کامپوزیت $Al-B_4C$ و روش‌های ساخت آن

علی صداقت آهنگری حسین زاده*، آرش فرجی

گروه پژوهشی کامپوزیت و نانوپودر، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

دکتر علی صداقت، نویسنده مسئول مقاله، عضو هیات علمی پژوهشگاه مواد و انرژی

* a.sedaghat@merc.ac.ir

چکیده: کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در سالهای اخیر به دلیل پایداری حرارتی مناسب، استحکام بالا و مقاومت به خزش بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کاربید بور به سبب سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، پایداری شیمیایی و نقطه ذوب بالا در صنایع مختلفی کاربرد دارد. از طرف دیگرقیمت این ماده نسبتا بالاست و در شرایط تحریم تهیه آن مسائل خاصی دارد. لذا کامپوزیت‌های تقویت شده با آن مورد توجه هستند. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی B_4C به دلیل داشتن چگالی پایین، مقاومت خوب در برابر خوردگی، استحکام بالا، فرآیندهای تولید متنوع، قابلیت عملیات حرارتی در صنایع متنوعی نظیر انرژی هسته‌ای، هوافضا و خودروسازی کاربرد دارند. از میان روش‌های رایج جهت ساخت این نوع کامپوزیت‌ها روش حالت جامد بمنظور کاربردهای ویژه مانند انرژی هسته‌ای و هوافضا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: کاربید بور؛ کامپوزیت؛ آلومینیوم-کاربید بور؛ ساخت $Al-B_4C$.

۱- مقدمه

آلومینیوم و انواع آلیاژهای آن یکی از پر کاربردترین مواد فلزی مورد استفاده در صنعت می‌باشند. با توجه به تمایل شدید آلومینیوم به واکنش با اکسیژن نمی‌توان آن را به صورت خالص و فلزی استخراج نمود. از آلومینیوم و آلیاژهای آن امروزه در ساخت قطعات خودرو، هواپیما، خطوط انتقال برق فشار قوی و غیره استفاده می‌شود. همچنین آلومینیوم به صورت آلیاژی و کامپوزیتی در صنایع هوافضا به عنوان یک ماده اولیه مهم صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. آلومینیوم دارای نقطه ذوب ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد و خواصی ویژه‌ای نظیر چگالی کم، مقاومت بالا در برابر خوردگی، استحکام و استقامت بالا نسبت به وزن، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، غیر مغناطیس بودن و غیره می‌باشد [۱].

در میان ذرات سرامیکی کاربید بور به عنوان یک ماده استراتژیک محسوب می‌شود. کاربید بور دارای ویژگی‌ها و خواص عالی نظیر سختی بالا، نقطه ذوب زیاد (۲۴۴۷ درجه سانتی‌گراد)، دانسیته پایین ($۲/۵gr/cm^3$)، سطح مقطع بالا برای جذب نوترون، پایداری شیمیایی و غیره می‌باشد [۲]. علاوه بر این، به دلیل قابلیت بالای ایزوتوپ B10 در جذب نوترون و میزان جذب اشعه زیاد در برابر تابش، یک ماده استراتژیک و ارزشمند در صنایع اتمی به عنوان جاذب نوترون کاربرد دارد [۳]. همچنین، کامپوزیت‌های آلومینیوم تقویت شده با B_4C نیز در صنایع هسته‌ای کاربرد ویژه‌ای دارند[۲]. کاربید بور به دلیل وزن مخصوص پایین، در واکنش با اکسیژن گرمای احتراق بالایی تولید می‌کند که باعث می‌شود به عنوان سوخت جامد در موشک‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۴]. از دیگر کاربردهای آن می‌توان پایداری و مقاومت بالای کاربید بور در محلول‌های آبی، اسیدهای معدنی معمولی و اکثر قلیایی‌ها به علت پایین بودن انتالپی استاندارد تشکیل آنها نام برد [۵].

همچنین کاربید بور به علت مقاومت فشاری و سختی بسیار بالا و همچنین دانسیته کم برای ساخت صفحات زرهی سبک وزن برای حفاظت از هلیکوپترها، هواپیماها کاربرد دارد [۴].

نانوساختارها جامداتی می‌باشند که دارای اندازه دانه‌های کریستالی کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد [۶]. به خاطر دانه‌های بسیار ریز در مواد نانوکریستال و قرار گرفتن کسر بالایی از اتم‌ها در مرزدانه‌ها، این نوع ساختارها نسبت به ساختارهای معمولی دارای برتری بالایی می‌باشند. نفوذ

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]

اتمی سریع‌تر، کاهش چگالی، افزایش استحکام و سختی، بهبود انعطاف‌پذیری و چقرمگی، کاهش مدول الاستیک، ضریب انبساط حرارتی بالاتر، مقاومت الکتریکی بالاتر، هدایت حرارتی پایین‌تر، افزایش گرمای ویژه و بهبود خواص مغناطیسی مواد نانوکریستال در مقایسه با مواد درشت دانه از جمله خواص این مواد به حساب می‌آید [۷-۹].

۲- مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱- کامپوزیت $Al\text{-}B_4C$

آلیاژهای آلومینیوم تقویت شده با ذرات سرامیکی در سال‌های اخیر اهمیت صنعتی فراوانی را به خود جذب کرده‌اند. این مواد با ضریب انبساط حرارتی پایین، مدول ویژه بالا، وزن کم، استحکام بالا و مقاومت سایشی خوب تلفیقی از خواصی را دارا می‌باشند که در نوع خود بی نظیر می‌باشند. این مواد استحکام خود را در دماهای بالا حفظ می‌کنند. بهبود استحکام این مواد در دمای بالا به دلیل توانایی ذرات سرامیکی تقویت‌کننده به برهم‌کنش با نابجایی‌ها و مرزدانه‌ها، در محدوده دمایی وسیع‌تری متداول می‌باشد. در تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم از ذرات متفاوت سرامیکی مانند کاربید سیلیسیم، نیترید آلومینیوم، کاربید بور و آلومینا استفاده می‌شود [۱۱و۱۰]. مطالعات نسبتا محدودی بر تولید و ارزیابی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با روش‌های متالورژی پودر انجام شده است. به عنوان مثال نشان داده شده است که استحکام کششی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم حاوی ۱ درصد حجمی نیترید سیلیسیم با اندازه ۱۰ نانومتر با کامپوزیت زمینه آلومینیوم دارای ۱۵ درصد حجمی کاربید سیلیسیم با اندازه ابعاد ۳/۵ میکرومتر قابل مقایسه می‌باشد. این در حالی است که استحکام تسلیم نانو کامپوزیت Al/Si_3N_4 بیشتر است [۱۲].

کامپوزیت‌های فلزی بر پایه کاربید بور به دلیل خواص منحصر به فرد B_4C دارای مقاومت به سایش خوب، سختی بالا و وزن مخصوص پایین می‌باشند. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی B_4C به دلیل داشتن خواص بی نظیری مانند چگالی پایین، مقاومت به خوردگی خوب، استحکام بالا، فرآیندهای تولید متنوع، قابلیت عملیات حرارتی پذیری و غیره در صنایع متنوعی نظیر انرژی هسته‌ای، هوافضا، صنایع نظامی و خودروسازی کاربرد دارند. در واقع در این کامپوزیت‌ها زمینه داکتیل آلومینیومی با ذرات سرامیکی تقویت می‌شود که ترکیبی از خواص سرامیکی (استحکام و مدول بالا) و خواص فلزی (داکتیلیته و تافنس) را به وجود می‌آورد [۱۴و۱۳].

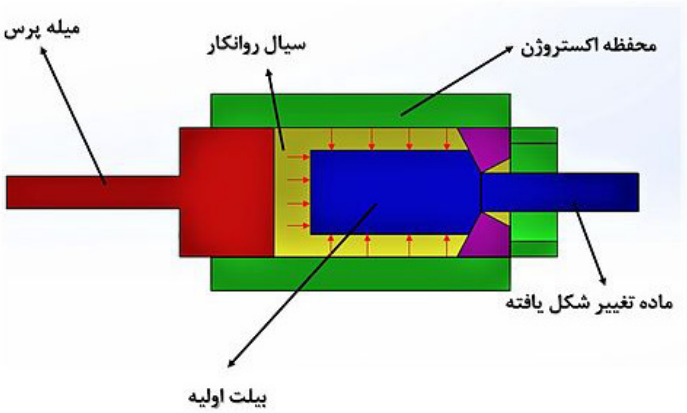
۲-۲-روش‌های ساخت کامپوزیت کاربید بور

روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی از جمله کامپوزیت‌های $Al\text{-}B_4C$ را می‌توان در دو گروه حالت مایع مانند ریخته‌گری گردابی و روش‌های حالت جامد مانند متالورژی پودر و آسیاکاری مکانیکی طبقه‌بندی نمود. اصولاً روش‌های حالت جامد مانند متالورژی پودر و آسیای مکانیکی معمولا برای تولید کامپوزیت‌های ذره‌ای با خواص مکانیکی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا این روش‌ها توزیع یکنواختی از ذرات ثانویه در زمینه را ایجاد می‌کنند. بنابراین کامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از این روش‌ها دارای خواص ایزوتروپ می‌باشند. علاوه بر این، چون دما در این روش‌ها نسبت به روش‌های حالت مایع (مانند ریخته‌گری گردابی) بسیار کمتر است بنابراین از انجام واکنش‌های ناخواسته بین زمینه و تقویت کننده که معمولا منجر به افت خواص مکانیکی می‌شوند، جلوگیری به عمل آمده و جدایش ذرات تقویت‌کننده به حداقل می‌رسد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش آسیاکاری مکانیکی نسبت به سایر روش‌ها، دستیابی به توزیع کاملا یکنواخت ذرات به دلیل ریزدانه شدن ساختار در حین انجام فرآیند است. همچنین فصل مشترک ذره و زمینه در روش آسیای مکانیکی از کیفیت بسیار بالاتری برخوردار است؛ به عبارت بهتر، فصل مشترک به وجود آمده در این روش عاری از هرگونه حفره و ترک می‌باشد. تمامی موارد گفته شده منجر به ارتقاء خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده به روش آسیاکاری مکانیکی در مقایسه با روش‌های متالورژی پودر و ریخته‌گری گردابی می‌شود. فرآیند آسیاکاری مکانیکی در آسیاهای با انرژی بالا انجام می‌شود. آسیای پرانرژی نوعی آسیا است که به دلیل نوع طراحی خاص خود و سرعت چرخش بالای گلوله‌ها می‌تواند انرژی بالایی را به مواد آسیاشونده منتقل کند. انواع مختلفی از تجهیزات آسیا نمودن پرانرژی برای تولید پودرهای آسیا شده مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است. این آسیاها در مکانیزم، ظرفیت، کارایی، و تجهیزات ثانویه برای سرد نمودن و حرارت دادن و غیره با هم تفاوت دارند [۱۰-۱۴].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]

جهت ساخت این کامپوزیت‌ها از پودرهای آلیاژسازی مکانیکی، تکنیک‌های مختلفی مانند سینتر [۱۵]، پرس گرم [۱۶]، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) [۱۷]، تغییرفرم پلاستیک شدید [۱۸] و اکستروژن گرم پودرها [۲۰و۱۹] مطرح هستند. پرس تک محوره سرد نیز یکی از راه‌های شکل دهی و متراکم کردن ذرات پودر با هندسه های مختلف است که ضمن هزینه کم، امکان تهیه تعداد فراوانی از قطعات را فراهم می‌سازد. در این حالت، قطعه پس از شکل داده شدن، به سینتر یا اکستروژن گرم نیازمند است. با اکستروژن گرم، امکان رسیدن به تراکم کامل بیشتر است، چرا که در آن سرعت کرنش برشی بیشتر و اتصال بین ذرات بسیار قویتر است. در مورد آلومینیوم و آلیاژهای آن نیز، اکستروژن گرم لایه اکسیدی که معمولاً روی پودر را می‌پوشاند شکسته و اتصال بهتری بین ذرات برقرار می‌سازد. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی نیز خوشه‌ای شدن ذرات تقویت کننده را محدود و در نتیجه پخش بهتری از آن در زمینه فلزی فراهم می‌کند [۲۱].

در اکستروژن (شکل۱) در اثر تلفیق فشردن گرم و کار مکانیکی گرم محصول چگال به دست می‌آید. مزایای آن عبارت است از نیاز به دمای کمتر نسبت به سایر روش‌ها و میزان محصول تولیدی بیشتر و امکان دستیابی به چگالی بالا. از معایب آن نیاز به شکل دهی ثانویه محصول در اغلب موارد می‌باشد [۲۲].



شکل ۱- شماتیک روش اکستروژن [۲۲].

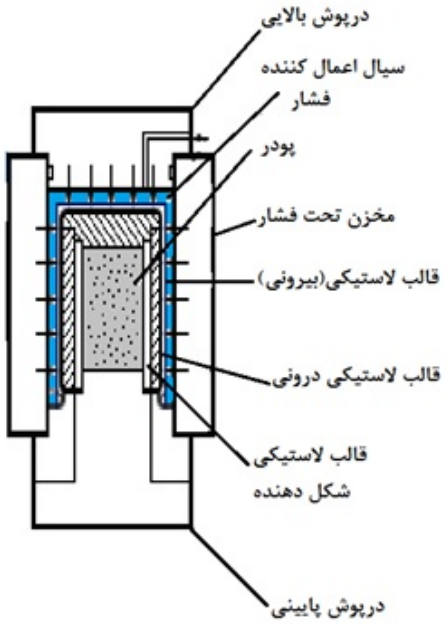
در پرس سرد ایزواستاتیک (شکل ۲) از اعمال یکنواخت و هم زمان فشار هیدرواستاتیکی خارجی به سطوح خارجی محفظه حاوی پودر توسط سیال یا گاز استفاده می‌شود. مزایای این روش عبارتند از دستیابی به استحکام فشاری مناسب، قابلیت شکل دهی شکل‌های پیچیده، حذف اصطکاک میان پودر و قالب و همچنین توزیع یکنواخت تر چگالی. محدودیت‌های این روش نیز شامل دشواری کنترل ابعادی قطعه خام، سرعت تولید پایین‌تر نسبت به فشرده سازی سرد تک یا دو محوره، عمر کم قالب سطح نه چندان صاف و هموار خشته پرس شده است [۲۳و۲۲].

در پرس سرد که ساده‌ترین و سریع‌ترین روش شکل دهی مخلوط پودری کامپوزیت‌هاست، اعمال فشار به پودر داخل قالب (معمولاً از جنس فلز) موجب چگالش می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به هزینه کم، سرعت تولید بالا و تنوع در انتخاب سیستم پودری اشاره کرد. از معایب این روش نیز عبارتند از دشواری در تهیه خشته خام با شکل نسبتا پیچیده، ایجاد گرادیان چگالی از سطح به عمق نمونه و در نتیجه عدم یکنواختی خواص مکانیکی، ایجاد دشواری در چگالش سیستم‌های کامپوزیتی حاوی درصد بالای تقویت کننده و ایجاد اصطکاک میان پانچ و پودر و دیواره قالب که نیاز به روانکاری را در پی خواهد داشت [۲۳و۲۲].

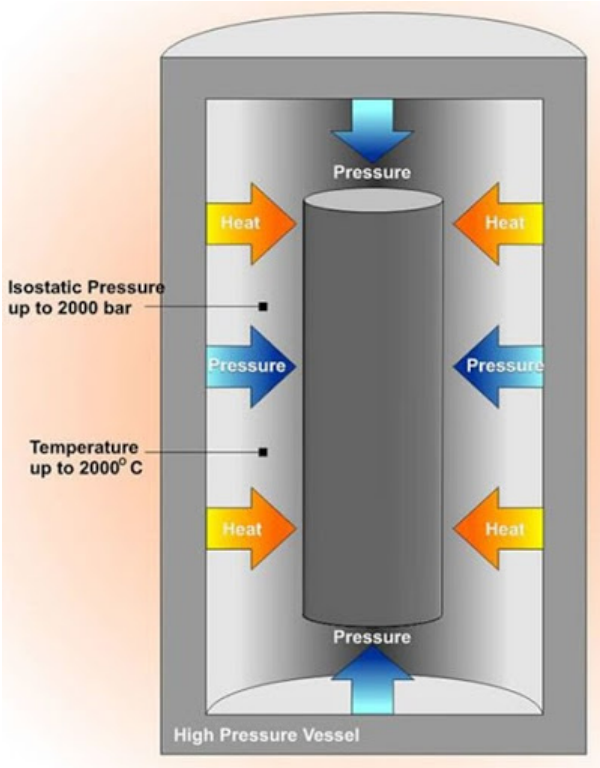
در پرس ایزواستاتیک گرم (شکل۳) از فشار هیدرواستاتیکی یک گاز در دمایی که برای فلزات بالاتر از دمای تبلور مجدد است، استفاده می‌گردد. مزایای فشرده سازی گرم ایزواستاتیک عبارتند از رسیدن به چگالی نزدیک به چگالی تئوری و در نتیجه توزیع یکنواخت خواص مکانیکی و دقت بالای ابعادی. در مقابل، معایب آن نیز شامل هزینه تولید بالا به علت گرانی تجهیزات و انجام عملیات در دمای بالا و سرعت پایین تولید می‌باشند [۲۳و۲۲].

در پرس گرم از اعمال دما به همراه فشار بهره گرفته می‌شود. در اینجا دمای عملیات از دمای تبلور مجدد فلز زمینه بالاتر است. به کار گرفتن دمای بالا، امکان استفاده از فشارهای کمتر و دستیابی به چگالی نزدیک مقدار تئوری را فراهم می‌آورد. از معایب این روش می‌توان به طولانی بودن چرخه تولید و عمر کوتاه تجهیزات به دلیل استفاده در دمای بالا اشاره کرد [۲۳و۲۲].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]



شکل ۲- شماتیک روش پرس سرد ایزواستاتیک [۲۳و۲۲].



شکل ۳- شماتیک روش پرس ایزواستاتیک گرم [۲۳و۲۲].

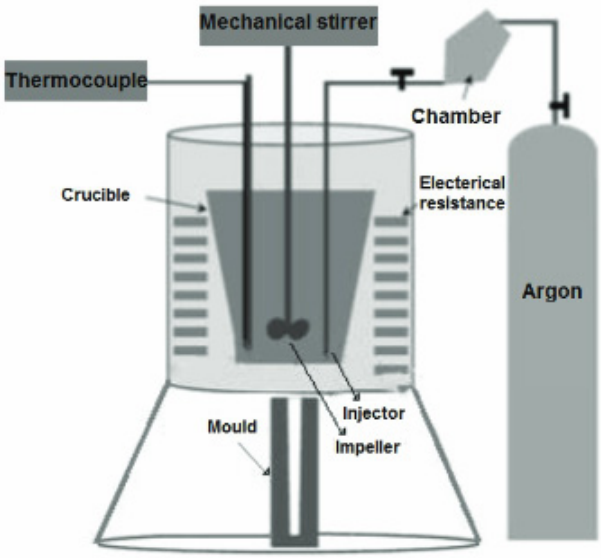
۳- ساخت کامپوزیت‌های Al-B_4C به روش حالت مایع

کریشما [۲۴] کامپوزیت‌های زمینه فلزی Al-B_4C را با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی با اندازه ذرات مختلف کاربید بور تهیه به دست آوردند و خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایجی که از تست استحکام کششی به دست آوردند، کاربید بور با اندازه ۱۰۵ میکرون را انتخاب نموده و با درصد وزنی‌های ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ مورد بررسی قرار دادند. بیشترین استحکام کششی را برای کامپوزیت در اندازه ذره ۱۰۵ میکرون با مقدار ۱۷۶/۳۷ مگاپاسکال گزارش کردند.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]

اما در مورد درصد وزنی‌های مختلف، استحکام کششی برای ۶ و ۸ درصد وزنی B_4C افزایش پیدا کرد ولی با افزایش درصد وزنی تقویت کننده به ۱۰ و ۱۲، استحکام کششی کاهش یافت. همچنین بیشترین مقدار سختی ویکرز را برای کامپوزیت با اندازه ذره (کاربید بور) ۲۵۰ میکرون گزارش نمودند.

راما [۲۵] به وسیله روش ریخته‌گری گردابی (شکل ۴) کامپوزیت $Al\text{-}B_4C$ را تهیه کرد. در این روش ذرات کاربید بور پیش گرم شده و آلیاژ آلومینیوم ذوب شده به صورت دستی به مدت ۲۰ دقیقه با هم مخلوط شدند و به داخل قالب فولادی ریخته شدند و نمونه‌ها به شکل میله‌های ریخته‌گری آماده شدند. آنها نتیجه گرفتند که توزیع یکنواختی از ذرات کاربید بور در ماتریس زمینه به دست آمد. همچنین مشاهده کردند که افزایش مقدار کاربید بور باعث افزایش سختی، مقاومت فشاری و کاهش چگالی کامپوزیت گردید [۲۵].



شکل ۴- شماتیک روش ریخته‌گری گردابی [۲۵].

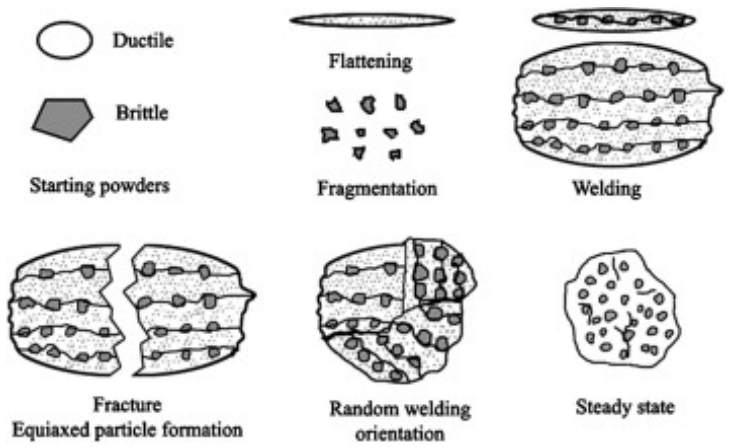
۴- ساخت کامپوزیت‌های $Al\text{-}B_4C$ به روش حالت جامد

عبدالله [۲۶] و همکارانش در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش متالورژی پودر کامپوزیت $Al\text{-}B_4C$ را تهیه کردند. پودرهای آلومینیوم و کاربید بور با درصدهای ۰، ۵ و ۱۰ درصد وزنی را توسط بالمیل مخلوط کرده و پودرهای بدست آمده را به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد سینتر کردند. آنها پارامترها را در زمان‌های ۸ و ۱۶ ساعت کنترل می‌کردند. مشاهده کردند که سختی کامپوزیت‌های با ۵ درصد وزنی B_4C کمتر از کامپوزیت با ۱۰ درصد وزنی B_4C است.

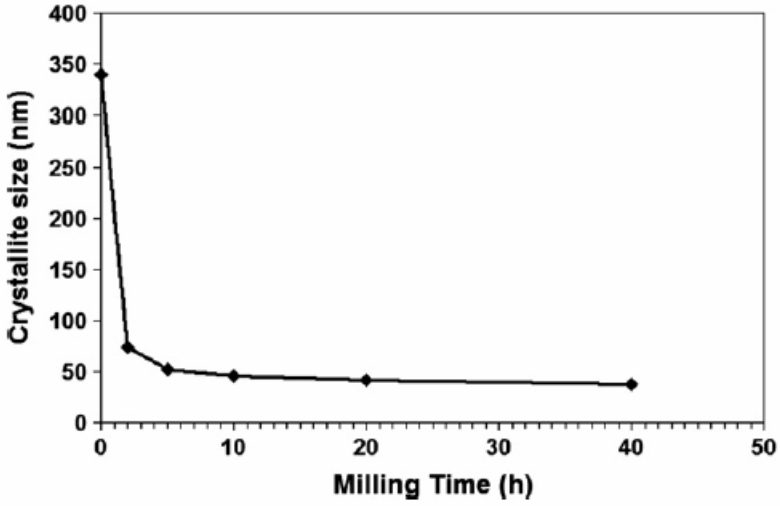
علیزاده و همکارانش [۲۷] برای سنتز نانوپودر آلومینیوم از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به مدت ۲۰ ساعت در آسیاب ماهواره‌ای تحت اتمسفر آرگون استفاده نمودند. همین فرآیند را نیز برای تولید نانوپودر کامپوزیتی $Al\text{-}4wt.\%B_4C$ بعنوان تقویت کننده در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی مورد استفاده قرار دادند. آنها براساس شکل ۵ مراحل مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نمایش دادند [۲۷]. آنها مشاهده کردند که افزودن ذرات کاربید بور باعث تسریع فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، افزایش نرخ کارسختی و شکسته شدن زمینه آلومینیومی می‌شود و همچنین در مقایسه با Al نانوساختار، با افزودن ۲ و ۴ درصد وزنی B_4C به زمینه آلومینیومی، استحکام تسلیم به ترتیب ۱۱ و ۱۷ درصد افزایش پیدا کرد درحالی که درصد ازدیاد طول به ترتیب ۳۸ و ۵۲ درصد به ترتیب کاهش داشته است [۲۷].

در سال ۲۰۱۱ شریفی و همکاران [۲۸] برای تولید نانوکامپوزیت Al/B_4C، نانوذرات کاربید بور (با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) و پودر آلومینیوم خالص را به وسیله بالمیل مخلوط کردند. سپس پودرها را تحت پرس گرم قرار دادند. شکل ۶، نمودار اندازه دانه Al را به عنوان تابعی از زمان آسیاب نشان می‌دهد.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]

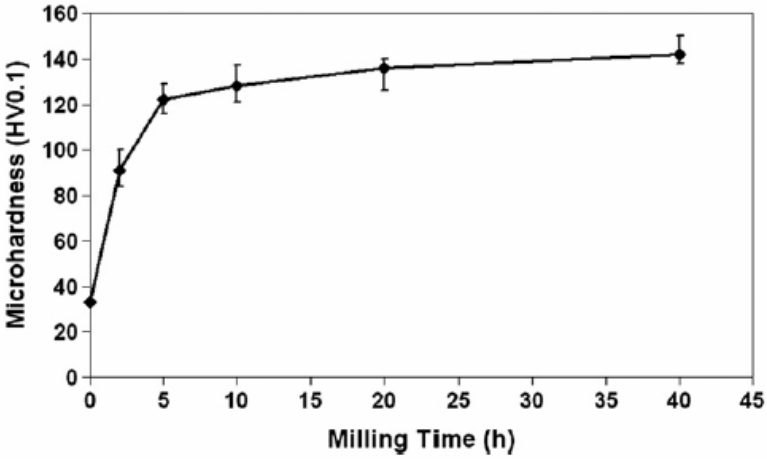


شکل ۵- مراحل مختلف آلیاژ سازی مکانیکی [۲۷].



شکل ۶- تغییرات اندازه دانه Al در حین آسیا برای نمونه Al-10Wt.%B_4C [۲۸].

با استفاده از فرایند آسیا می‌توان به راحتی Al با یک ساختار نانوبلوری به دست آورد. اندازه دانه آلومینیوم پس از ۲ ساعت آسیا حدود nm ۷۴ بود که پس از افزایش زمان آسیاب به ۵ ساعت، اندازه دانه آلومینیوم به nm ۵۲ تغییر کرد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که افزایش زمان آسیاب باعث افزایش سختی کامپوزیت می‌شود (شکل ۷) [۲۸].



شکل ۷- مقادیر میکروسختی به صورت تابعی از زمان آسیاب [۲۸]

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]

آنها به صورت یک فرض بیان کردند که نتایج این سختی نه تنها مربوط به تقویت دانه‌های Al و کرنش بزرگ توسط آلیاژسازی مکانیکی، بلکه به دلیل پراکندگی یکنواخت نانوذرات B_4C است. بیشترین سختی را در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد وزنی B_4C مشاهده کردند [۲۸].

۵- نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های $Al\text{-}B_4C$ را می‌توان به دو روش کلی (حالت مایع و حالت جامد) تولید کرد. به‌منظور ساخت این کامپوزیت به روش حالت مایع از ریخته‌گری گردابی استفاده شده است. در روش حالت جامد از متالورژی پودر و آسیاکاری مکانیکی بهره گرفته شده است. معمولاً روش‌های حالت جامد به دلیل توزیع کاملا یکنواخت و دمای بسیار پایین نسبت به روش‌های حالت مایع؛ دارای خواص ایزوتروپ هستند و از خواص مکانیکی و کیفیت بالایی برخوردار می‌باشند.

مراجع

[1] Randoloh, J., Robert, K., Ferry, L., (1995), Aluminum Structures, John Wiley&Sons Inc, united states of america, PP.10.13.
[2] Shi, L., (2003), "A low Temperature synthesis crystalline B4C ultrafine powders", Solid State Communications, vol.128, pp.5-7.
[3] Makariko, G.N., (1997), "Borides of IV b group", In Boron and Refractory Borides, V.I. Matkovich. Springer Verlage, Berlin.
[4] Schwetz, K.A., Lipp, A., (1985), "Boron carbide, boron nitride and metal borides", Uhlmann's Encycl. Indust. Chem, Vol.A4, pp.295-307.
[5] Bose, D.K., Nair, K.U., Gupta, C.K., (1986), "Production of high purity boron carbide", Hihg Temperature Materials and Process, Vol.7, pp.133-140.
[6] Suryanarayana, C., (1995), International Materials Reviews, Vol.40, No.2, pp.41-64.
[7] Suryanarayana, C., Koch, C.C., (2000), Hyperfine Interactions, Vol.130, pp.5-44.
[8] Murty, B.S., Datta, M.K., Pabi, S.K., (2003), Sadhana, Vol.28, pp.23-45.
[9] Fetch, H.J., Hellstern, E., Fu, Z., Johnson, W.L., (1990), Metallurgical Transactions, Vol.21A, pp.2333-2337.
[10] Suryanarayana, C., (2002), JOM, pp.24-27.
[11] Zhao, Y.H., Sheng, H.W., Lu, K., (2001), Acta mater. Vol.49, pp.365-375.
[12] Gleiter, H., (1989), Progress in Material Science, Vol.33, p.223.
[13] Kundsen, A., Refaniello, W., (1990), "Titanium diborid/boron carbide composites with high hardness and toughness", U. S. Patent 4957884.
[14] Shorokhod, V., Kristic, M.D., (1998), "Pressureless sintering of $B_4C\text{-}TiB_2$ ceramic composites", Material Science Forum, vol.283-284, pp.219-224.
[15] Koch, C.C., (1993), NanoStruct. Mater., 2, 109.
[16] Gleiter, H., (1995), NanoStruct. Mater., 6, 3.
[17] El-Mahdy, A.A., El-Eskandarany, S., Ahmed, H.A., Amer, A.A., (2000), J. Alloys Comp. 299, 244.
[18] Oehring, M., Appel, F., Pfullmann, Th., Bormann, R., (1995), Appl. Phys. Lett., 66, 941.
[19] He, L., Ma, E.J., (1996), J. Mater. Res., 11, 73.
[20] Hwang, S.J., Nash, P., Dollar, M., Dymek, D., (1992), Mater. Sci. Forum, 88–99, 611.
[21] Upadhyaya, G.S, (1997), "Powder Metallurgy Technology", Cambridge International Science.
[22] Mortensen, A., (2001), "Metal Matrix Composites in Industry: an Overview", MMC Assess Final Presentations, Last MMC VIII Conference, London, November 26-27.
[23] Schatt, W., (1997), "Powder Metallurgy Processing and Materials", European Powder Metallurgy Assocciation, 2nd Edition, Bellstone.
[24] Krishna, G., Rao, S., Vasudeva, (2013), Effect of Boron Carbide Reinforcement On Aluminium Matrix. International Journal of Metallurgical & Materials Vol. 3, Issue 1, 41-48.
[25] Rama Rao , S., Padmanabhan, G., (2012), Fabrication and mechanical properties of aluminium-boron carbide composites. International Journal of Materials and Biomaterials Applications.
[26] Abdullah, Y., (2012), Journal of Nuclear Related Technologies, Volume 9, No. 1.
[۲۷] ع. علیزاده، ع. عبداللهی، ز. نصیری، مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت $Al\text{-}B_4C$ تولید شده به روش‌های ریخته‌گری گردابی، متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی، ۱۳۹۱
[28] Sharifi, M.E., Enayati, M.H., (2011), Fabrication and evaluation of mechanical and tribology properties of boron carbide reinforced aluminium matrix nanocomposites. Materials and Design 32, 63-71.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-14]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.5.9]