



## بررسی تأثیر فرایند نورد گرم بر خواص و ریزساختار کامپوزیت Al-B<sub>4</sub>C به روش ریخته‌گری گردابی

مقداد خادمیان<sup>۱</sup>، مینا سعیدی حیدری<sup>۲</sup>، علی علیزاده<sup>۳\*</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

۳- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۴- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴، ali\_alizadeh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۰۶ دی ۱۳۹۲  
پذیرش: ۱۶ دی ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۰۲ مهر ۱۳۹۳  
کلید واژگان:  
کامپوزیت زمینه آلومینیومی  
کاربرد بور  
ریخته‌گری گردابی  
نورد گرم

### چکیده

در این مقاله تأثیر فرایند نورد گرم بر خواص و ریزساختار کامپوزیت Al-B<sub>4</sub>C تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی بررسی شده است. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، سه درصد حجمی ذرات B<sub>4</sub>C با میانگین اندازه ذرات ۳۰۰ نانو متر به مذاب آلیاژ Al-356 افزوده شد. عملیات نورد در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد روی قطعات ریخته‌گری حاصل از ۱۵ دقیقه اختلاط در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. برای بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی، آزمون‌های تخلخل سنجی، سختی سنجی و استحکام کششی انجام گرفت. ریزساختار نمونه‌ها نیز به وسیله میکروسکوپ الکترونی روشی بررسی شد. نتایج نشان دهنده کاهش میزان تخلخل، افزایش سختی و افزایش استحکام کششی قطعات کامپوزیتی نورد شده می‌باشد. میزان تخلخل قطعات کامپوزیتی قبل از عملیات نورد ۲/۰۵ درصد بود که پس از انجام عملیات نورد به ۰/۳۵ درصد کاهش یافته است. استحکام کششی و سختی قطعات کامپوزیتی قبل و پس از عملیات نورد نیز به ترتیب ۱۷۸ MPa و ۲۹۳ MPa و ۶۲ HBN و ۱۰۱ HBN به دست آمد. همچنین عملیات نورد گرم باعث نرم‌تر شدن شکست نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی شد.

## Investigation the effect of hot rolling process on properties and microstructure of Al-B<sub>4</sub>C composite by vortex

Meghdad Khademian<sup>1</sup>, Mina Saeedi Heydari<sup>2</sup>, Ali Alizadeh<sup>3\*</sup>, Hamid Reza Baharvandi<sup>4</sup>

1- Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

2- Department of Materials & Manufacturing Processes, South Tehran Branch of Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

4- Department of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 1774-15875 Tehran, Iran, ali\_alizadeh@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 27 December 2013  
Accepted 06 January 2014  
Available Online 24 September 2014

**Keywords:**  
Aluminum Matrix Composite  
Boron Carbide,  
Vortex  
hot rolling

### ABSTRACT

In this article the effect of hot rolling process on properties and microstructure of Al-B<sub>4</sub>C composite is investigated. To produce the composite samples, 3 vol.% B<sub>4</sub>C particles with 300 nm average grain size added to melted Al-356 alloy. Rolling process was done at 350 °C on vortex samples that is made after 15 minutes mixing at 850 °C. Porosimetry, hardness and tensile strength tests were carried out to investigate the physical and mechanical properties of composite samples. Microstructures of the samples were also investigated by using scanning electron microscopy. The results indicate lowering the amount of porosity, increasing hardness and increasing tensile strength of rolling composites. The amount of porosity before rolling process was 2.05% that is decreased to 0.35% after rolling process. Tensile strength and hardness of composites before and after rolling process achieved 178 MPa and 293 MPa and 62 HBN and 101 HBN respectively. Also hot rolling process caused to more ductile fracture of composites that is produced by vortex.

۱- مقدمه  
هدف از ساخت مواد کامپوزیتی زمینه فلزی، ترکیب خواص مطلوب فلزات و سرامیک‌ها می‌باشد. کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان به عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای قابلیت‌های اساسی از جمله دانسیته کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب انبساط حرارتی پایین و مقاومت سایشی خوب می‌باشند. معمولاً ترکیبی از این مواد در یک ماده غیر کامپوزیتی یافت نمی‌شود. افزودن ذرات دیرگداز مستحکم با مدول الاستیسیته بالا به زمینه فلزی منعطف، منجر به تولید موادی می‌شود که

۱- مقدمه  
هدف از ساخت مواد کامپوزیتی زمینه فلزی، ترکیب خواص مطلوب فلزات و سرامیک‌ها می‌باشد. کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان به عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای قابلیت‌های اساسی از جمله دانسیته

### Please cite this article using:

M. Khademian, M. Saeedi Heydari, A. Alizadeh, H. R. Baharvandi, Investigation the effect of hot rolling process on properties and microstructure of Al-B<sub>4</sub>C composite by vortex, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 140-146, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تنش بسیار بالا بر قطعه کامپوزیتی و هدایت آن از قطعه به ذرات به وسیله زمینه باعث ایجاد گشتاور در ذرات می‌شود. اگر این گشتاور به قدر کافی بزرگ باشد و مقاومت زمینه فلزی را از بین ببرد، می‌تواند باعث همسو شدن ذرات با جهت نورد شده و استحکام پیوند ذرات و زمینه را نیز افزایش دهد [۲۱].

محققان بسیاری رفتار کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با ذرات را مورد بررسی قرار داده‌اند. کار گرم (نورد و اکستروژن) منجر به تبلور مجدد در کامپوزیت ریخته‌گی می‌شود. به علت پلاستیسیته کم کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات در دمای اتاق، تغییر شکل گرم این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. به هنگام تغییر شکل گرم و به علت افزایش پلاستیسیته در زمینه، از تنش در اطراف ذرات تقویت کننده جلوگیری به عمل آمده و بنابراین میزان آسیب رسیدن به ذرات به علت ترک یا عدم انسجام فصل مشترک کاهش می‌یابد [۲۲].

برخی از گزارش‌ها حاکی از آن است که توزیع ذرات تقویت کننده در کامپوزیت‌های آلومینیومی ریخته‌گی می‌تواند به سبب کار گرم مکانیکی نظیر نورد، فورج و اکستروژن کردن بهبود یافته و در نتیجه منجر به افزایش استحکام کششی شود [۲۳]. بهبود خواص مکانیکی به وسیله نورد گرم به افزایش پیوستگی در فصل مشترک بین زمینه و ذرات نیز نسبت داده شده است [۲۲]. کامپوزیت‌های آلومینیومی ۷۰۷۵ حاوی ده درصد وزنی SiC و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، پس از نورد گرم نشان دهنده توزیع یکنواخت و پراکندگی خوب ذرات تقویت کننده در زمینه هستند [۲۴]. پس از فرایند نورد گرم کامپوزیت‌های آلومینیومی حاوی ذرات TiO<sub>2</sub> نیز ذرات افزودنی به صورت یکنواخت پراکنده شده و به خوبی با زمینه پیوند داده شده‌اند و هیچ تخلخلی نیز مشاهده نشده است [۲۵]. کامپوزیت‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ و ۷۱۰۸ حاوی SiC نیز پس از نورد گرم نشان دهنده توزیع یکنواخت تر ذرات تقویت کننده در زمینه هستند که منجر به افزایش خواص مکانیکی این قطعات شده است [۲۶]. با این حال تاکنون بررسی‌های کمی روی تأثیر فرایند نورد گرم کامپوزیت‌های ریخته‌گی آلومینیوم که با ذرات کاربید بور تقویت شده‌اند صورت گرفته است. به همین علت در این مقاله تأثیر فرایند نورد گرم بر میزان تخلخل، استحکام کششی و سختی قطعات ریخته‌گی A356-B<sub>4</sub>C بررسی شده است. همچنین سطح شکست قطعه کامپوزیتی قبل و پس از عملیات نورد نیز بررسی شده است.

## ۲- روش تجربی

در این پژوهش از مواد اولیه آلیاژ Al-356 و پودر کاربید بور با میانگین اندازه ذرات ۳۰۰ nm استفاده شد. ترکیب شمش آلیاژ Al-356 در جدول ۱ آورده شده است.

سیستم ریخته‌گری از سه بخش اصلی کوره، همزن و قالب تشکیل شده که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پروانه همزن از جنس گرافیتی با زاویه پره-های ۴۵° ساخته شده است. قالب ریخته‌گری فولادی نیز به شکل مکعب مستطیل و برای تهیه چهار نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵ cm و قطر ۳ cm در هر ذوب ریزی طراحی شده است.

به منظور افزایش میزان ترشوندگی ذرات سرامیکی به وسیله مذاب آلومینیوم، ذرات کاربید بور به وسیله پودر آلومینیوم خالص با اندازه دانه

دارای خواص بینابین ذرات سرامیکی و زمینه آلیاژی است [۱]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در سال‌های اخیر به علت وزن کم، استحکام و سفتی زیاد، مدول ویژه بالا و مقاومت سایشی بسیار عالی توسعه بسیار زیادی یافته‌اند. در حال حاضر این کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا، صنایع نظامی و خودروسازی و برای ساخت قطعات جنگنده‌ها و ماهواره‌ها، قطعات اتومبیل و غیره به کار می‌روند [۲،۳]. تاکنون اثر تقویت کننده‌های بسیاری مانند Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [۴،۵]، SiC [۶،۷]، AlN [۸،۹]، TiB<sub>2</sub> [۱۰، ۱۱]، B<sub>4</sub>C [۱۲، ۱۳] و گرافیت [۱۴] بر کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته است. در میان این تقویت کننده‌ها، B<sub>4</sub>C خواص بهتری دارد. این ماده سومین ماده سخت بعد از الماس و نیتريد بور مکعبی است [۱۵]. علاوه بر این دانسیته آن بسیار نزدیک به دانسیته آلیاژ آلومینیوم زمینه است (۲/۵۲ g/cm<sup>3</sup>) و به علت سختی بالا انتخاب مناسبی برای پوشش‌های مقاوم به ضربه می‌باشد. نقطه ذوب کاربید بور ۲۴۴۵ درجه سانتی‌گراد است که برای بهبود خواص حرارتی کامپوزیت سودمند است [۱۶، ۱۷].

روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در سه حالت جامد (متالورژی پودر، زینتر معمولی، پرس گرم فورجینگ، اکستروژن، نورد و ترکیبی از آن‌ها، اتصال نفوذی و شوک انفجاری)، مایع (ریخته‌گری گردابی، گریز از مرکز، تحت فشار، نیمه مایع-نیمه جامد نفوذدهی، درجا و پاششی) و گازی (رسوب فیزیکی و شیمیایی از فاز بخار) بررسی شده است. استفاده از روش‌های متداول شکل دهی فلزات با هزینه تولید نسبتاً پایین برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی از امتیازهای مهم این نوع کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. در این بین روش ریخته‌گری گردابی به دلیل راحتی فرآیند، انعطاف‌پذیری و صرفه اقتصادی، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ اما وجود نقایصی در ساختار قطعات تولیدی با این روش اجتناب ناپذیر است. عموماً برای کاهش مشکلات این روش از فرایندهای تکمیلی از جمله اکستروژن، نورد و غیره استفاده می‌شود. این روش‌ها باعث افزایش چشمگیری در خواص مکانیکی، توزیع مناسب‌تر ذرات، کاهش تخلخل، شکسته شدن خوشه‌های ذرات، بهبود پیوند بین ذره و زمینه و حتی جهت‌گیری مناسب‌تر ذرات در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی می‌شوند [۱۸، ۱۹]. عملیات نورد از نظر دمای انجام فرایند به دو دسته نورد سرد و نورد گرم تقسیم می‌شود. نورد سرد معمولاً برای تولید ورق و تسمه با پرداخت سطحی و دقت ابعادی بالا به کار گرفته می‌شود. همچنین در مواردی برای استحکام بخشی به قطعه از طریق کار مکانیکی از این فرایند استفاده می‌شود. نورد کردن قطعه در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجددش نورد گرم نامیده می‌شود. بنابراین در این فرایند فاصله زمانی بسیار کوتاهی بین کار مکانیکی و فرایند تبلور مجدد قطعه وجود دارد [۱۹]. نورد کامپوزیت‌ها شباهت بسیار زیادی در اصول فرایند به نورد آلیاژها دارد. اما به جهت استحکام بالاتر قطعات کامپوزیتی و وجود ذرات سرامیکی، تغییرات کوچکی در طی فرایند مشاهده می‌شود [۲۰]. استحکام بالاتر قطعات کامپوزیتی باعث افزایش تنش سیلان قطعه در زمان نورد می‌شود، که این موضوع مستلزم افزایش نیروی وارده از طرف غلتک‌ها به قطعه می‌گردد [۲۱].

همان‌طور که ذکر شد عملیات نورد بسیاری از مشکلاتی که کامپوزیت‌های ریخته‌گی دارند را از بین برده و یا بهبود می‌دهد. به عنوان مثال این عملیات با ایجاد تنش‌های برشی بسیار زیاد در زمینه باعث حرکت لایه-های زمینه بر هم و حذف و پر شدن بسیاری از تخلخل‌ها می‌شود. در صورتی که عملیات نورد در دماهای بالاتر انجام شود؛ به جهت کاهش تنش سیلان ماده، اثر بخشی بهتری ایجاد می‌کند. همچنین عملیات نورد به وسیله اعمال



شکل ۲ شمایی از قطعه کامپوزیتی قبل و بعد از عملیات نورد

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶

عنصر	درصد وزنی
Al	۹۱/۷۷
Si	۷
Fe	۰/۲۰
Cu	۰/۲۰
Mg	۰/۳۸
Mn	۰/۱۰
Zn	۰/۱۰
Ti	۰/۲۰
Ni	۰/۰۵

$$V = M - S \quad (1)$$

$$T = D/V = D/(M-S) \quad (2)$$

چگالی تئوری نیز با استفاده از چگالی آلیاژ آلومینیوم A356 و چگالی ذرات کاربرد بور که به ترتیب برابر با  $2/68 \text{ gr/cm}^3$  و  $2/5 \text{ gr/cm}^3$  بود محاسبه شد. درصد تخلخل (%P) در نمونه‌ها بر اساس اختلاف بین چگالی تئوری و واقعی و طبق رابطه ۳ به دست آمد.

$$\%P = [100 \times (\text{چگالی تئوری} / \text{چگالی واقعی} - \text{چگالی تئوری})] \quad (3)$$

برای تعیین استحکام کششی قطعات کامپوزیتی قبل و پس از نورد، سه نمونه بر اساس استاندارد ASTM-E8 ماشینکاری شدند. این آزمایش با استفاده از دستگاه آزمایش کشش ساخت شرکت زوییک آلمان با حداکثر خطای اندازه گیری استحکام کششی معادل ۰/۰۵ انجام شد که این میزان خطا اثر چندانی در نتایج نخواهد داشت. سرعت اعمال نیرو در این آزمایش برابر با ۱ میلی متر بر دقیقه بود.

به منظور تعیین میزان سختی و بررسی سطوح شکست، آماده سازی نمونه‌ها با سمباده‌زنی، پولیش قطعات و عملیات اچ کردن به وسیله محلول ۵ درصد حجمی اسید Hf صورت گرفت. ریزساختار و سطح شکست نمونه‌ها به وسیله دستگاه SEM ساخت شرکت فیلیپس هلند مدل XL 30 بررسی شد. همچنین برای تعیین سختی نمونه‌ها از آزمون برینل و با اعمال نیروی kgf  $31/25$  استفاده شد. قطر ساچمه فرورونده  $2/5 \text{ mm}$  بود. از هر نمونه پنج بار سختی گرفته شده و میانگین مقادیر بدست آمده به عنوان عدد نهایی در نظر گرفته شد.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ دانه‌بندی قطعه کامپوزیتی قبل و بعد از عملیات نورد نشان داده شده است. در تصویر ۳- (ب) به وضوح کشیدگی دانه در جهت محور نورد دیده می‌شود. انجام عملیات نورد بر نمونه‌های ریختگی باعث کوچک شدن اندازه دانه از  $63/19 \mu\text{m}$  به  $18/53 \mu\text{m}$  طبق استاندارد ASTM-E112 و نیز کشیدگی دانه‌ها در جهت محور نورد می‌گردد. اگر این عملیات در دمای محیط انجام شود؛ این آثار و مخصوصاً کاهش اندازه دانه بسیار واضح‌تر مشاهده می‌شود. زیرا افزایش دما باعث رشد دانه‌ها می‌شود [۲۱].

علاوه بر این در شکل ۳ مشاهده می‌شود که ذرات سیلیسیم عمدتاً در مرز دانه تجمع کرده و با فلش مشکی مشخص شده‌اند و ذرات کاربرد بور به وسیله دایره‌های نارنجی مشخص شده‌اند. پس از عملیات نورد گرم نیز ذرات سیلیسیم ریختگی با توجه به انجام عملیات نورد در مرز دانه و نیز سطح دانه

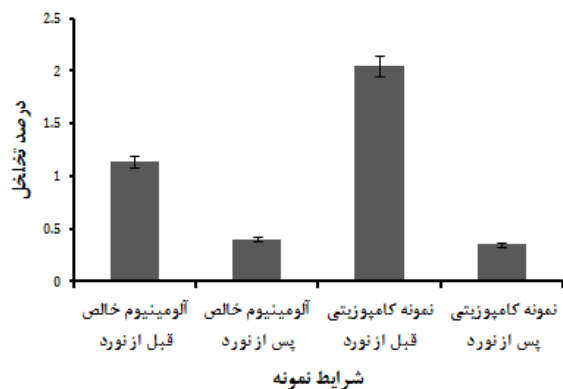


شکل ۱ شمایی از کوره دوبریزی

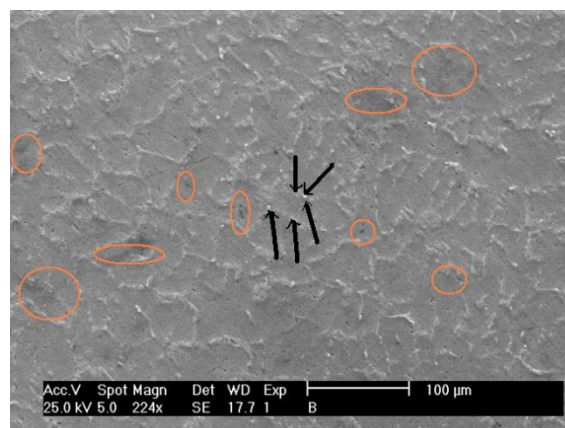
متوسط  $100 \mu\text{m}$  و نسبت وزنی پودر آلومینیوم به پودر کاربرد بور ۲ آسیاب مکانیکی شدند. محیط آسیاب اتانول و میزان دور آسیاب  $300 \text{ rpm}$  در مدت زمان ۲۰ دقیقه بود. پس از این مرحله ۳ درصد حجمی از پودر B<sub>4</sub>C (با در نظر گرفتن مقدار آلومینیوم روکش داده شده بر پودر) در فویل بسیار نازک آلومینیومی قرار گرفته و به آرامی در دمای  $850^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه به مذاب اضافه شد (دما و زمان اختلاط بر اساس پژوهش‌های قبلی نویسندگان انتخاب شده و بیشترین خواص در این شرایط حاصل شده است) [۲۷]. به منظور بررسی خواص قطعات کامپوزیتی، نمونه‌های آلومینیومی خالص نیز مشابه نمونه‌های کامپوزیتی تولید شدند. فاصله همزن گرافیتی تا کف بوته،  $1/3$  ارتفاع کل بوته در نظر گرفته شد. سرعت همزن در همه مراحل ثابت و برابر با  $300 \text{ rpm}$  بود.

عملیات نورد گرم قطعات کامپوزیتی با استفاده از دستگاه نورد موجود در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران صورت گرفت. این دستگاه دارای دو غلتک به قطر  $20 \text{ cm}$  و با سرعت چرخش  $50$  دور در دقیقه با نیروی ثابت  $50$  تن می‌باشد. همچنین از یک کوره مقاومتی برای حرارت دهی قطعه نیز استفاده شد. برای انجام این عملیات، قطعه تولیدی پس از رسیدن به دمای  $350^\circ\text{C}$ ، در جهت طولی نورد شد. پس از هر مرحله نورد، قطعه به مدت ۱۵ دقیقه در کوره مقاومتی با درجه حرارت  $350^\circ\text{C}$  قرار گرفته و سپس عملیات مجدداً انجام شد. نتیجه این عملیات پس از  $30$  پاس تکرار و  $24$  درصد تغییر شکل پلاستیک در شکل ۲ آورده شده است.

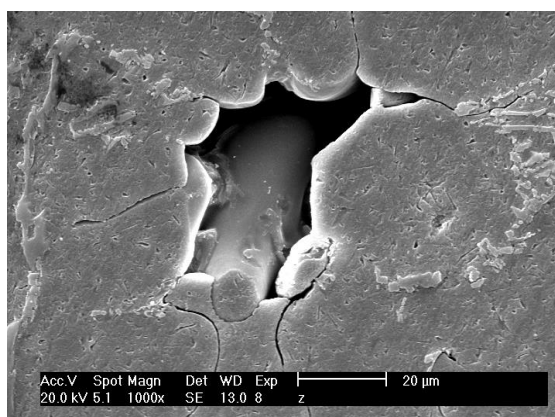
چگالی نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس و برای ۳ نمونه از هر یک از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. حجم کلی نمونه‌ها (V) با تفریق وزن غوطه‌وری (M) از وزن اشباع (S) و طبق رابطه ۱ به دست آمد و چگالی واقعی (T) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.



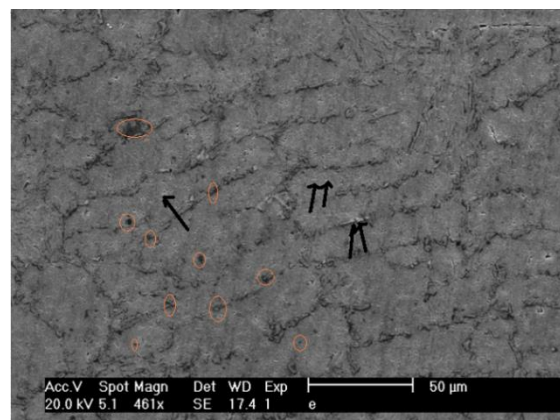
شکل ۴ تأثیر فرایند نورد گرم بر میزان تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی



الف) قبل از عملیات نورد

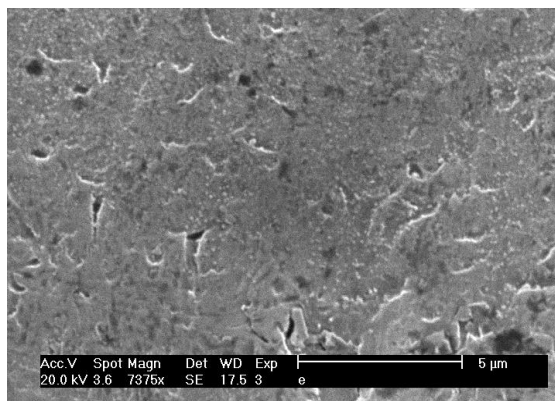


الف) قبل از فرایند نورد گرم



ب) پس از عملیات نورد

شکل ۳ تصاویر دانه‌بندی قطعه حاصل از ریخته‌گری گردابی



ب) پس از فرایند نورد گرم

شکل ۵ تصاویر ریزساختاری از اندازه و پخش تخلخل در قطعات کامپوزیتی تولیدی به روش ریخته‌گری گردابی

لایه‌های زمینه بر هم و حذف و پر شدن تخلخل‌ها می‌شود. در صورتی که عملیات نورد در دماهای بالاتر صورت گیرد می‌تواند منجر به کاهش تخلخل از طریق کاهش تنش سیلان و افزایش نرمی قطعه و روان شدن سیلان زمینه شود. همچنین به جهت کاهش شکست ذرات سرامیکی امکان به وجود آمدن ریز حفرات کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش نیروی نورد که منجر به افزایش تنش فشاری بر قطعه می‌شود، میزان کاهش تخلخل افزایش می‌یابد. با این حال اگر همزمان با اعمال فشار بالا نتوانیم سیلان ماده را به وسیله افزایش دمای عملیات افزایش دهیم، ذرات سرامیکی شکسته شده و امکان

قرار گرفته و با فلش مشکی مشخص شده‌اند و ذرات کاربید بور نیز به وسیله دایره نارنجی مشخص شده‌اند.

تخلخل یکی از عیوب قطعات کامپوزیت‌های تولید شده به روش ریخته‌گری است که باعث افت محسوس در استحکام و دیگر خواص مکانیکی قطعات می‌شود. با استفاده از فرایند نورد گرم می‌توان میزان تخلخل در قطعات ریخته‌گری را به میزان بسیاری کاهش داد [۲۸]. در شکل ۴ تأثیر فرایند نورد گرم بر میزان تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تخلخل قطعات آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت کننده کاربید بور برابر با ۱/۱۴ درصد بود. اما با توجه به تخلخل زا بودن ذرات تقویت کننده، میزان تخلخل با وجود ذرات کاربید بور به ۲/۰۵ درصد رسید. پس از عملیات مکانیکی نورد گرم، درصد تخلخل قطعات کامپوزیتی و آلومینیوم ۳۵۶ بسیار به هم نزدیک شده و به ترتیب به ۰/۳۵ درصد و ۰/۴ درصد تغییر یافت.

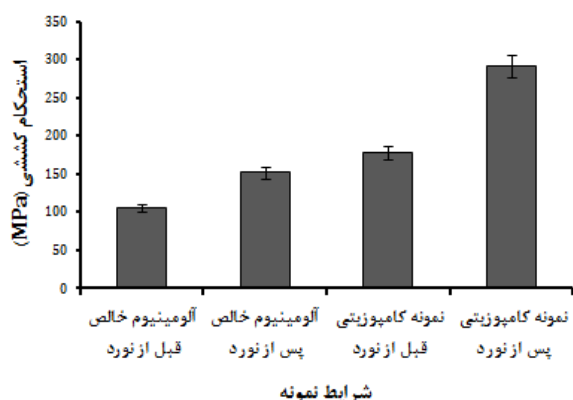
در شکل ۵ تصاویری از اندازه و میزان پخش تخلخل در قطعات کامپوزیتی قبل و پس از عملیات نورد گرم آورده شده است. وجود تخلخل و مخصوصاً تخلخل‌های انقباضی در کامپوزیت‌های تولید شده با روش‌های ریخته‌گری امری محتمل است [۲۹].

البته همیشه هدف کاهش میزان و اندازه تخلخل‌ها در قطعات می‌باشد. فرایند نورد می‌تواند باعث کوچک شدن اندازه تخلخل‌ها و هم چنین پخش مناسب‌تر آن‌ها شود. مکانیزم عملیات نورد برای حذف تخلخل‌ها بر این اساس است که با ایجاد تنش‌های برشی بسیار زیاد در زمینه فلزی باعث حرکت

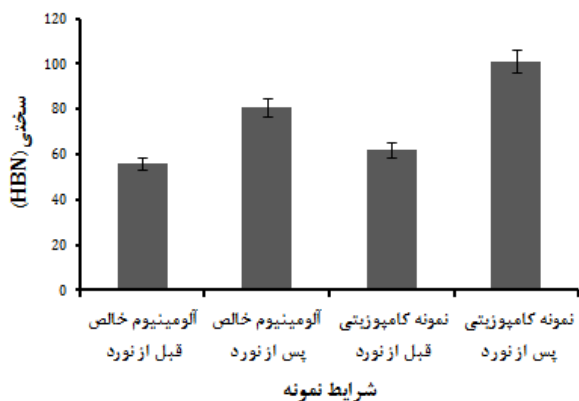
ایجاد حفرات ریز در قطعه به وجود می‌آید [۱۹].

اتصال ضعیف بین ذره و زمینه به جهت عدم ترشوندگی مناسب ذره به وسیله مذاب می‌باشد. در بررسی‌های به عمل آمده مشاهده شده که عملیات نورد باعث استحکام مناسب‌تر ذره و زمینه می‌شود. در تحلیل نیروهای اعمالی در عملیات نورد مشاهده شده که اگر چه در محل اتصال ذره و زمینه، تنش هیدرواستاتیک کششی به عنوان نیروی محرکه جدا شدن ذره از زمینه محسوب می‌شود اما به علت بالا بودن تنش هیدرواستاتیک فشاری حاصل از نیروی اعمالی بر قطعه، تنش کششی خنثی شده و استحکام ذره و زمینه به شدت بالا رفته است [۲۰].

تأثیر فرایند نورد گرم بر میزان سختی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی قطعه کامپوزیتی پس از عملیات نورد برابر با HBN ۱۰۱ ارزیابی شد که نسبت به سختی آلومینیوم ریخته‌گری قبل از عملیات نورد (HBN ۶۲) ارتقاء قابل قبولی یافته است. علت این افزایش این است که عملیات نورد در قطعات کامپوزیتی ریخته‌گری منجر به جهت‌گیری مناسب‌تر ذرات سرامیکی در زمینه فلزی و در نتیجه پخش مناسب‌تر ذرات در زمینه می‌شود. معمولاً اگر عملیات نورد در دمای بالا انجام شود این اتفاق رخ می‌دهد اما در صورتی که این عملیات در دمای پایین رخ دهد که در آن تنش سیلان زمینه فلزی بالا باشد و امکان رهاسازی نایجایی‌ها و بازیابی و تبلور مجدد زمینه به وجود نیاید احتمال شکست ذرات بیشتر از همسو شدن آن‌ها است [۳۱].



شکل ۶ تأثیر فرایند نورد گرم بر استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی



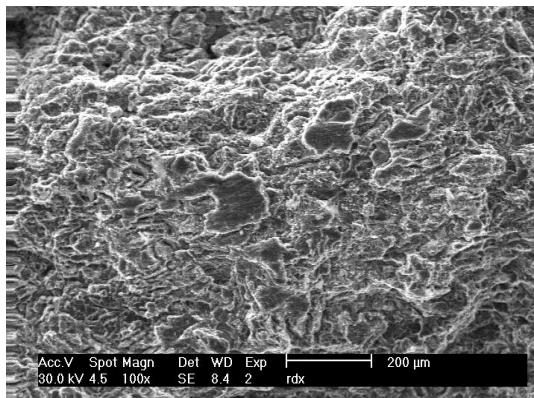
شکل ۷ تأثیر فرایند نورد گرم بر میزان سختی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی

یکی دیگر از اثرات انجام عملیات نورد بر قطعات ریخته‌گری افزایش استحکام مکانیکی آن می‌باشد. تأثیر فرایند نورد گرم بر استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام کششی قطعات آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت‌کننده کاربرد بور قبل و پس از نورد گرم به ترتیب برابر با ۱۰۵ MPa و ۱۵۲ MPa است. استحکام کششی قطعات کامپوزیتی نورد شده نیز برابر با ۲۹۱ MPa به دست آمد که نسبت به قطعات کامپوزیتی قبل از عملیات نورد با استحکام ۱۷۷ MPa، به مقدار زیادی افزایش یافته است.

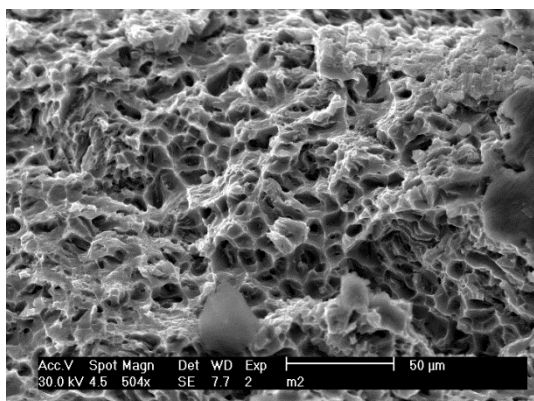
در ارتباط با استحکام بیشتر نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با قطعات آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت‌کننده کاربرد بور، تئوری‌های متفاوتی را می‌توان در نظر گرفت. با در نظر گرفتن ذرات کاربرد بور به عنوان فاز تقویت‌کننده سخت و غیر قابل شکل دهی سه مکانیزم عمده برای افزایش استحکام کامپوزیت نسبت با آلیاژ تقویت نشده عبارتند از: ۱- مدل انتقال بار از زمینه به فاز تقویت‌کننده که در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات در مقایسه با رشته‌های پیوسته اهمیت کمتری دارد. ۲- تئوری اوروان که تنش لازم برای خم شدن و عبور نایجایی از بین ذرات را متناسب با معکوس فاصله بین آن‌ها پیش بینی می‌کند. بر اساس این تئوری با حرکت هر نایجایی بر صفحه لغزش، یک حلقه نایجایی به دور هر یک از ذرات اضافه می‌شود. این حلقه‌ها یک تنش بازگشتی بر منابع تولید نایجایی وارد کرده و در نتیجه برای تولید نایجایی‌های جدید و ادامه تغییر شکل به تنش بیشتری نیاز است. ۳- تئوری افزایش دانسیته نایجایی در کامپوزیت که مهم‌ترین مکانیزم برای افزایش استحکام این مواد محسوب می‌شود. در حین سرد شدن کامپوزیت پس از مراحل تولید، به دلیل اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی زمینه فلزی و تقویت‌کننده سرامیکی، تنش‌های پسماند کششی در زمینه اطراف فاز ثانویه به وجود می‌آیند که منجر به افزایش دانسیته نایجایی‌ها می‌شوند [۳۰]. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال فرایند نورد گرم، استحکام کششی نمونه کامپوزیتی مجدداً افزایش می‌یابد. عوامل متعددی مانند اندازه و میزان تخلخل‌ها، آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده، استحکام زمینه و ذره بر استحکام اثر گذارند. همان‌طور که ذکر شد با اعمال فرایند نورد میزان و اندازه تخلخل‌ها در قطعات ریخته‌گری کاهش می‌یابد که منجر به افزایش استحکام خواهد شد. عمده‌ترین علت افزایش استحکام در قطعات آلومینیوم ۳۵۶ به جهت از بین بردن تخلخل‌های قطعات است اما در مورد قطعات کامپوزیتی علاوه بر اثر کاهش تخلخل، شکستن و پخش آگلومره‌ها و پخش مناسب‌تر ذرات تقویت‌کننده و جهت‌گیری مؤثرتر آن‌ها نیز اثر گذار است که این موضوع باعث تشدید اثر عملیات نورد گرم بر قطعات کامپوزیتی نسبت به قطعات آلومینیوم ۳۵۶ شده است.

هنگامی که کامپوزیت‌های زمینه فلزی تحت عملیات نورد قرار می‌گیرند حضور فاز تقویت‌کننده سخت در زمینه نرم باعث تجمع چشمگیر تنش‌های سه محوره موضعی در اطراف ذرات می‌شود. ذرات تقویت‌کننده که به صورت آگلومره در قطعه ریخته‌گری ظاهر می‌شوند بسیار ترد بوده و بر اثر این تنش‌ها می‌شکنند و در زمینه آلومینیومی که در اثر تنش وارد شده بالاتر از آستانه تنش سیلان زمینه است حرکت کرده و پخش می‌گردند. در نتیجه استحکام قطعات ریخته‌گری افزایش می‌یابد [۳۱].

یکی دیگر از مشکلاتی که در کامپوزیت‌های ریخته‌گری مشاهده می‌شود



ب) نمونه کامپوزیتی قبل از عملیات نورد



ج) نمونه کامپوزیتی پس از عملیات نورد گرم

شکل ۸ تصاویر سطح شکست قطعات ریخته‌گری گردابی

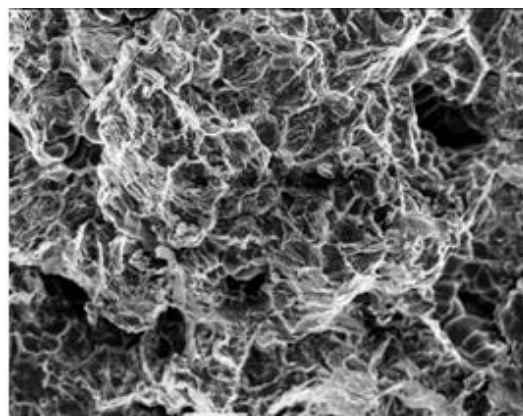
در شکل ۸ تصاویر توپوگرافی سطح شکست قطعات ریخته‌گری گردابی نمونه شاهد (آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت کننده) و نمونه‌های کامپوزیتی قبل و پس از عملیات نورد گرم نشان داده شده است. اساساً در بررسی نحوه شکست قطعات کامپوزیتی ۳ نوع مکانیزم معرفی می‌گردد. در این فرایند یا ترک بر روی ذرات تقویت کننده تشکیل می‌شود و سپس رشد می‌کند، یا ترک در فصل مشترک زمینه و تقویت کننده شکل می‌گیرد و رشد می‌کند و یا ممکن است ترک در زمینه ایجاد شود و سپس رشد کند.

در قطعات کامپوزیتی تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی به دلیل ایجاد تخلخل‌های ناشی از فرایند ریخته‌گری و همچنین خاصیت تخلخل‌زایی مواد تقویت کننده که باعث ایجاد تخلخل در زمینه کامپوزیت می‌شوند و از آنجایی که تخلخل به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل می‌کنند، نوع شکست قطعات به سمت شکست ترد متمایل می‌گردد. در شکست ترد، شکست به صورت ناگهانی و عدم وجود پدیده گلوپی شدن رخ می‌دهد و سطح شکست نسبتاً صاف و داری تورق است که معمولاً در این نوع شکست ترک از محل تخلخل‌ها و یا ذرات آگلومره شده رشد می‌کند. چرا که این مناطق به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و بنابراین تنش کششی اعمال شده در حین آزمون کشش در آن‌ها متمرکز می‌شود [۳۲]. اما پس از انجام فرایند نورد گرم بر قطعات با کاهش میزان تخلخل‌ها و نیز شکستن و پخش ذرات تقویت کننده آگلومره شده در زمینه، نوع شکست قطعات نرم‌تر می‌شود. در تصاویر سطوح شکست، نواحی مربوط به شکست نرم زمینه به صورت حفره (دیپل) مشخص می‌شود، بنابراین هرچه اندازه حفرات بزرگ‌تر و عمق آن‌ها بیشتر باشد، داکتیلیته نمونه بیشتر بوده و شکست به صورت نرم اتفاق می‌افتد. معمولاً این نوع شکست از مکان ریز حفرات رشد کرده و تغییر شکل پلاستیک شدید باعث ایجاد دیپل می‌شود [۲۰].

همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود آلومینیوم ۳۵۶ به صورت نرم می‌شکند اما در شکل ۸-ب مقداری صفحه تورق هم دیده می‌شود که نشان می‌دهد نوع شکست به سمت ترد متمایل شده است. در شکل ۸-ج نیز وجود حفرات (دیپل) نشان دهنده تغییر نوع شکست به سمت شکست نرم می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

میزان تخلخل قطعات کامپوزیتی قبل از عملیات نورد ۲/۰۵ درصد بود که پس از انجام عملیات نورد به ۰/۳۵ درصد کاهش یافت.



الف) نمونه شاهد (آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت کننده)

- سختی قطعات کامپوزیتی قبل و پس از عملیات نورد به ترتیب HBN ۶۲ و HBN ۱۰۱ به دست آمد.
- عملیات نورد گرم باعث نرم‌تر شدن شکست نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی شد.

#### ۵- مراجع

- [1] M. Khademian, *Investigation on effect of casting temperature and mixing time on microstructure and mechanical properties of Al-B<sub>4</sub>C nano composites by vortex method*, M. Sc. Thesis, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University, Tehran, 2013. (In Persian)
- [2] J. Onoro, M. Salvador, L. Cambrono, High-temperature mechanical properties of aluminium alloys reinforced with boron carbide particles, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 499, No. 1, pp. 421-426, 2009.
- [3] A. Yazdani, E. Salahinejad, Evolution of reinforcement distribution in Al-B<sub>4</sub>C composites during accumulative roll bonding, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3137-3142, 2011.
- [4] B. Prabhu, C. Suryanarayana, L. An, R. Vaidyanathan, Synthesis and characterization of high volume fraction Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite powders by high-energy milling, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 425, No. 1, pp. 192-200, 2006.
- [5] I. Ozdemir, S. Ahrens, S. Mücklich, B. Wielage, Nanocrystalline Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p and SiCp composites produced by high-energy ball milling, *Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 111-118, 2008.
- [6] M. Alizadeh, M. H. Paydar, Fabrication of nanostructure Al/SiCp composite by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Alloys and Compounds*, Vol. 492, No. 1, pp. 231-235, 2010.
- [7] A. Mazahery, M. O. Shabani, Nano-sized silicon carbide reinforced commercial casting aluminum alloy matrix: Experimental and novel modeling evaluation, *Powder Technology*, Vol. 217, pp. 558-565, 2012.
- [8] H. Abdoli, H. Asgharzadeh, E. Salahi, Sintering behavior of Al-AlN-nanostructured composite powder synthesized by high-energy ball milling, *Alloys and Compounds*, Vol. 473, No. 1, pp. 116-122, 2009.

- [22] S. V. Siva, K. Sahoo, R. Ganguly, R. Dash, S. Singh, B. Satpathy, G. Srinivasarao, Preparation of Aluminum Metal Matrix Composite with Novel In situ Ceramic Composite Particulates, Developed from Waste Colliery Shale Material, *Metallurgical and Materials Transactions B*, pp. 1-9, 2013.
- [23] R. N. Rai, A. P. Rao, G. Dutta, M. Chakraborty, Forming Behaviour of Al-TiC In-situ Composites, in *Proceeding of*, 418-422.
- [24] T. Senthilvelan, S. Gopalakannan, S. Vishnuvarthan, K. Keerthivaran, Fabrication and Characterization of SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and B<sub>4</sub>C Reinforced Al-Zn-Mg-Cu Alloy (AA 7075) Metal Matrix Composites: A Study, *Advanced Materials Research*, Vol. 622, pp. 1295-1299, 2013.
- [25] J. H. Shin, H. J. Choi, D. H. Bae, Evolution of the interfacial layer and its effect on mechanical properties in TiO<sub>2</sub> nanoparticle reinforced aluminum matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 578, No. 0, pp. 80-89, 8/20/, 2013.
- [26] A. M. El-Sabbagh, M. Soliman, M. A. Taha, H. Palkowski, Effect of rolling and heat treatment on tensile behaviour of wrought Al-SiCp composites prepared by stir-casting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 10, pp. 1669-1681, 10//, 2013.
- [27] M. Khademian, A. Alizade, H. Baharvandi, H. Majidi, The effect of stir casting on properties and microstructure of AL-B<sub>4</sub>C nanocomposite, *The second international and the seventh joint conference of iranian metallurgical engineering and iranian foundrymen scientific societies*, 1392. (In persian)
- [28] J. Lee, K. Subramanian, The tensile properties of hot-rolled (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)p-Al composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 196, No. 1, pp. 71-78, 1995.
- [29] P. Jayashree, G. Shankar, A. U. Kini, S. Sharma, R. Shetty, Review on Effect of Silicon Carbide (SiC) on Stir Cast Aluminium Metal Matrix Composites, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 1061-1071, 2013.
- [30] A. Pakdell, M. Emami, H. Farhangi, M. Habibi Parsa, Investigation the effect of extrusion on microstructure and strength of Al6061-SiC composite, *Faculty of Engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 167-159, 1388. (In persian)
- [31] A. El-Sabbagh, M. Soliman, M. Taha, H. Palkowski, Hot rolling behaviour of stir-cast Al 6061 and Al 6082 alloys-SiC fine particulates reinforced composites, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 2, pp. 497-508, 2012.
- [32] M.A. Baghchesara, H.R. Baharvandi, Investigation of tensile strength and fracture surface of Al/ZrO<sub>2</sub> produced by vortex method, *Eslamic of Azad University*, Vol. 2, No. 2, pp. 105-116, 2009. (In persian)
- [9] H. Abdoli, E. Salahi, H. Farnoush, K. Pourazrang, Evolutions during synthesis of Al-AlN-nanostructured composite powder by mechanical alloying, *Alloys and Compounds*, Vol. 461, No. 1, pp. 166-172, 2008.
- [10] Z. Sadeghian, M. H. Enayati, P. Beiss, In situ production of Al-TiB<sub>2</sub> nanocomposite by double-step mechanical alloying, *materials science*, Vol. 44, No. 10, pp. 2566-2572, 2009.
- [11] K. Sivaprasad, S. Babu, S. Natarajan, R. Narayanasamy, B. A. Kumar, G. Dinesh, Study on abrasive and erosive wear behaviour of Al 6063/TiB<sub>2</sub> in situ composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 498, No. 1, pp. 495-500, 2008.
- [12] M. Komarasamy, R. S. Mishra, J. A. Baumann, G. Grant, Y. Hovanski, Processing, Microstructure and Mechanical Property Correlation in Al-B<sub>4</sub>C Surface Composite Produced via Friction Stir Processing, *Friction Stir Welding and Processing VII*, pp. 39-46, 2013.
- [13] T. Varol, A. Canakci, Synthesis and characterization of nanocrystalline Al 2024-B<sub>4</sub>C composite powders by mechanical alloying, *Philosophical Magazine Letters*, No. ahead-of-print, pp. 1-7, 2013.
- [14] H. Son, T. Kim, C. Suryanarayana, B. Chun, Homogeneous dispersion of graphite in a 6061 aluminum alloy by ball milling, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 348, No. 1, pp. 163-169, 2003.
- [15] M. Saeedi Heydari, H. R. Baharvandi, Review of the effect of various additives on liquid phase sintering of boron carbide composites, *Ceramic*, No. 31, pp. 57-68, 2012. (In persian)
- [16] A. R. Moradkhani, M. Tajdari, H. R. Baharvandi, Investigation of mechanical properties and microstructure of B<sub>4</sub>C-C composites fabricated by hot press, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 10-18, 2013. (In Persian)
- [17] M. Tajdari, A. R. Moradkhani, Modification the accuracy of fracture toughness equation coefficients resulting from irregular surface cracks generated by Vickers test of B<sub>4</sub>C-C composites *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 12-21, 2013. (In persian)
- [18] L. He, Y. Liu, J. Li, B. Li, Effects of hot rolling and titanium content on the microstructure and mechanical properties of high boron Fe-B alloys, *Materials & Design*, Vol. 36, pp. 88-93, 2012.
- [19] W. Zhang, M. Gu, D. Wang, Z. Yao, Rolling and annealing textures of a SiCw/Al composite, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 27, pp. 3414-3418, 2004.
- [20] S. Ahmed, Q. Ahsan, A. Kurny, Effect of rolling on tensile flow and fracture of Al-4.5 Cu-3.4 Fe cast composite, *materials processing technology*, Vol. 182, No. 1, pp. 215-219, 2007.
- [21] G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*: McGraw-Hill New York, 1976.