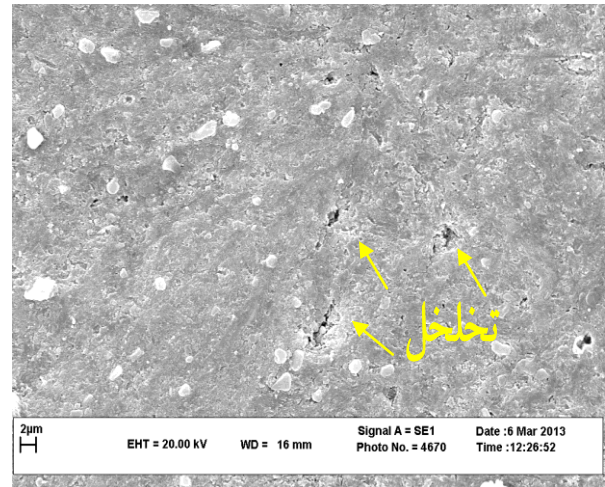
شکل ۶- اثر میزان ذرات آلومینا روی چگالی نسبی

اثر ذرات آلومینا روی استحکام فشاری

وجود حفره و تخلخل، تاثیر به سزایی بر روی خواص مکانیکی این نمونه‌ها دارد [۱۹]. پس از انجام آزمون فشار، استحکام فشاری نهایی نمونه‌های مختلف بر حسب میزان ذرات تقویت کننده در نمودار شکل (۷) آورده شده است.



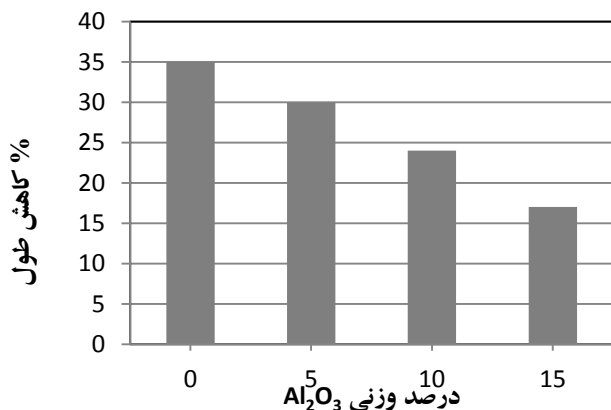
شکل ۷- استحکام فشاری نمونه‌های مختلف بر حسب میزان ذرات تقویت کننده



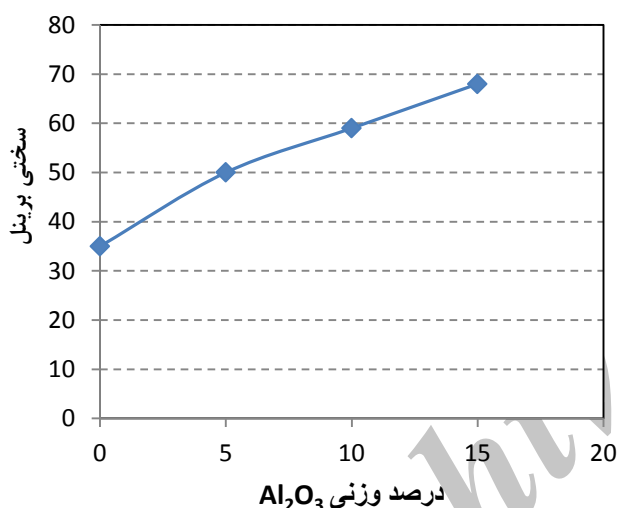
شکل ۵- تصویر SEM تهیه شده از نمونه حاوی ۱۰ درصد Al_2O_3 وزنی

اثر ذرات آلومینا روی چگالی نسبی

همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، چگالی نسبی (چگالی تجربی نسبت به چگالی تئوری) با افزایش میزان ذرات تقویت کننده کاهش می‌یابد که دلیل آن، در مقایسه با آلومینیوم خالص، کاهش در قابلیت تراکم پذیری نمونه با افزایش آلومینا می‌باشد؛ زیرا این ذرات سختی بسیار بالایی دارند که تراکم پذیری و متعاقباً چگالی را کاهش می‌دهند. دلیل دیگری که می‌توان برای این موضوع بیان کرد، اثر جلوگیری کننده ذرات آلومینا روی مکانیزم تف جوشی است. دمای ذوب بالای آلومینا سبب می‌شود، تمایل کمی برای تشکیل پیوند با آلومینیوم خالص داشته باشد که در نتیجه باعث تشکیل شبکه‌های ضعیف می‌شود. از سوی دیگر نیز با افزایش درصد ذرات آلومینا میزان حفرات و نواقص نیز افزایش می‌یابد [۱۸].



شکل ۸- قابلیت انعطاف نمونه‌های مختلف بر حسب میزان ذرات تقویت کننده



شکل ۹- اثر میزان ذرات آلومینا روی سختی

نتیجه گیری

در این پژوهش کامپوزیت Al_2O_3 -Al با درصدهای وزنی مختلف Al_2O_3 به روش SPS تولید شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱- با آسیاکاری مکانیکی می‌توان توزیع همگنی از ذرات Al_2O_3 در زمینه پودر آلومینیوم با درصدهای وزنی کم، حدود ۵ درصد وزنی Al_2O_3 به دست آورد.

۲- نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد که توزیع یکنواخت ذرات Al_2O_3 بین ذرات آلومینیوم در نمونه حاوی ۵ درصد وزنی، باعث افزایش استحکام آن می‌شود؛ اما با افزایش درصد Al_2O_3

با حضور ذرات Al_2O_3 در نمونه حاوی ۵ درصد وزنی Al_2O_3 استحکام فشاری نهایی نمونه نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. ذرات تقویت کننده، واکنش‌های استحکام بخشی ناشی از نابجایی‌ها را فعال می‌کنند و از حرکت آن‌ها در زمینه آلومینیوم جلوگیری می‌کنند [۱۸]؛ اما با افزایش درصد وزنی Al_2O_3 در نمونه‌های ۱۵ و ۱۰ درصد، قابلیت فشرده شدن کم‌تر شده و تخلخل افزایش می‌یابد. هم‌چنین در این نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی Al_2O_3 ، این ذرات به هم می‌چسبند [۱۹]. این نقاط به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل می‌کنند و بر عامل استحکام بخشی غلبه کرده و در نتیجه، سبب کاهش استحکام در این نمونه‌ها می‌شود و نیز هرچه میزان فاز تقویت کننده افزایش یابد، کرنش نهایی کاهش می‌یابد. می‌توان تفاوت میان کرنش نهایی آلومینیوم خالص و کامپوزیت‌ها را در شکل (۸) مشاهده کرد که دلیل اصلی آن، کاهش میزان قابلیت تغییر فرم در اثر افزودن فاز سخت در کامپوزیت هاست. یکی از دلایل این اثر، کاهش فاصله میان ذرات سخت با افزایش میزان آن‌هاست که باعث مشکل شدن حرکت نابجایی می‌شود [۱۹]. از طرف دیگر از آنجایی که ذرات Al_2O_3 انعطاف زمینه را کاهش می‌دهد، محدودیت تغییر فرم پلاستیکی زمینه بیش‌تر شده و در نتیجه نمی‌تواند کرنش‌های خود را رها کند. بنابراین، جوانه زنی و رشد ترک در کرنش‌های کم‌تری نسبت به ماده فاقد تقویت کننده روی می‌دهد [۱۸].

اثر ذرات آلومینا روی سختی

همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آلومینا سختی کامپوزیت افزایش می‌یابد و سختی آن بسیار بالاتر از آلومینیوم خالص است. این حقیقت را می‌توان به آسانی با رابطه زیر نشان داد:

$$H_c = H_m f_m + H_r f_r$$

که H_c و H_r ، H_m به ترتیب سختی زمینه، تقویت کننده و کامپوزیت است و f_m و f_r هم کسر تقویت کننده و زمینه می‌باشد.

البته داده‌های بدست آمده از این رابطه زمانی درست است که پارامترهایی مثل دانسیته نسبی مساوی ۱ باشد و تغییر در میزان آلومینا تاثیری روی دانسیته نسبی نداشته باشد. هر چند باید ذکر کرد که این معادله در توافق با نتایج این پژوهش است [۱۹]. دلیل دیگر افزایش سختی با افزایش میزان ذرات تقویت کننده را باید اثر استحکام بخشی ذرات عنوان کرد.

با اعمال فشار حدود 800 Mpa ، در دمای 625°C به مدت زمان 45 دقیقه انجام شده و به نتایج تقریباً مشابه دست یافته شده است. که روش پلاسمای جرقه‌ای با توجه به مدت زمان، فشار و دمای اعمالی به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. در این روش فشار کم‌تری نسبت به سایر روش‌ها لازم است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد، به ویژه سرکار خانم مهندس هوشیار صادقیان به جهت انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References:

- 1-Z. R. Hesabi, A. Simchi, S. S. Reihani. "Structural evolution during mechanical milling of nanometric and micrometric Al_2O_3 reinforced Al matrix composites". *Materials Science and Engineering: A*. 2006;428(1):159-68.
- 2-J. Han. *Processing Microstructure Evolution and Properties of Nanoscale Aluminum Alloys*: University of Cincinnati; 2005.
- 3- M. Hossein-Zadeh, O. Mirzaee, P. Saidi. "Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al_2O_3 particles". *Materials & Design*. 2014;54:245-50.
- 4-م. باغچه سرا، ح. عبدی زاده، ح. بهاروندی. "بررسی ریز ساختار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا تولید شده به روش اختلاط مستقیم". فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین. ۲۰۱۵؛ ۵(۱۸): ۱۱۷-۲۸.
- 5-K. Edalati, M. Ashida, Z. Horita, T. Matsui, H. Kato. "Wear resistance and tribological features of pure aluminum and $Al-Al_2O_3$ composites consolidated by high-pressure torsion". *Wear*. 2014;310(1):83-9.
- 6-G. Zhao, Z. Shi, N. Ta, G. Ji, R. Zhang. "Effect of the heating rate on the microstructure of in situ Al_2O_3 particle-reinforced Al matrix composites prepared via displacement reactions in an Al/CuO system". *Materials & Design*. 2015;66:492-7.
- 7-M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. reza Baharvandi. "The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of $Al-Al_2O_3$ composites, made by powder metallurgy". *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(14):5387-93.
- 8-G. Iacob, V. G. Ghica, M. Buzatu, T. Buzatu, M. I. Petrescu. "Studies on wear rate and micro-hardness of the $Al/Al_2O_3/Gr$ hybrid composites produced via powder metallurgy". *Composites Part B: Engineering*. 2015;69:603-11.
- 9-Z. Munir, U. Anselmi-Tamburini, M. Ohyanagi. "The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method". *Journal of Materials Science*. 2006;41(3):763-77.

- 10-J. Liu, Y. Wang, F. Yang, K. Chen, L. An. "Grain refining in spark plasma sintering Al₂O₃ ceramics". *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;622:596-600.
- 11-J. Monnier, Y. Champion, L. Perrière, B. Villeroy, C. Godart. "Spark plasma sintering and hydrogen pre-annealing of copper nanopowder". *Materials Science and Engineering: A*. 2015;621:61-7.
- 12-D. Perera, M. Tokita, S. Moricca. "Comparative study of fabrication of Si₃N₄/SiC composites by spark plasma sintering and hot isostatic pressing". *Journal of the European Ceramic Society*. 1998;18(4):401-4.
- 13- S.-X. Song, Z. Wang, G.-P. Shi. "Heating mechanism of spark plasma sintering". *Ceramics International*. 2013;39(2):1393-6.
- 14-E. A. Olevsky, S. Kandukuri, L. Froyen. "Consolidation enhancement in spark-plasma sintering: Impact of high heating rates". *Journal of Applied Physics*. 2007;102(11):114913.
- 15-S. Diouf, A. Molinari. "Densification mechanisms in spark plasma sintering: effect of particle size and pressure". *Powder technology*. 2012;221:220-7.
- 16-H. Kwon, M. Leparoux, A. Kawasaki. "Functionally Graded Dual-nanoparticulate-reinforced Aluminium Matrix Bulk Materials Fabricated by Spark Plasma Sintering". *Journal of Materials Science & Technology*. 2014;30(8):736-42.
- 17-A. Ebrahimnejad, S. A. Sajjadi. "Damage mechanisms in aluminum-matrix composites reinforced with nano-alumina particles". *International Journal of Materials Research*. 2015;106(10):1107-10.
- 18-M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani. "Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy". *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(4):1031-8.
- 19-M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani. "The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al₂O₃ composite". *Materials & Design*. 2011;32(2):1031-8.