

بررسی عوامل مؤثر بر سنتز و خواص کامپوزیت‌های آلومینا-آلومینیم

نعمت‌اله صحرانژاد^۱، حسین سرپولکی^۱، حمیدرضا رضایی^۱، سعید کاویانی^۲

^۱ دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

hsarpoolaki@gmail.com

چکیده: در این تحقیق اثر دما و زمان عملیات حرارتی بر روی خواص کامپوزیت‌های آلومینا-آلومینیم، ریزساختار تشکیل شده و مرز مشترک آلومینا با آلومینیم مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا پودر آلومینا همراه با مقادیر مختلفی پودر آلومینیم در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و ۵ درصد رطوبت مخلوط شده و توسط پرس شکل داده شد. برای بررسی اثر دما بدنه‌های شکل داده شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی اثر زمان در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد نمونه‌ها در زمان‌های ۱، ۳، ۴، ۵ و ۶ ساعت پخت شدند. بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در مرز مشترک و همچنین میزان اکسیداسیون آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت. اثر دما و زمان بر خواص فیزیکی، مکانیکی و آنالیز فازی توسط پراش اشعه ایکس (XRD) نیز بررسی شد.

۱- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها در تمام دنیا به عنوان مواد مهندسی کاربرد سازه‌ای پیدا کرده‌اند [۱]. کامپوزیت‌ها در نوعی تقسیم‌بندی از نظر زمینه به سه گونه زمینه فلزی، پلیمری و سرامیکی تقسیم بندی می‌شوند [۲]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای پتانسیل زیادی برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای می‌باشند [۳]. اما به دلیل هزینه بالاتر در مقایسه با آلیاژهای فلزی، استفاده از آنها به کاربردهای با هزینه مناسب و موثر محدود شده است [۴]. از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری هم در صنایع هواپیمائی، اتومبیل سازی، پزشکی و الکترونیک استفاده می‌شود [۵].

اما در مورد کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی باید اشاره کرد، نقطه ذوب بالا، استحکام فشاری فوق العاده، حفظ ویژگی‌های رفتاری و ذاتی در دماهای بالا و همچنین مقاومت به خوردگی عالی، از خصوصیات برجسته مواد سرامیکی می‌باشند. اما چنانچه مشخص شده است امروزه موادی در صنعت استفاده می‌شوند که خصوصیات چگون استحکام کششی، مقاومت به ضربه، مقاومت به ارتعاش و شوک حرارتی آنها نیز بالا می‌باشد که عدم وجود اینگونه خواص از نقاط ضعف آنها است که می‌بایست در صورت امکان اصلاح گردند [۶]. لذا برای رسیدن به این خواص کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی که از مواد مختلف با پایه سرامیک شکل گرفته‌اند، از جمله آلومینا-سیلیکون کارباید، آلومینا-پیرکس، آلومینا و انواع فلزات، مو لایت-سیلیکون کارباید و غیره ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به صنایع هوا فضا، قطعاتی چون مشعل‌ها، عایق‌ها و سپرهای حرارتی، صنایع پزشکی در ساخت اعضای مصنوعی بدن و تولید ابزار آلات، در عایق‌های حرارتی ابزار برش و قالب‌های کشش سیم اشاره نمود [۷، ۸].

روش‌های مختلف ساخت کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی عبارتند از: ساخت بدنه سرامیکی و تزریق به درون آن، روش اکسیداسیون مستقیم، روش اکسیداسیون درجا (In-situ) و ... [۷]. در این تحقیق از روش

اکسیداسیون درجا با اختلاط پودر آلومینا و آلومینیوم استفاده شد و اثر دما و زمان بر روی خواص کامپوزیت ساخته شده بررسی گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مصرفی و خواص آنها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مواد اولیه مصرفی و خواص آنها

ردیف	مواد اولیه	خلوص (درصد)	دانه بندی
۱	پودر ریز آلومینای راکتیو Alcan Ra36	۹۹	زیر ۳۰ میکرون
۲	پودر ریز آلومینیوم	۹۹	زیر ۵۰ میکرون
۳	پودر چسب CMC	-	-

به منظور ساخت کامپوزیت Al_2O_3/Al در ابتدا پودر آلومینا و آلومینیوم به صورت خشک با سه ترکیب مختلف ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد Al مخلوط شدند. پس از اختلاط پودرهای آلومینا و آلومینیوم، محلول حاوی چسب CMC ۱۰ درصد، به میزان ۵ درصد در هر ترکیب اضافه شد. برای جلوگیری از گرانول شدن نا منظم ذرات، بعد از پخش کردن دستی پودرها، الک در چند مرتبه متوالی انجام شد. در غیر این صورت ذرات پودر در اطراف قطره‌های چسب جمع شده و پخش ذرات به صورت غیر همگن در هنگام پرس مشکل ساز خواهد شد. ترکیب حاصل شده، به مدت ۲۴ ساعت جهت عمل aging نگهداری گردید. پس از این مرحله پودر حاصل در اندازه‌های یکسان (حدود ۱ یا ۲ گرمی) وزن شده و در داخل قالب استوانه‌ای شکل به قطر ۱ سانتیمتر ریخته و پرس با فشار ۱۰۰ bar انجام شد. نمونه‌های قرصی شکل تهیه شده از ترکیبات مختلف جهت بررسی اثر دما در دماهای مختلف ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد در کوره پخت شدند. سرعت پخت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه و زمان ماندن در بالاترین دما ۳ ساعت بود. همچنین به منظور بررسی اثر زمان بر روی خواص کامپوزیت چند نمونه در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های مختلف ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت با همان سرعت پخت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه پخت شدند. برای بررسی استحکام کامپوزیت هم مقداری پودر بیج اولیه آماده شده در داخل قالب مکعبی با ابعاد داخلی $8 \times 8 \times 2$ سانتیمتر ریخته شد و بعد از پرس با فشار ۱۰۰ bar مانند سیکل‌های ذکر شده برای نمونه‌های قرصی شکل پخت شدند. بعد از پخت، چند نمونه قرصی شکل تهیه شده از ترکیب‌های مختلف، مانت سرد شده و آنالیز ریز ساختاری توسط (SEM) با دستگاه مدل Cambridge 360 انجام گردید. همچنین به منظور بررسی آنالیز فازی از ترکیبات مختلف پخت شده در دماها و زمان‌های مختلف پودر ریز تهیه شده و مطالعه فازی توسط دستگاه XRD مدل JEOL-JDX-8030 انجام گردید.

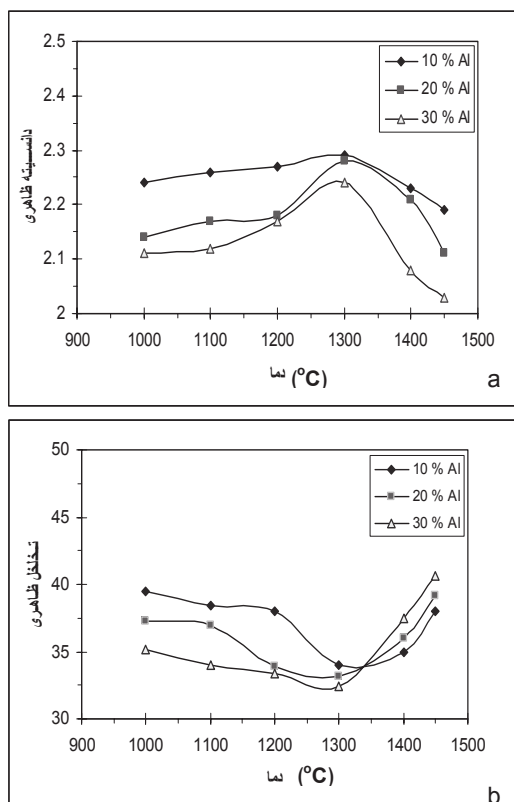
۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر دما و زمان بر چگالی و تخلخل

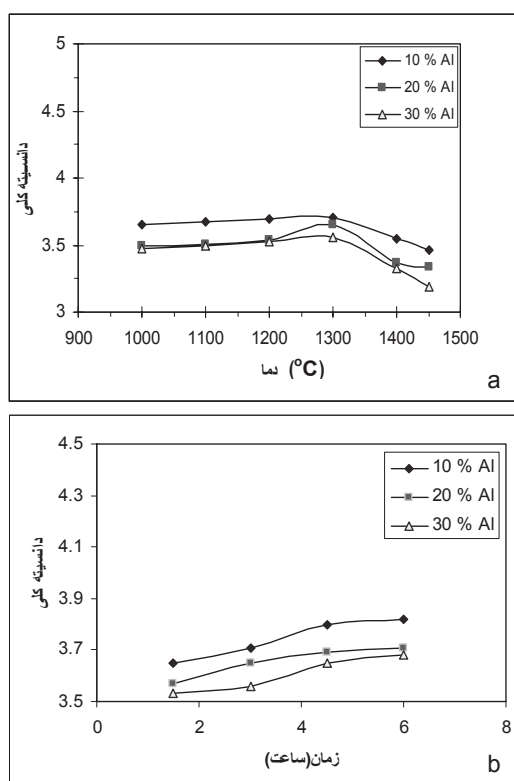
به منظور بررسی اثر دما بر روی چگالی ظاهری، چگالی کلی و تخلخل ظاهری، نتایج حاصل برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف Al و زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ (a) نشان داده شده است.

همانطوریکه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود در درصد ثابت Al با افزایش دما چگالی ظاهری و کلی تا $1300^{\circ}C$ افزایش یافته و سپس شروع به کاهش می‌نماید. از طرفی در شکل ۱ (b) با افزایش دمای پخت تخلخل ظاهری تا دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد کم شده و سپس شروع به افزایش می‌نماید. همچنین از شکل‌های ۱، ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود در دماهای ثابت پخت با افزایش درصد آلومینیوم چگالی و تخلخل کاهش می‌یابند.





شکل ۱- اثر دما بر روی (a) چگالی ظاهری و (b) تخلخل ظاهری در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد Al

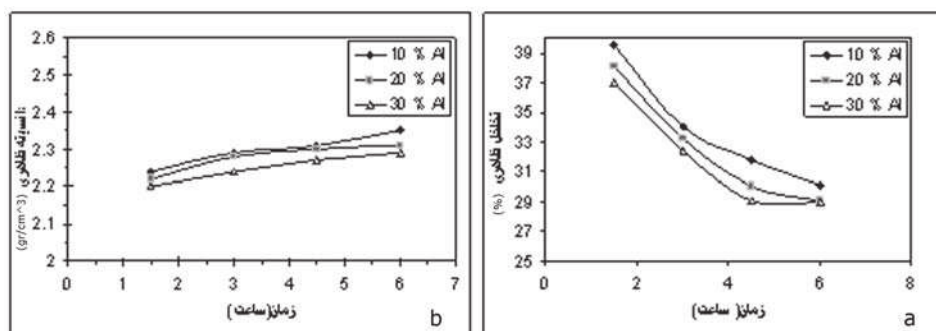


شکل ۲- اثر دما و (b) اثر زمان بر روی چگالی کلی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد Al

برای بررسی اثر زمان نتایج حاصل مربوط به نمونه‌های پخته شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد با زمان‌های پخت ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت در این دما در شکل‌های ۲(b) و ۳ آورده شده است.



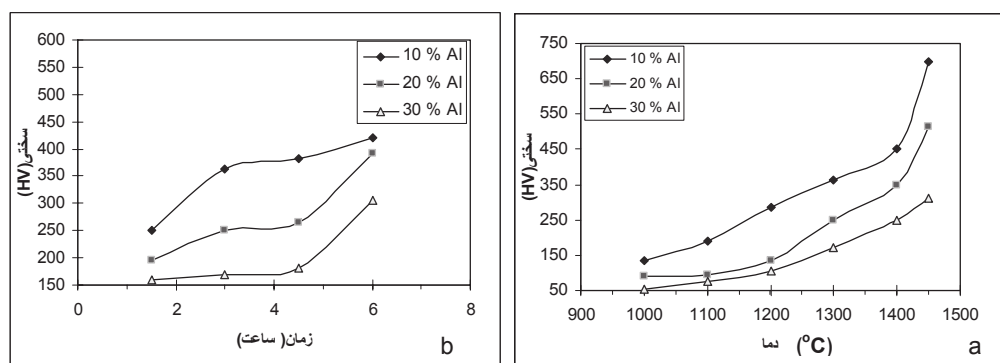
در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان پخت در درصدهای ثابت آلومینیوم چگالی ظاهری و کلی افزایش یافته و تخلخل کاهش می‌یابد.



شکل ۳- (a) اثر زمان بر روی چگالی ظاهری و (b) اثر زمان بر روی تخلخل ظاهری در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

۳-۲- اثر دما و زمان بر سختی

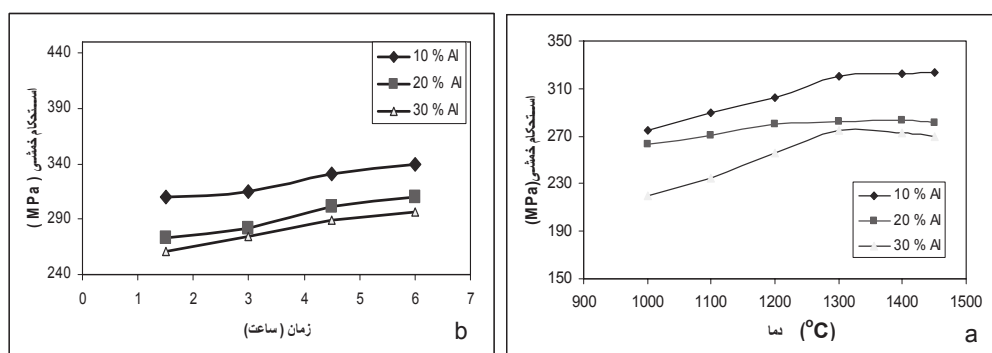
در ادامه نتایج مربوط به نمونه‌های با ترکیب‌های مختلف پخته شده در دماها و زمان‌های مختلف آورده شده است. در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش دما و زمان در ترکیب‌های یکسان سختی افزایش یافته است. از طرفی در دما و زمان پخت یکسان با افزایش درصد آلومینیوم سختی کاهش یافته است.



شکل ۴- (a) اثر دما و (b) اثر زمان بر روی سختی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

۳-۳- اثر دما و زمان بر استحکام خمشی

نتایج مربوط به استحکام خمشی نمونه‌های با ترکیب‌های مختلف و اثر دما و زمان پخت بر روی استحکام خمشی آنها در شکل ۵ آورده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش دما و زمان پخت در درصدهای ثابت آلومینیوم استحکام افزایش یافته است. همچنین در دما و زمان پخت یکسان با افزایش درصد آلومینیوم استحکام خمشی کامپوزیت کاهش یافته است.

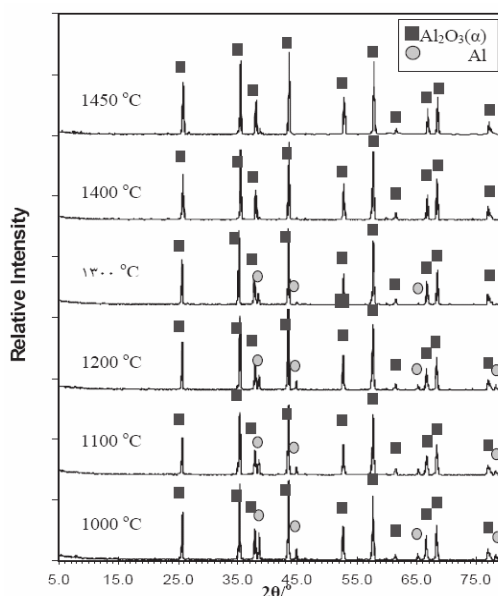


شکل ۵- (a) اثر دما و (b) اثر زمان بر استحکام خمشی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

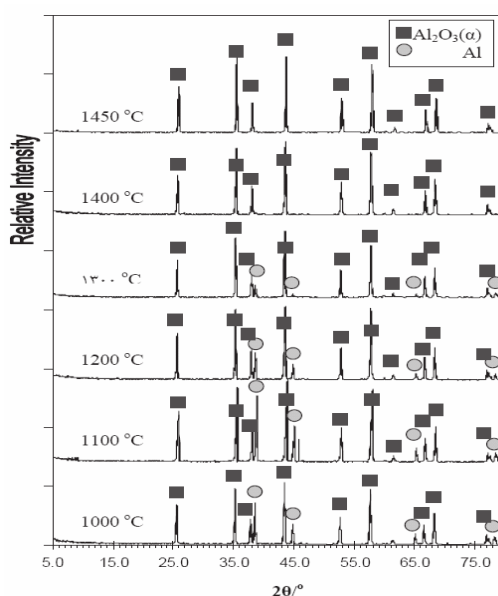
۳-۴- بررسی‌های فازی

مطالعه ترکیب کامپوزیت Al_2O_3/Al توسط الگوی پراش اشعه ایکس انجام گرفت. همانگونه که در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ملاحظه می‌گردد، فازهای نهایی موجود در بدنه Al و Al_2O_3 می‌باشند. که البته با بررسی شدت این پیک‌ها ملاحظه می‌شود، نوع فاز آلومینا در دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد (α) بوده و Al_2O_3 در این دماها تغییرات فازی نداشته است که این مورد در ادامه بحث در شکل ۱۲ هم ملاحظه می‌شود. همچنین در اشکال ۶، ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که در هر سه ترکیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد Al با افزایش دما شدت پیک‌های Al کم شده و شدت پیک‌های Al_2O_3 افزایش می‌یابد.

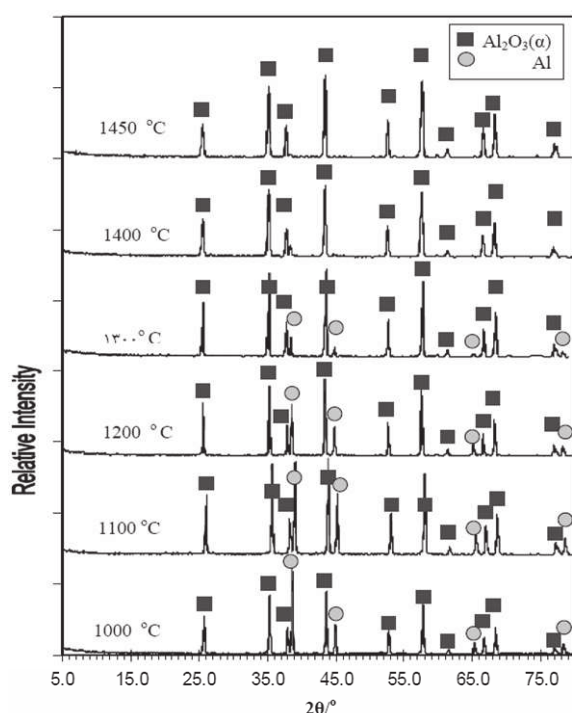
همچنین در شکل ۹ هم ملاحظه می‌شود در دمای ثابت، با افزایش زمان زینتری به عنوان پارامتر متغیر میزان اکسیداسیون افزایش یافته و با کاهش شدت پیک‌های Al بر شدت پیک‌های Al_2O_3 افزوده می‌شود.



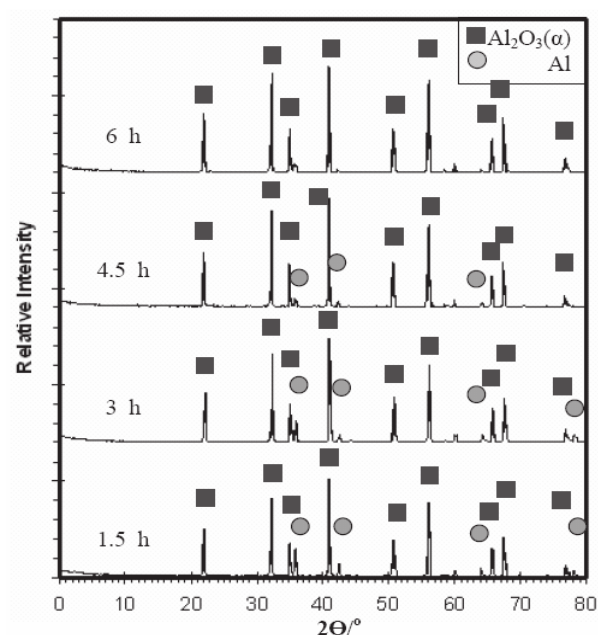
شکل ۶- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰ $Al/\%$ زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



شکل ۷- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۲۰ $Al/\%$ زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



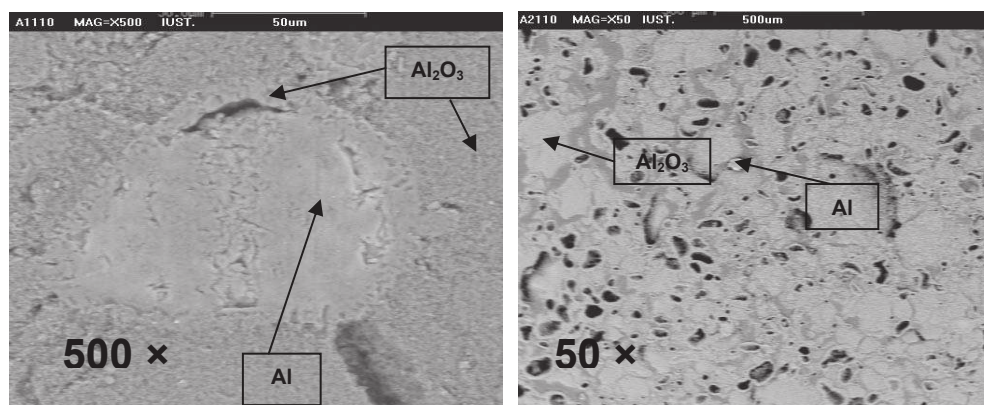
شکل ۸- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ با ترکیب $\text{Al}/\%$ ۳۰ زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



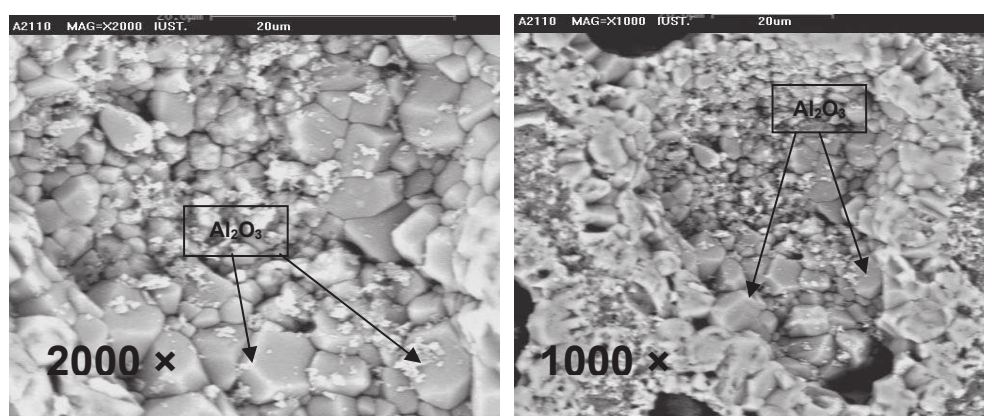
شکل ۹- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ با ترکیب $\text{Al}/\%$ ۲۰ زینتر شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های ماندن ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت در دمای ماکزیمم

۳-۵- بررسی‌های ریزساختاری

جهت بررسی ریز ساختار کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ تصاویر SEM چند نمونه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ (a, b) مشاهده می‌گردد. شکل ۱۰ توزیع ذرات آلومینیومی در بین ذرات آلومینایی، قرار گرفتن ذرات فلزی در زمینه آلومینایی و اکسیداسیون این ذرات از سطح را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ هم اکسیداسیون ذره فلزی آلومینیوم و ساختار اکسید آلومینیوم تشکیل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- (a,b) تصویر SEM کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (۱۰٪ Al) زینتر شده در دمای 1400°C و ۳ ساعت زمان ماندن در دمای ماکزیمم



شکل ۱۱- (a,b) تصویر SEM کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (۱۰٪ Al) زینتر شده در دمای 1450°C و ۳ ساعت زمان ماندن در دمای ماکزیمم

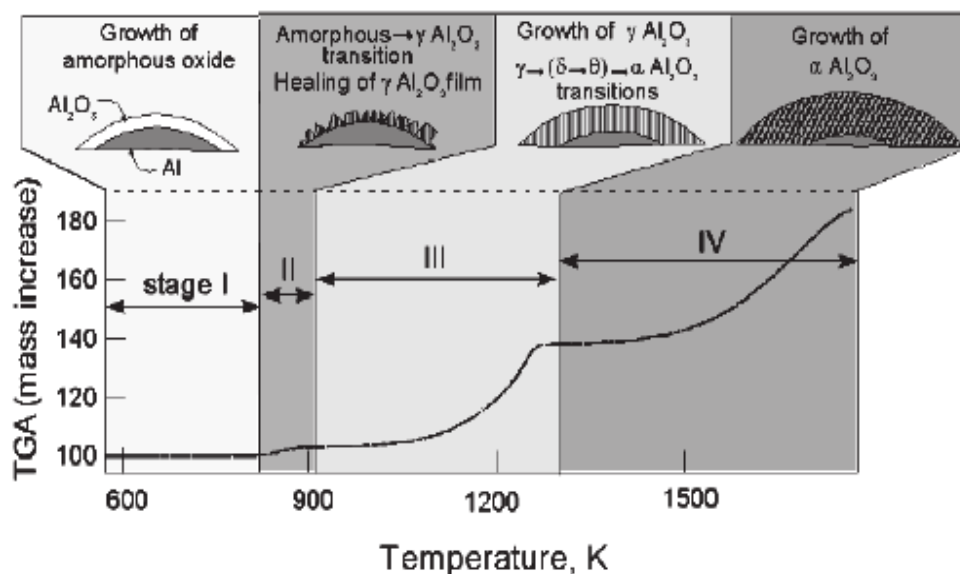
همانطوریکه از نتایج حاصل در شکل‌های بالا ملاحظه می‌شود، دما و زمان تاثیرات متفاوتی بر خواص کامپوزیت دارند. اثر این دو پارامتر را می‌توان از طریق تاثیر بر عوامل مختلف مانند ترشوندگی ذرات جامد توسط مذاب، اکسیداسیون ذرات آلومینیومی موجود در زمینه آلومینایی، اختلاف ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده، اختلاف چگالی دو فاز، تغییرات فازی آلومینا در دماهای مختلف و بویژه فصل مشترک دو فاز زمینه و تقویت کننده دانست.

تغییرات فازی آلومینا در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود فاز ۷ تا دمای زیر 1000°C پایدار بوده و پس از این دما به فاز α تبدیل می‌شود. صحت این گفته در نتایج حاصل از الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت‌ها در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ و منابع مختلف مورد تایید می‌باشد [۹].

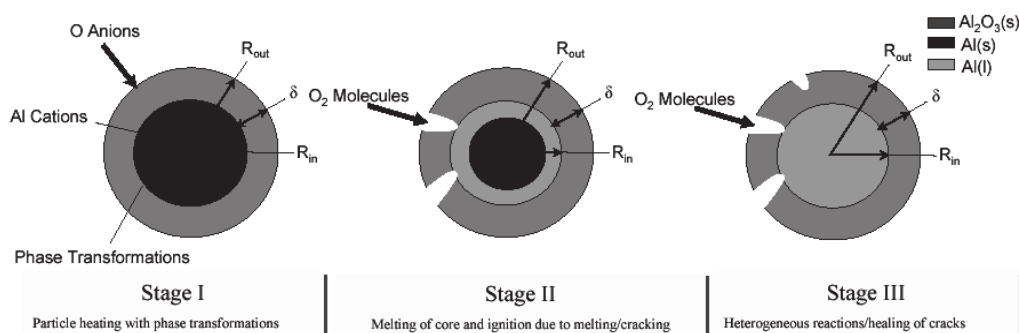
همچنین در شکل ۱۳ نحوه تشکیل لایه اکسیدی، نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه و افزایش میزان اکسیداسیون با تغییر دما و زمان نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عوامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عوامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.



شکل ۱۲- تغییرات فازی آلومینا در اثر افزایش دما [۶]



شکل ۱۳- مراحل اکسیداسیون ذره آلومینیومی و نحوه نفوذ اکسیژن در لایه اکسیدی [۶]

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عوامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.

در شکل‌های ۱ و ۲ با افزایش دما تا 1300°C اکسیداسیون افزایش یافته و با افزایش جرم کامپوزیت چگالی افزایش یافته است. از طرفی با افزایش میزان نفوذ و قویتر شدن پیوند میان ذرات تقویت کننده و زمینه تخلخل کاهش می‌یابد. اما به نظر می‌آید با بالاتر رفتن دما و پیشرفت اکسیداسیون به علت کاهش فاز مذاب میزان تخلخل‌ها افزایش یافته و چگالی کاهش می‌یابد. البته می‌توان به ترک‌های حاصل در اثر افزایش دما و ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی Al و Al_2O_3 و در همین راستا همان‌طوریکه در شکل ۵ ملاحظه می‌شود با افزایش جرم کامپوزیت در اثر اکسیداسیون، استحکام با افزایش دما تا 1300°C افزایش یافته و در ادامه با زیاد شدن تخلخل و افزایش ترک‌های حاصل استحکام کاهش می‌یابد.

در شکل‌های اشاره شده ملاحظه می‌شود در دماها و زمان‌های یکسان پخت، با افزایش درصد فاز آلومینیوم با اینکه در اثر افزایش فاز مذاب تخلخل کاهش می‌یابد، اما به علت افزایش نسبت فاز با چگالی پایین‌تر (آلومینیوم) به فاز با چگالی بالاتر (آلومینا) چگالی هم کاهش می‌یابد.

در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش زمان، چگالی افزایش یافته و تخلخل کاهش می‌یابد. در حقیقت گام کنترل کننده نفوذ و میزان واکنش اکسیداسیون، زمان می‌باشد. در بررسی اثر زمان هم مشاهده می‌شود با این افزایش چگالی و کاهش تخلخل استحکام افزایش یافته است.

در بررسی اثر دما و زمان بر روی سختی در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که با افزایش دما و زمان و پیشرفت واکنش اکسیداسیون، میزان فاز سخت اکسید آلومینیوم در کامپوزیت افزایش یافته و دما و زمان به عنوان عوامل موثر بر اکسیداسیون سختی را افزایش می‌دهند. در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود در دماها و زمان‌های یکسان، با افزایش میزان فاز نرم آلومینیوم سختی کاهش یافته است. در تمامی خواص فوق تاثیر فصل مشترک و واکنش اکسیداسیون کاملاً مشهود می‌باشد. البته می‌توان در الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت تولید شده سیکل واکنش اکسیداسیون و اثر دما و زمان را در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ مشاهده نمود که با توضیحات داده شده مطابقت می‌نماید. لازم به ذکر است نتایج بدست آمده در تحقیقات مشابه دیگر مقادیر بدست آمده برای چگالی، تخلخل، سختی و استحکام کششی در تحقیق حاضر را تایید می‌کند [۱۰، ۱۱ و ۱۲].

۴- نتیجه گیری

با بررسی نتایج مربوط به الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های گرفته شده در دماهای ۱۰۰۰ تا 1450°C درجه سانتیگراد، مشاهده می‌شود که با افزایش دما عمل اکسیداسیون افزایش یافته و در دمای 1300°C به بالا تقریباً همه Al ها به Al_2O_3 تبدیل شده و پیکی از Al در دمای 1400°C مشاهده نمی‌شود. همچنین طی عمل زینتر در دماهای ۱۰۰۰ تا 1450°C درجه سانتیگراد همه پیک‌ها نشان دهنده فاز (α) بوده و پایداری فاز فوق را در این دماها نشان می‌دهد. همچنین توزیع ذرات Al در زمینه Al_2O_3 و تخلخل‌های حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی این دو ماده در تصاویر SEM کاملاً قابل مشاهده می‌باشند. نتایج حاصل از بررسی چگالی و تخلخل نشان می‌دهد به علت تاثیر پارامترهای مختلف، اختلاف چگالی Al و Al_2O_3 ، تفاوت ضریب انبساط حرارتی این دو ماده، دما، ترکیب و وابستگی آنها به هم نمی‌توان ترکیب و دمای خاصی را به عنوان بهینه انتخاب نمود. اما نتیجه‌ای که از این تحقیق حاصل شده است نشان می‌دهد که در دمای 1300°C پایین‌ترین میزان تخلخل حاصل می‌شود.

منابع

1. Derek hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University, (1981).
2. Tongxiang Fan and Di Zhang, "Fabrication of in situ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite via remelting", Journal of Materials Processing Technology, Volume 142, Issue 2, PP 556-561(2003).
3. J. Fridlyander, "Metal matrix composites", London, Chapman & Hall, (1995).
4. Minoru taya, "Metal matrix composites", Oxford pergamon, (1989).
5. M.O. Richardson, "Polymer engineering composite", (1997).
6. S. Banerjee, S. K. Roy, "Net-shape forming of bi-continuous $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite by displacement reaction", (2001).
7. K. Engi. K. Cha Wia, "Ceramic matrix composite", Chapman & Hall, (1993).
8. Dickon H. L. Ng, Qing Zhao, "Formation of aluminum/alumina ceramic matrix composite by oxidizing an Al-Si-Mg alloy", Journal of the European Ceramic Society, Volume 21, Issue 8, PP 1049-1053 (2001).
9. P. Puri and V. Yang, "Multi-Scale Modeling of Nano Aluminum Particle Ignition and Combustion, The Pennsylvanian State University, (2006).
10. J. Zhang, "Wear behavior of Lanxide $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite", Wear, Volume 215, Issues1-2, PP 34-39(1998).
11. A. Muntiz, M. Metzeger and R. Mehrabian, "The Interface Phase in Al-Mg/ Al_2O_3 Composites", Metal Trans. A, Vol.10A, p.1491(1979).
12. T. Das & P. Munroe, "Interfacial Behavior of 6061/ Al_2O_3 Metal Matrix Composites", Material Science and Technology, Vol.13, PP.778-784(1997).