فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵
صفحات ۱-۹
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

شبیه سازی رشد ترک با شکست ذرات در مدل با توزیع خوشه ای ذرات SiC در کامپوزیت زمینه آلومینیومی

پویا خوش کلامیان، محمد صابر بای و رضا صالحی

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

امروز با پیشرفت تکنولوژی روز به روز نیاز به مواد مهندسی جدید با کیفیت بالاتر احساس می شود.کامپوزیت ها به عنوان مواد جدیدی به صنعت معرفی شده اند که به مرور زمان انواع مختلفی از آن ها با مواد مختلف تقویت کننده سنتز شدند. خواص برجسته ی این مواد مقاومت خستگی دانسیته ی کم و استحکام بسیار خوب می باشد. کامپوزیت های زمینه الومنیومی امروزه بسیار مورد توجه و بررسی قرار گرفته اند، این کامپوزیت ها وزن سبکی دارند و در مقابل تنش مقاومت خوبی از خود نشان میدهند و مقاومت خوردگی آنها بسیار مورد توجه است. بررسی شکست و رشد ترک این کامپوزیت ها در شرایط مختلف میتواند پیش بینی کند که کامپوزیتی که به عنوان پوشش در صنایع مختلف استفاده شده است در چه زمانی نیاز به ترمیم و تعویض دارد و یا با این داده ها میتوان در جهت بهبود خواص کامپوزیت ها استفاده کرد. در این پژوهش متوجه شدیم که در کامپوزیت های زمینه فلزی مکانیزم های رشد ترک بسیار به ذرات تقویت شده ی کامپوزیت ها، شکل و اندازه و جهت گیری و توزیع ذرات دارد. و در نمونه ی شبیه سازی شده ذراتی که در فاصله دورتری از نوک ترک قرار داشتند قابلیت تحمل تنش را داشتند. ذراتی که به نوک ترک و جلوی آن نزدیک تر بودند شکسته شده اند. کامپوزیت ها با مقاومت و خواص منحصر به فرد حتما آینده ی دنیای پوشش ها خواهند بود. و بررسی این زمینه بیشتر از همیشه مورد نیاز صنایع مختلف در کشور می باشد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت زمینه فلزی، شبیه سازی رشد ترک، توزیع خوشه ای ذرات SiC در کامپوزیت.

مقدمه

نانو ذرات سرامیکی و مواد فلزی، هردو شامل خصوصیات منحصر به فرد و مفاوت با یکدیر هستند.به خاطر اندازه دانه ها در مقیاس نانو، نان ذرات سرامیکی عموما دارای تنش های تسلیم بالا هستند که با رابطه ی هال-پچ نیز پیش بینی شده است، با اینکه ممکن است این رابطه در اندازه دانه های بسیار ریز به دلیل تغییرات در شکل و میزان شکل پذیری این دانه های بسیار ریز صادق نباشد.گزارش شده است که کامپوزیت زمینه فلزی دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکید جالب توجه ایی هستند، مانند خستگی خوب در سیکل های ریاد ، مدول ویژه بالا، و پایداری حرارتی زیاد.در میان کامپوزیت های زمینه فلزی ، کامپوزیت های تقویت شده با درات، بع دلیل تولید آسان، هزینه های پایین و خصوصیات ایزوتروپیک ، از توجه ویژه ای برخوردار هستند. در سال های اخیر استفاده از کامپوزیت های زمینه فلزی با نانو درات تقویت کننده در ساختار ، پتاسیل به جود آوردن مجموعه ای از خصوصیات را دارد که، امکان ددست یابی به این خصوصیات توسط مواد و ساختارهای مرسوم وجود ندارد. کامپوزیت های زمینه فلزی آلومینیوم ی دسته مجزا از مواد مهندسی را در مقابل آلیاژی های مرسوم آلومینیوم به وجود آورده اند .با گسترش متد های نوین شکل دهی و ساخت و استفاده از مواد و درات تقویت کننده کم هزینه ، استفاده از این کامپوزیت ها درصنایع گوناگون بصورت گسترده ای رو به افزایش است. از میان کامپوزیت های زمینه فلزی ، زمینه آلومینیومی بعلت دداشتن چگالی پایین ، استحکام ویژه و چقرمگی بالا به عنوان فاز زمینه کاربردی زیادی دارد.AI در مقابل آهن دارای چگالی پایین ،قابلیت هدایت گرما و الکترسیته و نسبت استحکام به وزن بالاتر میباشد.از طرف دیگر AI در مقایسه با دیگر آلیاژها و فلزاتی چون Mg و یا Ti که دارای چگالی پایین هستند ارزان ترر میباشد.از جمله دیگر خواص برجسته Al مقاومت به خوردگی بالای آن در محیط می باشد.کامپ.زیت های زمینه فلزی آلومینیوم از یک توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه آلومینیومی تشکیل شده اند و خصوصیات پایه ای آن ها میتوانند توسط نوع،سایز ، شکل و مقدار ذرات کنترل گردند.

کامپوریت ها و انواع آن ها

کامپوزیت ها موادی مرکب با ساختار غیر همگن میباشند که کارایی کامل تری از اجزای سازنده ی خود دارند. [۱]
به طور کلی کامپوزیت ها دارای دو جز میباشند:۱-زمینه ۲- تقویت کننده

مقدار فاز تقویت کننده از زمینه میباشد، همچنین فازهای تقویت کننده معمولا سخت تر بوده و دارای خواص مکانیکی بالاتری از فازهای زمینه میباشند. کامپوزیت ها بر اساس فاز زمینه به انواع زیر تقسیم میشوند:

۱- کامپوزیت با زمینه پلیمری
۲- کامپوزیت با زمینه سرامیکی
۳- کامپوزیت های کربن-کربن
۴- کامپوزیت با زمینه بین فلزی
۵- کامپوزیت با زمینه فلزی

خواص آلومینیوم به عنوان فاز زمینه کامپوزیت

آلیاژهای الومینیوم که دارای استحکام بالا و چقرمگی تقریبا بالا نسبت به وزن پایین هستند، کرایی بسیار خوبی از خود نشان داده و ماده اصلی مورد استفاده در سازه های فضایی برای سالها بوده اند.اما هم فرسایش و هم خستی در آلیاژهای اومینیوم مشکلاتی را به بار آورده اند[۳]. آلومینیوم خالص استحکام پایینی دارد . استحکام آلومینیوم را میتوان با افزودن عناصر آلیاژی افزایش داد. ازدیگر روش های افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم و آلیاژهای آن ، کامپوزیت کردن آن ها می باشد [۳]

برخی از خصوصیات الومینیوم را میتوانید در جدول ۱ مشاهده فرمایید.

جدول۱. برخی از خواص آلومینیوم خالص [۳]

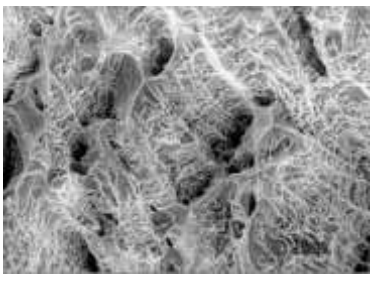
۲,۷	دانسیته (g/cm^3)
۲۵	سختی برینل
۱۴۰	سختی ویکرس
۴۵	استحکام کششی نهایی (MPa)
۱۰	درصد استحکام کششی (MPa)
٪۵۰	کشیدگی
۶۲	مدول الاستیسیته(GPa)
۲۶	مدول برشی(GPa)
۶۶۰	نقطه ذوب (درجه سانتی گراد)

دلیل استفاده از کامپوزیت آلومینیوم در صنایع

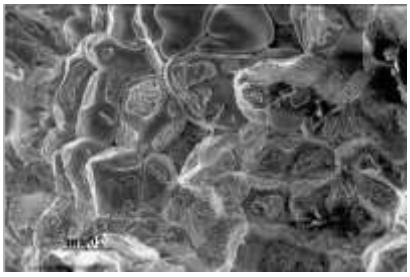
کامپوزیت زمینه فلزی مورد توجه بسیاری از صنایع از جمله هوافضا، صنایع دفاعی و خودرو سازی میباشد.در میان کامپوزیت های زمینه فلزی ، کامپوزیت آلومینیوم به عنوان گروهی از مواد پیشرفتهجدید مورد توجه قرار دارند.از رایج ترین کامپوزیت های زمینه آلومنیوم میتوان از گرافیت-آلومینیوم و Al-SiC نام برد.از جمله خواص این کامپوزیت ها میتوان وزن کم ، استحکام باللا ،مدول ویژه بالا،ضریب انبساط حرارتی پایین و خواص خوب مقاومت به سایش و خوردگی را نام برد.[۱]

سطوح شکست کامپوزیت های آلومینیوم

شکل ۱ و ۲ سطح شکست آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت زمینه فلزی آلومنیوم از نمونه های تحت ازمایش شکست را مورد بررسی قرار داده اند.در شکل ۱ ملاحظه میشود که شبکهآلیاژ الومینیوم یک نوع شکست نرم را آشکار ساخته که همراه با میکرو ترکهای مجزا در زمینه است. مناطق برزگی از سطح شکست با توزیع تکراری از گودالها پوشیده شده اند که نمایانگر شکست ترد است.به هر حال شکست کامپوزیت زمینه فلزی الومینیوم با ذرات SiC نشان دهنده ی تبدیل شدن مدل شکست ترد به شکست کلیواژی بخاطر حضور ذرات کوارتز میباشد[۴]



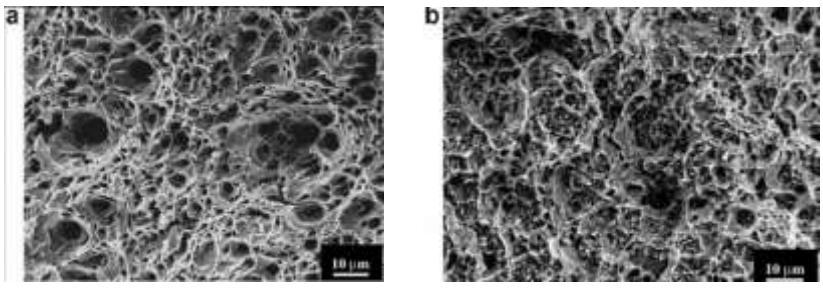
شکل ۱. تصویر SEM از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم [۴]



شکل ۲. تصویر SEM از سطح شکست کامپوزیت با ۹٪ حجمی ذرات تقویت کننده SiC [۴]

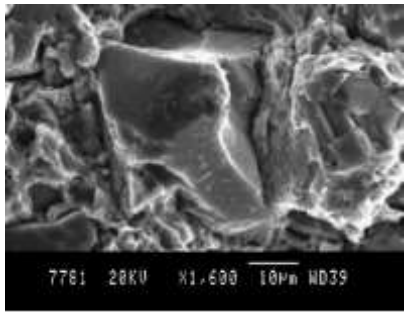
شکست ترد به شکست کلیواژی به خاطر حضور ذرات کوارتز میباشد [۴]

یک مقایسه از سطوح شکست آلیاژ آلومینیوم تقویت نشده و کامپوزیت تقویت شده آلومینیوم (6061Al-15Vol. %SiC) در تصویر میکروسکوپ SEM در شکل ۳ نشان دارده شده است.تصویر (A) از الیاژ تقویت نشده و تصویر (B) از کامپوزیت با ذرات تقویت کننده است.سطوح، مربوط به نمونه هایی هستند که شکست تحت شرایط یکسان آزمایش در آنها رخ داده است.همتنطور که مشاهده می شود، یک شکست نرم معمولی با حضور پستی و باندی و گودال هایی که مروبوط به تغییر فرم پلاستیک موضعی در درون دانه ها است رخ داده است، بنابراین یک شکست از نوع بین دانه ای قابل مشاهده است.همچنینی کامپوزیت حضور ذرات تقویت کننده را در اطراف مناطقی که تغییر فرم پلاستیک صورت گرفته است نشان میدهد.ددر اصل این تصاویر اشاره بر آن دارند که تغییر شکل و مکانیزم شکست مشابهی در پروسه شکست ناشی از خزش این دو مده در دمای ۶۲۳ کلوین دخیل هستند.تنش موثر بر آلیاژ زمینه MPa۳۹ و بر روی کامپوزیت 42MPa محاسبه شد[۵]

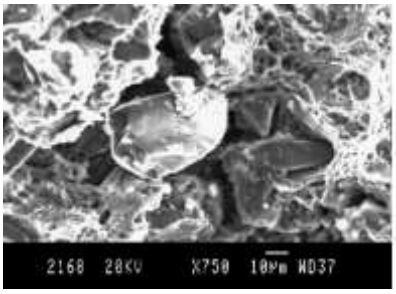


شکل ۳. سطح شکست از(a) آلیاژ تقویت نشده ۶۰۶۱الومینیوم و (b) کامپوزیت ۶۰۶۱AL-۱۵Vol SiC ، آزمایش شده در دمای ۶۲۳ کلوین [۵]

شکست در کامپوزیت های زمینه فلزی توسط ترکیبی از مکانیزم های شکست رخ میدهد، که باعث افزایش توزیع گودال ها در سطح میشود.گودال های بزرگتر مربوط به درات SiC هستند، در حالی که گودال های کوچکتر نشان دهنده شکست نرم زمینه کامپوزیت هستند.شکست کلیواژی ذرات SiC نیز مشاهده شد.در بزرگنمایی بالاتری از تصویر SEM در شکل ۳ شکست کلیواژی در کامپوزیت Al-8%Sic نشان داده شده است.از این تصویر میتان نتیجه گرفت که بین درات تقویت کننده و زمینه آلومینیومی هیچ عدم تطابقی وجود نداشته و یک پیوند فصل مشترک قوی بین درات و زمینه در کامپوزیت ایجاد شده است.از طرف دیگر تصویر SEM از سطح شکست کامپوزیت 18%SiC در شکل ۴ ، غیر پیوستگی درات و زمینه را نشان میدهد.این عدم تطاابق علت کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت Al-18%SiCدر بارگذاری کششی است.کامپوزیت Al-18%SiC خواص مکانیکی برتری را در مقایسه با آلیاژ تقویت نشده Al و همچنین دو کامپوزیت Al-18%SiC و Al-12%SiC از خود نشان داد. این برتری به دلیل توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده و همچنین پیوند خوب فصل مشترک ذرات و زمینه در کامپوزیت Al-8%SiC بوده است. [۳]



شکل ۴. سطح شکست نشان دهنده ی ذرات کلیواژ و یک پیوند بین ذره ای قوی در Al-8%SiC [۳]



شکل ۵. تصویر یک ذره ناپیوسته در سطح شکست Al-8%SiC [۳]

آنایز ترک در کامپوزیت

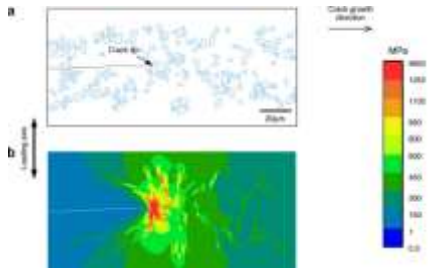
رشد ترک در کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات مانند Al-SiC بسیار وابسته به میکرو ساختار ذرات تقویت کننده است[۶] . نشان داده شد است که مکانیزم های رشد ترک وابستگی بسیار زیادی به شکل ، اداره، جهت گیری و توزیع ذرات دارند[۷-۸]

مناطق اطراف نوک ترک در ششرایط تنش بسیار بالا قرار دارند و با وجود اینک هلاستیسیته زمینه در آن آزاد شدن این تنش همکاری میکند، به نظر میرسد که فاکتور تمرکز تنش در نوک ترک به اندازه کافی بالا است که باعث شکست ذرات شود.همینن ذرات می شکنند توانایی تحمل تنش کامپوزیت تحت تاثیر قرار می گیرد .

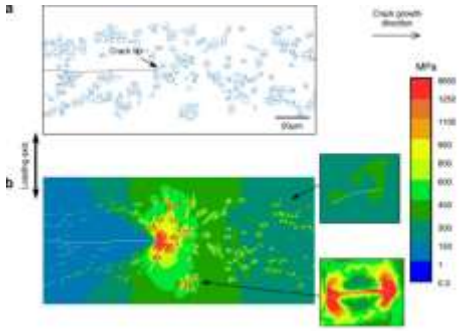
دیده شد که تجمع ذرات ، مکان های ترجیحی برای جوانه زنی ترک ها است.ترک ها از مکان هایی که نواحی کوچیکی از زمینه توسط ذرات احاطه شده اند شروع شده، و منجر به موضعی شدن کرنش و ناپیوستگی زود رس ذر با زمینه و نهایتا شکست ذره شد.یکی از مهمتترین خصوصیات ریز ساختاری در کامپوزیت های زمنه فلزی ، نحوه توزیع ذرات در آنها است[۹]

شبیه سازی ترک در کامپوزیت ها

شکل ۶ و۷ مقایسه دو مدل سازی میکروساختاری را ، یکی با شکست ذرات و دیگری بدون شکست ذرات نشان میدهند. توزیع تنش (برای تنش 48MPa) در نوک ترک و مسیر شبیه سازی شده و حرکت ترک در نمونه های با توزیع ذرات SiC نشان داده شده است.به این نکته توجه شود که توزیع تنش با شکست ذرات تغییر می کند و مسیر حرکت ترک نیز متفاوت میشود.ذراتی که در فاصله دورتری از نوک ترک قرار دارند تنش را تحمل میکنند. ذرات نزدیکتر به نوک ترک و جلوی آن شکسته شده اند. به دلیل شکست ذرات ، میکروترک ها در جلوی نوک ترک تشکیل میشوند. اگر ذرات در یک تنش معین بشکنند ، انگاه بار اعمالی باید بر روی طرح توزیع تنش و مسیر حرکت ترک تاثیر گذار باشد. به منظور بررسی این موضوع، بار اعمالی از ۴۸ MPaبه ۷ MPa تغییر پیدا کرد.یک ترک ایجاد شد و اجازه رشد تحت تنش اعمالی را پیدا کرد. هیچ یک از ذرات تحت تنش ۷ MPa دچار شکست نشدند، چراکه تنش در ناحی نوک ترک کمتر از استحکام شکست بود. نکته جالب توجه در اینجا این اس که مسیر شبیه سازی شده حرکت ترک در این حالت شبیه شکل ۶ بود.به دلیل اینکه ذرات در این دو حالت نشکسته اند ، قابلیت انرا داشته اند که ترک را منحرف کرده و مسیر آنرا بطور مشابه تحت تاثیر قرار دهند.



شکل ۶. شبیه سازی رشد ترک بدون شکست ذرات در مدل با توزیع خوشه ای درات SiC
(a) مسیر شبیه سازی شده ترک و (b) طرح توزیع تنش در اطراف نوک ترک در تنش اعمالی MPa۴۸



شکل ۷. شبیه سازی رشد ترک با شکست ذرات در مدل با توزیع خوشه ای درات SiC

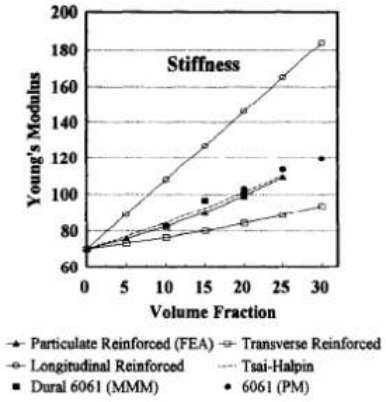
(a)مسیر شبیه سازی شده ترک و (b) طرح توزیع تنش در اطراف نوک ترک در تنش اعمالی MPa۴۸

طرح توزیع تنش نیز مشابه بود بااین تفاوت که مقدار آن بخاطر میزان تنش اعمای، تقاوت داشت. تنش دیگری به مقدار ۱۴ MPa بر روی میکرو ساختاری مشابه و شرایطی مشابه ، شبیه سازی گردید . این بار ذرات جلوی نوک ترک شکستند، اما منطقه شکست ذرات بسیار کوچکتر از آن ر مقایسه با شکل ۷ بود.توجه شد که ذرات دورتر از نوکک ترک نیز نقش تنش را تحمل میکنند.این حالت شبیه سازی تنش کاملا با شکل ۶ که شکست ذرات نقشی ندارد، فرق دارد.شکست تعداد کمی اذرات در این حالت در جلوی ترک باعث تغییر مسیر در حرکت آن گردید.مشاهده شد که با افزایش مقدار تنش ، تمایل ذرات شکسته شده برای جذب ترک اصلی نیز افزایش می یابد.

تاثیر ذرات تقویت کنده بر استحکام کامپوزیت های آلومینیوم

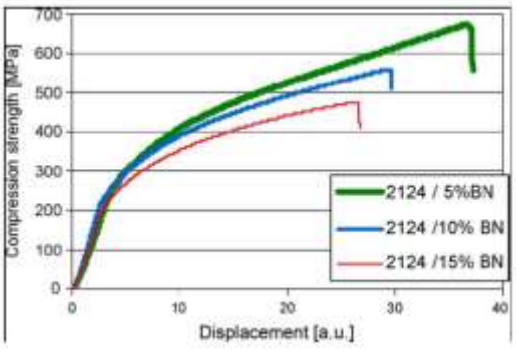
یک افزایش غیر خطی در استحکام ، با افزایش کسر حجمی ذرات دیده شد که همراه با فزایش سریعتر در کسرهای حجمی بلاتر بود، به خصوص در مقادیر کرنش بالاتر.این مطلب به صورت فیزیکی نشان میدهد که کار سختی در زمینه و یا توانایی کامپوزیت برای انتقال تنش به ذرات،هریک به تنهایی یا توامان ، با مقدار ذرات و میزان کرنش کلی تغییر میکنند. قابل توجه است که با افزایش کسر حجمی ۱- نرخ کار سختی کامپوزیت افزایش پیدا میکند ۲- استحکام کامپوزیت افزایش می یابد ۳- منحنی تنش و کرنش به سمت بالا شیفت میکند [۱۰]

رابطه استحکام کامپوزیت با مقدار ذرات تقویت کننده در شکل ۸ نشان داده شده است که در آن MMM به معنای تولید ماده از طریق مخلوط فلز مذاب و PM به معنای تولید از روش متالوژی پودر میباشد. استحکام کامپوزیت ها با ذرات غیر پیوسته نسبت به کامپوزیت های تقویت شده با فیبر هاای پیوسته جهت دار که در راستای فیبر ها تحت بارگذاری قرار گرفته بودند ، کمتر بود. اما در بارگذاری زاویه دار با جهت یبره در همان کامپوزیت ها ، همان گونه که انتظار میرفت استحکام کاهش یافت.



شکل ۸. نسبت استحکام به کسر حجمی ذرات SiC در کامپوزیت های زمینه آلومینیومی [۱۰]

دلیل تغییر غیر خطی استحکام کامپوزیت ها با کسر حجمی ذرات ، عکس العمل بین ذرات و زمینه و بین خود ذرات می باشد.قید و بند بین ذرات ، خصوصیات انتقال تنش به هر فاز و همچنین قابلیت انتشار تنش به ذرات را تحت تاثیر قرار میدهد.نحوه تقسیم تنش میانگین ، تعیین کننده استحکام کامپوزیت است.[۱۰] تمرکز های تنش ایجاد شده به دلیل اختلاف در خصوصیات مکانیکی ذرات و زمینه منجر به شکست مواد میشود.شروع شکست یک پدیده موضعی بوده پیک های تنش و مقدار کرنش در کامپوزیت ، تعیین کننده و کنترل کننده مکانیزم شکست خواهند بود.واضح است که این پیک تنش هاا در زمینه کامپوزیت بسیار بستگی به مقدار ذرات تقویت کننده و میزان کرنش دارد.تمرکز تنش موضعی به دلیل افزایش مقدار ذرات تقویت کننده آشکار شد.مشاهده گردید حضور ذرات فاز ثانویه در یک کامپوزیت باعث بروزتمرکز تنش شده و افزایش مقدار ذرات، تمرکز تنشهای موضعی را تشدید کرد.با کاهش فواصل ذرات داخلی، مناطق تنش و کرنش یک ذره از طریق زمینه در راستای جهت بارگذاری به ذره بعدی انتقال یافت [۱۰] زمانی که سهم ذرات تقویت کنندهAL_2O_3 بیشتر شد، آنگاه نهایت استحکام فشاری (UCS) در کامپوزیت ها کاهش یافت.کاهش ناگهانی استحکام فشاری مشاهده شده در نمودار تنش- کرنش مربوط به کاهش پیوستگی مواد کامپوزیت توسط ترک ها بوده است.بر مبنای تست های انجام شده میتوان اظهار داشت که با افزایش مقدار ذرات AL_2O_3 در زمینه آلومینیومی ، استحکام فشاری کامپوزیت تحت تاثیر منفی قرار گرفته، و همگنین بیشینه استحکام کششی (UTS) و تنش تسلیم (YS) برای کامپوزیت تقویت شده با ۱۵٪ذرات AL_2O_3 کاهش پیدا کردند [۱۱] تاثیر سهم ذرات تقویت کننده BN بر روی استحکام فشاری کامپوزیت ها در نمودار تنش کرنش شکل ۱۰ نشان داده شده است. براساس نتایج، همه کامپوزیت استحکام فشاری کمتری را در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم تقویت نشده از خود نشان دادند و هرچه سهم ذرات BN بیشتر شد، بیشینه استحکام فشاری کاهش یافت [۱۲]



شکل ۹. نمودار تنش فشاری کامپوزیت آلومینوم A-2124 تقویت شده با ذرات BN [۱۲]

افزایش BN خواص کششی را کاهش داد و تجمع بزرگتر ذرات، کاهش بیشت خصوصیات را منج شد. اما ذرات AL_2O_3 خصوصیات کششی را با افزایش سهم خود در کامپوزیت افزایش دادند اندازه بزرگتر ذرات سرامیکی BN خواص کششی پایین تر کامپوزیت A-2124/BN را توجیه میکند اما اندازه ذرات نمیتواند تنها دلیل ضعف این مواد باشد. در مورد ذرات BN، غیر پیوستگی بین ذرات و زمینه که در میان مرز بین فاز ها حرکت میکند نشانگر پیوند ضعیف بین ذرات و زمینه است که نهایتا تاثیر گذر بر روی انتقال تنش بین هر رو جز کامپوزیت بوده است [۱۲]

نتیجه گیری

کامپوزیت های الومنیومی تقویت شده با ذرات ، به عنوان یک ماده مهندسی مهم که کاربرد های عمده ای در صنعت دارند مود توجه قرار گرفته اند.علت جلب توجه این مواد مربوط به خواص مطلوب آنها شامل دانسیته پایین، استحکام بالا، مقاومت سایشی بالای خود کاربرد های زیادی دارند.ریخته گری و متالوژی پودر دو روش اصلی برای تولید کامپوزیت های زمینه آلونیوم میباشند، که روش متالوژی پودر نسبت به ریخته گری پیچیده تر بوده اما سطح تماس بهتری بین ذرات و زمینه کامپوزیت را فراهم میاورد.یکی از مهم ترین مزایای این روش در مقایسه با روش های ذوری این است که درجه حرارت پایین در این روش پایین تر است، به همین دلیل از برهم کنش بین فاز زمینه و تقویت کننده و ایجاد فازهای ناخواسته ناشی از آن جلوگیری میشود. متوجه شدیم که در کامپوزیت های زمینه فلزی مکانیزم های رشد ترک بسیار به ذرات تقویت شده ی کامپوزیت ها، شکل و اندازه و جهت گیری و توزیع ذرات دارد. و در نمونه ی شبیه سازی شده ذراتی که در فاصله دورتری از نوک ترک قرار داشتند قابلیت تحمل تنش را داشتند. ذراتی که به نوک ترک و جلوی آن نزدیک تر بودند شکسته شده اند. هنگامی که شبیه سازی دیگری بر روی میکرو ساختار مشابه اما با ۱۴ MPa انجام گردید مشاهده شد که مقدار منطقه ی شکست در مقایسه با تنش ۴۸ MPa بسیار کمتر بود و ذرات دورتر از نوک ترک نیر تنش را طاقت اوردند ولی در این حالت شکست ذرات به تنهایی با اهمیت بودند و باعث تغییر مسیر ترک میشدند. مشاهدات مشخص کرد که هرگاه فاز دومی به ساختار کامپوزیت اضافه می شود و یا مقدار ذرات که زیاد می شود تمرکز تنش را در کامپوزیت تشدید میکند.

مراجع

1-J.M Torralba et al, P/M aluminum matrix composites: an overview, Journal of Materials Processing Technology, Volume 133, Issues 1–2, 1 February 2003, Pages 203-206, ISSN 0924-0136

2-ASM,Engineered materials handbook volume 1,composite,page 27

3-Ranjit Bauri, M.K. Surappa, Processing and properties of Al–Li–SiCp composites, Science and Technology of Advanced Materials, Volume 8, Issue 6, September 2007, Pages 494-502, ISSN 1468-6996

4-Joel Hemanth, Quartz (SiO2p) reinforced chilled metal matrix composite (CMMC) for automotive applications, Materials & Design, Volume 30, Issue 2, February 2009, Pages 323-329, ISSN 0261-3069

5-Ricardo Fernández, Gaspar González-Doncel, Creep fracture and load transfer in metal–matrix composite, Scripta Materialia, Volume 59, Issue 10, November 2008, Pages 1135-1138, ISSN 1359-6462

6- Jian Ku Shang, Weikang Yu, R.O. Ritchie, Role of silicon carbide particles in fatigue crack growth in SiC-particulate-reinforced aluminum alloy composites, Materials Science and Engineering: A, Volume 102, Issue 2, 1988, Pages 181-192, ISSN 0921-5093

7-N. Chawla, V.V. Ganesh, B. Wunsch, Three-dimensional (3D) microstructure visualization and finite element modeling of the mechanical behavior of SiC particle reinforced aluminum composites, Scripta Materialia, Volume 51, Issue 2, July 2004, Pages 161-165, ISSN 1359-6462

8-N. Chawla, R.S. Sidhu, V.V. Ganesh, Three-dimensional visualization and microstructure-based modeling of deformation in particle-reinforced composites, Acta Materialia, Volume 54, Issue 6, April 2006, Pages 1541-1548, ISSN 1359-6454

9-I. Sabirov, O. Kolednik, R.Z. Valiev, R. Pippan, Equal channel angular pressing of metal matrix composites: Effect on particle distribution and fracture toughness, Acta Materialia, Volume 53, Issue 18, October 2005, Pages 4919-4930, ISSN 1359-6454

10-X.Q. Xu, D.F. Watt, A numerical analysis of the effects of reinforcement content on strength and ductility in Al(SiC)p MMCs, Acta Materialia, Volume 44, Issue 11, 1996, Pages 4501-4511, ISSN 1359-6454

11-L.A. Dobrzański, A. Włodarczyk, M. Adamiak, Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al2O3 ceramic particles, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 162–163, 15 May 2005, Pages 27-32, ISSN 0924-0136

34-Leszek A. Dobrzański, Anna Włodarczyk, Marcin Adamiak, The structure and properties of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the BN or Al2O3 ceramic particles, Journal of Materials Processing Technology, Volume 175, Issues 1–3, 1 June 2006, Pages 186-191, ISSN 0924-0136