



# اثر تخلخل بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت $Al_2O_3(p)/A356$

اسماعیل دماوندی<sup>1</sup>، سلمان نوروزی<sup>2</sup>، سید محمود ربیعی<sup>\*2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

\* بابل، صندوق پستی 484، rabiee@nit.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 آبان 1393

پذیرش: 08 دی 1393

ارائه در سایت: 19 بهمن 1393

کلید واژگان:

تخلخل

عملیات حرارتی

آسیاکاری

تزریق با گاز خنثی

خواص مکانیکی

## چکیده

وجود تخلخل و حضور لایه‌های گازی در اطراف ذرات آلومینا از جمله مهمترین دلایل کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی محسوب می‌شوند. در این پژوهش به منظور کاهش تخلخل، افزایش ترشوندگی و همچنین توزیع یکنواخت ذرات در زمینه از سه روش استفاده شد؛ استفاده از گاز خنثی به منظور تزریق ذرات با دبی 5 لیتر بر دقیقه، عملیات حرارتی ذرات در دمای  $1100^{\circ}C$  به مدت 20 دقیقه و آسیاب ذرات آلومینا با ذرات کمکی آلومینیم با نسبت 1 به 1. تأثیر هر کدام از این عوامل بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ریزساختاری و خواص مکانیکی بالا بودن میزان تخلخل، تجمع ذرات و عدم توزیع یکنواخت ذرات در کامپوزیت زمینه آلومینیومی با تزریق دستی ذرات را نشان داد. درحالی که تزریق با گاز خنثی، استفاده از عملیات حرارتی و آسیاب ذرات آلومینا با ذرات کمکی آلومینیم موجب بهبود ترشوندگی و توزیع ذرات آلومینا در مذاب آلومینیم شد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقدار سختی، استحکام فشاری و انرژی ضربه‌ای به ترتیب با 78/7 برینل، 539/1 مگاپاسکال و 8/2 ژول در نمونه کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم به دست آمد.

## Effect of porosity on microstructure and mechanical properties of $Al_2O_3(p)/Al-A356$ MMC

Esmail Damavandi, Salman Nourouzi, Seyyed Mahmood Rabiee\*

Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

\* P.O.B. 484, babol, Iran, rabiee@nit.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 17 November 2014  
Accepted 29 December 2014  
Available Online 08 February 2015

**Keywords:**  
Porosity  
heat treatment  
milling  
injection with inert gas  
mechanical properties

## ABSTRACT

Presence of porosity and gas layers around the  $Al_2O_3$  particles is one of the most important reasons for decreases in mechanical properties of aluminum metal matrix composites. In this research, to decrease porosity, increase wettability and uniform distribution of particles in matrix three methods were used; using inert gas for injection powder with 5 l/min flow rate, particles were heat treated at  $1100^{\circ}C$  for 20 min and  $Al_2O_3$  particles were milled with Al particles at a ratio of Al /  $Al_2O_3$  = 1. The effect of these parameters on microstructure and mechanical properties of composite were investigated. The results showed that the amount of porosity and agglomeration of particles was high in metal matrix composite with handy injection of particles. While injection with inert gas, using heat treatment and Al/ $Al_2O_3$  milling caused improved wettability and uniform distribution of particles in molten Al. The results showed the maximum value of hardness, compression strength and impact energy was obtained in metal matrix composite reinforced with Al /  $Al_2O_3$  milled with value of 78.7 BHN, 539.1 MPa and 8.2 Joule, respectively.

## 1- مقدمه

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[1]. از این بین، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات<sup>1</sup> جهت بهبود استحکام، مقاومت سایشی، بازده ساختاری و کنترل خواص فیزیکی مانند چگالی و ضریب انبساط حرارتی از شرایط بهتری برخوردارند[2,3]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات نه فقط به-

دلیل خواص مکانیکی ذکر شده بلکه به دلیل در دسترس بودن و هزینه کم این تقویت کننده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. علاوه بر این، از مشکلات مربوط به تقویت کننده‌های پیوسته در کامپوزیت‌های زمینه فلزی مانند آسیب فیبر، غیریکنواختی ریزساختاری، تماس فیبر با فیبر و واکنش‌های گسترده سطحی جلوگیری می‌شود[4].

یکی از مشکلات عمده در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی توزیع یکنواخت تقویت کننده در زمینه است که تأثیر زیادی بر خواص و کیفیت ماده کامپوزیتی دارد[5]. جهت دستیابی به خواص فیزیکی و مکانیکی ایده‌آل باید ذرات ریز تقویت کننده در زمینه انعطاف پذیر توزیع یکنواختی داشته و سطوح تماس بین تقویت کننده و زمینه تمیز باشد. با این حال روش‌های حاضر، اغلب تولید ذرات

1- Particles Metal Matrix Composites

Please cite this article using:

E. Damavandi, S. Nourouzi, S.M. Rabiee, Effect of porosity on microstructure and mechanical properties of  $Al_2O_3(p)/Al-A356$  MMC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 243-250, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Damavandi, S. Nourouzi, S.M. Rabiee, Effect of porosity on microstructure and mechanical properties of  $Al_2O_3(p)/Al-A356$  MMC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 243-250, 2015 (In Persian)

| جدول 2 مشخصات فیزیکی و مکانیکی آلیاژ ریختگی، پودر آلومینیم و آلومینا |                    |                           |               |              |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|--------------|
| ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی                                           | واحد               | آلیاژ ریختگی مورد استفاده | پودر آلومینیم | پودر آلومینا |
| چگالی ظاهری                                                          | gr/cm <sup>3</sup> | 2/7                       | 2/7           | 3/92         |
| هدایت حرارتی                                                         | W/m.°C             | 160                       | 230           | 30           |
| نقطه ذوب                                                             | °C                 | دامنه انجمادی (569-614)   | 660/2         | 2040         |
| مدول الاستیک                                                         | GPa                | 72                        | 69            | 370          |
| سختی                                                                 | HV                 | 70                        | 40            | 1800         |

| جدول 3 شرح آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر |               |                                                                                                                                |  |  |
|-----------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| شماره                                         | عنوان اختصاری | شرح آزمایش                                                                                                                     |  |  |
| 1                                             | Hi            | کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ذرات آلومینای بدون پیش عملیات و تزریق به صورت دستی                                                |  |  |
| 2                                             | WHT           | کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ذرات آلومینای بدون پیش عملیات تزریق با گاز آرگون                                                  |  |  |
| 3                                             | HT            | کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ذرات آلومینای عملیات حرارتی شده در دمای 1100 درجه سانتی‌گراد به مدت 20 دقیقه و تزریق با گاز آرگون |  |  |
| 4                                             | milled        | کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم و تزریق با گاز آرگون                                              |  |  |

در تحقیق حاضر چهار نمونه در شرایط مختلف تولید شدند که در جدول 3 درج شده است. از فرآیند ریخته‌گری همزنی جهت تولید شمش اولیه استفاده شد. به این منظور مذاب ابتدا به دمای 680 درجه سانتی‌گراد رسید و جهت یکنواختی دمایی کل مذاب، 5 دقیقه در این دما نگهداری شد. سپس دما به آرامی پایین آمده و به دمای 610 درجه سانتی‌گراد رسید. همزدن مذاب با استفاده از دستگاه همزن مکانیکی ساخت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل [18]، مطابق شکل 1 و با سرعت 300 دور بر دقیقه [16، 17]، به همراه تزریق ذرات، همگام با کاهش دما صورت گرفت. همزدن به مدت 5 دقیقه بعد از تزریق ادامه یافت. پره همزن مکانیکی از جنس فولاد زنگ نزن مطابق شکل 2 ساخته و به منظور جلوگیری از واکنش با مذاب آلومینیومی با زیرکونیا پوشش‌دهی شد. جهت انجام فرآیند آسیاکاری، دستگاه آسیاب گلوله‌ای<sup>3</sup> بکار گرفته شد. نسبت گلوله به پودر 10 به 1 و نسبت ذرات آلومینیم به آلومینا 1 به 1 و آسیاکاری به مدت 5 ساعت صورت پذیرفت. مجموع درصد وزنی ذرات آلومینیم/آلومینا آسیاب‌شده نسبت به آلیاژ آلومینیم 10 درصد می‌باشد.



شکل 1 دستگاه همزن مکانیکی مورد استفاده در این پژوهش

تجمع یافته در زمینه انعطاف‌پذیر و در نتیجه کاهش انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد [6، 7]. تجمع ذرات و خوشه‌ای شدن مانع از توزیع یکنواخت ذرات شده و خواص ماکروسکوپی پایینی را نتیجه می‌دهد. ذرات کلوخه شده به عنوان محل‌های ایجاد ترک و جوانه‌زنی غیر کوهرنت در تنش‌های پایین‌تر از تنش تسلیم زمینه عمل کرده و موجب شکست غیرمنتظره کامپوزیت در سطوح تنش پایین می‌شود [8]. دلایل احتمالی کلوخه شدن ذرات، اتصال شیمیایی، کاهش انرژی سطحی و جدایش ذرات می‌باشد [9]. بطور کلی، جهت ساخت کامپوزیت-های زمینه فلزی با کیفیت بالا و خواص مکانیکی مطلوب، توجه به عواملی نظیر ترشوندگی، واکنش شیمیایی بین زمینه و تقویت‌کننده و حضور تخلخل‌ها طی تزریق ذرات به زمینه مورد نیاز است [10].

برخی از محققان تلاش کردند تا پارامترهای فرآیند را به منظور بدست آوردن توزیعی یکنواخت از تقویت‌کننده‌ها در زمینه بهینه نمایند [11، 12]. درحالی‌که برخی دیگر ترشوندگی ذرات تقویت‌کننده توسط آلیاژ زمینه [13] و توزیع ذرات تقویت‌کننده تحت تأثیر عکس‌العمل بین شرایط انجماد و ذرات را مورد بررسی قرار دادند [14]. اندازه ذرات تقویت‌کننده نیز نقش مهمی را در توزیع ذرات بازی می‌کند. ماهیت تجمع ذرات ریز به علت انرژی بالای انجماد آن‌ها است که منجر به افزایش سطح کل و افزایش تمایل این ذرات به تجمع و کلوخه شدن می‌شود و در نتیجه ماهیت ترد ناخواسته‌ای به کامپوزیت می‌دهد [15].

سجادی و همکارانش [16] در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات آلومینا به کمک فرآیند ریخته‌گری همزنی، تأثیر سرعت‌های مختلف همزن مکانیکی بر میزان تخلخل را مورد بررسی قرار دادند و سرعت 300 دور بر دقیقه را مناسب‌ترین سرعت برای همزدن عنوان نمودند. آنان اعلام کردند که افزایش بیشتر سرعت همزدن موجب ایجاد تلاطم در مذاب و در نتیجه افزایش تخلخل در نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین این محققان عملیات حرارتی ذرات آلومینا به مدت 20 دقیقه در دمای 1100 درجه سانتی‌گراد را نیز بمنظور افزایش ترشوندگی و کاهش تخلخل مورد بررسی قرار دادند و استفاده از عملیات حرارتی را موجب بهبود ترشوندگی و کاهش تخلخل ارزیابی کردند.

سجادی و همکارانش [17] در پژوهشی دیگر اثر فرآیند کامپوکستینگ را بر کاهش تخلخل مورد بررسی قرار دادند. کاهش میزان تخلخل به دلیل دمای کاری پائین‌تر از نتایج این تحقیق بود.

در پژوهش حاضر اثرات مخرب تخلخل بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه فلزی و روش‌هایی کاهش آن نظیر تزریق ذرات با گاز خنثی، عملیات حرارتی ذرات تقویت‌کننده قبل از تزریق، استفاده از ذرات آلومینیم و آسیاکاری این ذرات با ذرات تقویت‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- روش تحقیق

در این پژوهش از آلیاژ ریختگی<sup>1</sup> استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 درج شده است. ذرات آلومینا و آلومینیم (شرکت مرک<sup>2</sup>) استفاده شده به ترتیب دارای اندازه‌های کمتر از 20 و 45 میکرومتر بوده و درصد وزنی ذرات آلومینا 5 درصد انتخاب شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی آلیاژ ریختگی، پودر آلومینیم و پودر آلومینا در جدول 2 درج شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم (درصد وزنی)

| Al    | Si   | Mg   | Cu   | Fe   |
|-------|------|------|------|------|
| 92/48 | 6/71 | 0/42 | 0/20 | 0/19 |

1- A356  
2- merck

3- Retch PM100

الکترونی روبشی استفاده شد. پس از مشاهده ریزساختار برای چهار نمونه کامپوزیتی تولید شده آزمون‌های سختی‌سنجی، فشار و سایش صورت پذیرفت. چگالی نمونه‌ها توسط روش ارشمیدسی محاسبه شد و چگالی تئوری نیز با محاسبه چگالی آلومینیم ریختگی A356 و چگالی ذرات آلومینا و آلومینیم مطابق جدول 2 به دست آمد.

نمونه‌های آزمون فشار طبق استاندارد<sup>1</sup> با قطر 10 میلی‌متر و ارتفاع 15 میلی‌متر از شمش‌های ریخته‌گری شده تهیه و آزمون با دستگاه آزمون فشار<sup>2</sup> و تحت نرخ کرنش 0/005 بر دقیقه صورت گرفت. به منظور انجام آزمون سختی سنجی برینل با بار 10 کیلوگرم و قطر ساچمه 2/5 میلی‌متر از دستگاه سختی‌سنجی اونیورسال<sup>3</sup> ساخت شرکت کوپا استفاده شد. مطابق شکل 4 نمونه‌برداری جهت انجام آزمون سختی سنجی از قسمت فوقانی شمش‌های کامپوزیتی انجام شد. پنج نقطه از هر نمونه کامپوزیتی تحت آزمون سختی سنجی قرار گرفت به‌طوری که چهار نقطه، از رئوس مربع محاط شده درون دایره ای به قطر 35 میلی‌متر (قطر شمش کامپوزیتی 55 میلی‌متر است) و یک نقطه نیز از مرکز دایره انتخاب شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار اکسل مقدار میانگین و همچنین دامنه سختی برای هر نمونه کامپوزیتی به‌دست آمد.

برای انجام آزمون ضربه از دستگاه آر-کی-پی<sup>4</sup> استفاده شد. نمونه‌های آزمون ضربه شاریپی طبق استاندارد<sup>5</sup> در ابعاد سطح مقطع 10 میلی‌متر در 10 میلی‌متر و طول 55 میلی‌متر و زاویه شیار 45 درجه و ارتفاع 2 میلی‌متر از قسمت انتهایی شمش کامپوزیتی مطابق شکل 4 تهیه شد. بمنظور دقت در نتایج، هر آزمایش روی سه نمونه مشابه انجام گرفت. آزمون سایش با استفاده از دستگاه سایش پین روی دیسک با دیسک فولادی به سختی 60 راکول سی و زبری سطح 0/3 میکرومتر انجام شد. این آزمون در نیروی ثابت 60 نیوتن، سرعت دورانی دیسک 1 متر بر ثانیه صورت پذیرفت و نمودار مرتبط با مقادیر ضریب اصطکاک برای هر نمونه در مسافت 1500 متر با استفاده از نرم‌افزار به دست آمد. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ استریو سطح نمونه‌های آزمون سایش جهت بررسی مکانیزم سایشی کامپوزیت تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در شرایط محیطی یکسان (دمای 29 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 81 درصد) به ارتفاع 20 میلی‌متر و قطر 10 میلی‌متر از کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده تهیه شدند. قبل از انجام آزمون سایش، روش‌های بهینه به منظور آماده‌سازی نمونه مانند سنگ‌زنی و پرداخت جهت رسیدن به تکرارپذیری مناسب در نتایج به-دلیل اثرات زبری و صافی سطح در آزمون سایش به‌کار گرفته شد. سنباده‌زنی سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده 600 جهت دستیابی به زبری سطح کمتر از 0/4 میکرومتر صورت پذیرفت.

### 3- نتایج و بحث

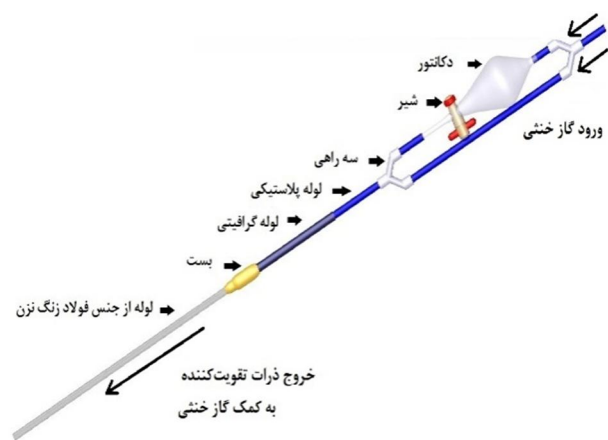
#### 3-1- ریزساختار

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده را نشان می‌دهد. در شکل 5-الف تجمع ذرات آلومینا در محل‌هایی از زمینه در نمونه-ی کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات نشان داده شده است. بسیاری از فضاها خالی از ذرات بوده و توزیع غیریکنواخت این ذرات در زمینه به‌خوبی قابل مشاهده است.

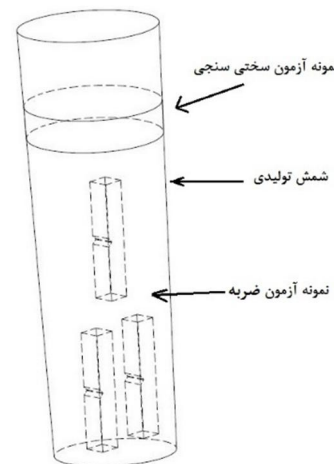
1- ASTM E9  
2- SANTAM-STM-250  
3- UV1  
4- Roell Amsler RKP 300  
5- ASTM A370



شکل 2 پره همزن مورد استفاده در این پژوهش



شکل 3 تصویر شماتیک از سیستم تزریق مورد استفاده در این تحقیق

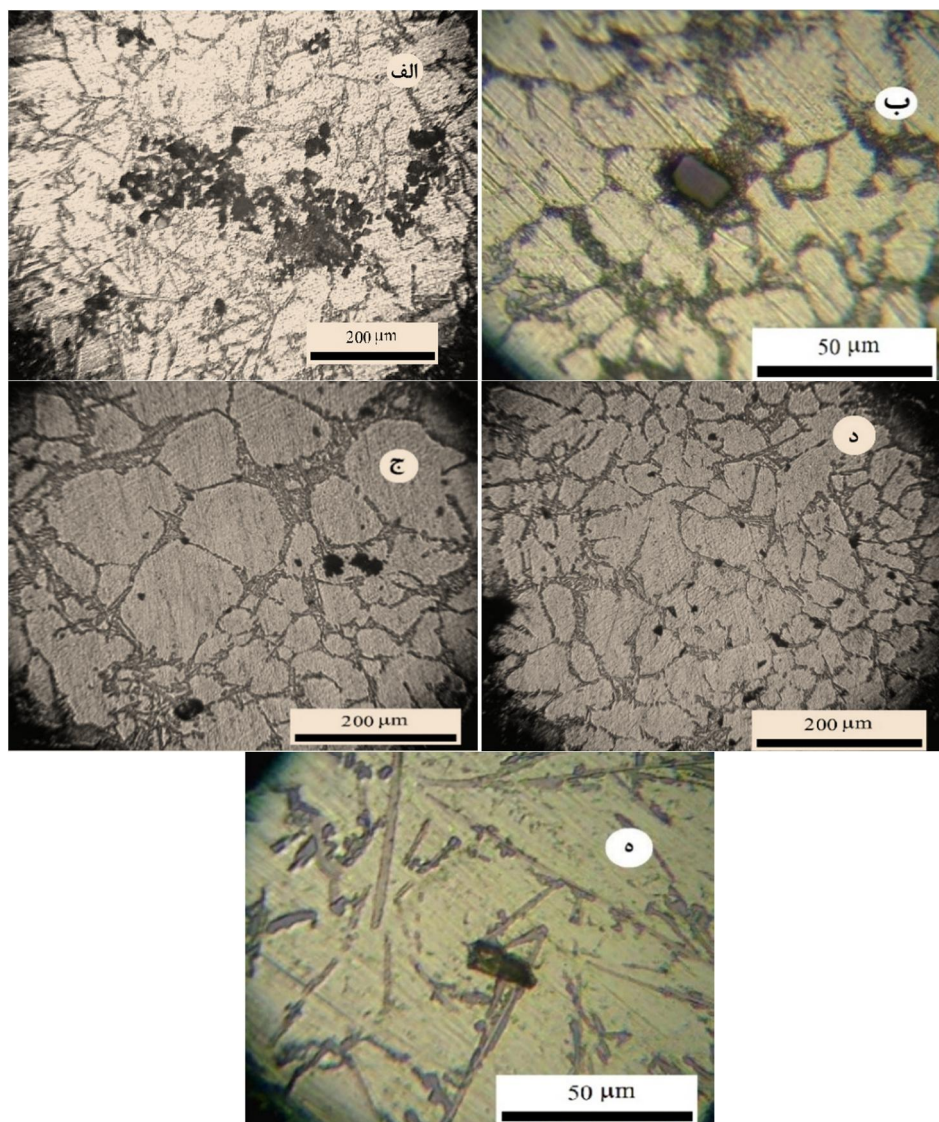


شکل 4 تصویر شماتیک از محل نمونه‌برداری جهت آزمون سختی سنجی و ضربه

بمنظور تزریق ذرات تقویت‌کننده به مذاب از سیستم گاز خنثی (آرگون) مطابق شکل 3 با دبی 5 لیتر بر دقیقه استفاده شد. زمان تزریق پودر به عواملی همچون دبی گاز آرگون، اندازه و درصد ذرات بستگی داشته و تزریق بین 10-20 دقیقه صورت پذیرفت. جهت جلوگیری از افزایش فشار پشت پودرهای درون محفظه، مسیر فرعی به منظور خروج گاز آرگون تعبیه شد که هم موجب کاهش فشار در پشت پودرها می‌شود و هم به هدایت پودرها در انتهای سیستم تزریق کمک می‌کند.

به‌منظور بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ



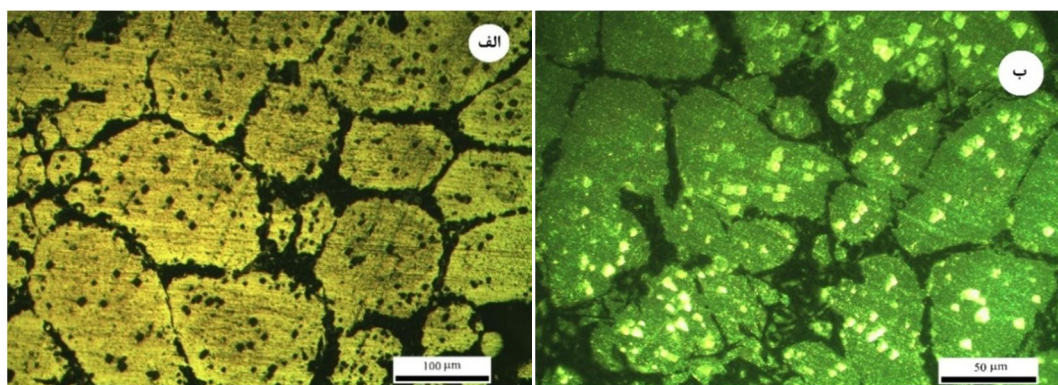


شکل 5 تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات الف) آلومینا بدون پیش عملیات و تزریق به صورت دستی، ب) بزرگنمایی بالاتر از شکل 1-الف، ج) آلومینا بدون پیش عملیات تزریقی با گاز آرگون و د) آلومینا عملیات حرارتی شده تزریقی با گاز آرگون و ه) بزرگنمایی بالاتر از شکل 1-د

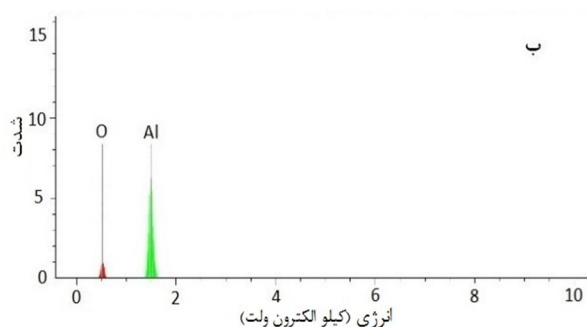
برقرار کرده اند. محققان [19,20] دلیل این افزایش ترشوندگی را اصلاح شکل اولیه ذرات آلومینا و تبدیل شدن ذرات از شکل غیرمنظم به کروی و کاهش اندازه دانه ذرات آلومینا عنوان کردند که موجب افزایش سطح فعال می شود. شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا/آلومینیم آسیاب شده تزریقی با گاز خنثی را در دو حالت بدون نور پلاریزه و با نور پلاریزه نشان می دهد. توزیع تقریباً یکنواخت ذرات و افزایش تعداد آن ها در زمینه در این دو تصویر قابل مشاهده است. آنچه در این شکل به خوبی نشان داده شده، ریزساختار غیردندردینی زمینه و کرویت آلومینیم اولیه می باشد که به واسطه فرآیند همزدن ایجاد شده است.

در شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری<sup>1</sup> از نمونه کامپوزیتی تولید شده با ذرات آلومینا/آلومینیم آسیاب شده تزریقی با گاز خنثی نشان داده شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است بهترین توزیع از ذرات و همچنین افزایش تعداد این ذرات در زمینه با استفاده از آسیاب کردن ذرات آلومینا/آلومینیم بدست آمد. میزان تجمع ذرات آلومینا در زمینه و همچنین شناوری این ذرات در سطح مذاب به شدت کاهش یافت.

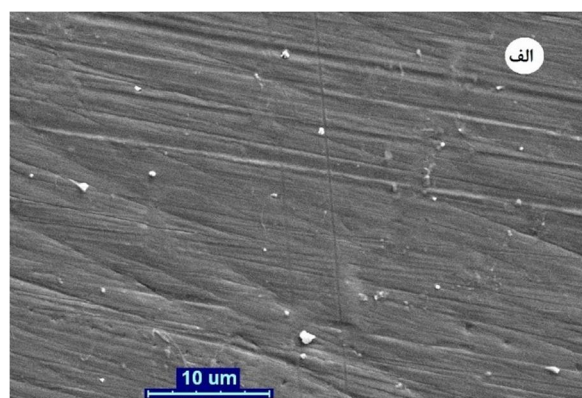
بسیاری از ذرات نیز به دلیل عدم ترشوندگی مناسب با مذاب زمینه روی سطح مذاب شناور شدند. اکثر این ذرات به یکدیگر می پیوندند و خلل و فرج بین این ذرات تجمع یافته موجب شناوری این ذرات در سطح مذاب و کاهش مقدار آن ها در کامپوزیت می شود. از طرف دیگر سطح ذرات آلومینا گازهای اطراف را جذب می کند. شکل 5-ب بزرگنمایی بالاتر از نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات را نشان می دهد. وجود تخلخل اطراف ذرات مانع از اتصال مناسب با زمینه شده و اثربخشی مفید این ذرات بر بهبود خواص مکانیکی را کاهش می دهد. در شکل 5-ج نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا بدون پیش عملیات و تزریق با گاز خنثی نشان داده شده است. تجمع ذرات نسبت به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات کاهش یافته ولی ذرات تجمع یافته نیز در برخی از نقاط قابل مشاهده هستند. شکل 5-د کامپوزیت تقویت شده با ذرات آلومینا عملیات حرارتی شده تزریقی با گاز خنثی را نشان می دهد. توزیع بهتر و افزایش تعداد ذرات در زمینه گویای تأثیر مثبت عملیات حرارتی ذرات و افزایش ترشوندگی آن ها می باشد. شکل 5-ه بزرگنمایی بالاتر از نمونه عملیات حرارتی شده را نشان می دهد. مشاهده می شود که تخلخل اطراف ذرات کاهش یافته و ذرات پیوند بهتری با زمینه



شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم؛ (الف) بدون نور پلاریزه (ب) با نور پلاریزه



شکل 7 (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم (ب) آنالیز عنصری از نقاط سفید رنگ



این در حالی است که تزریق با گاز آرگون، استفاده از عملیات حرارتی ذرات و فرآیند آسیاب موجب کاهش مقدار تخلخل در نمونه کامپوزیتی شده و در نتیجه بهبود در خواص مکانیکی را خواهیم داشت. همچنین عملیات حرارتی ذرات آلومینا قبل از تزریق در مذاب موجب حذف گازهای جذب شده از سطح ذرات می شود [16]. هنگامی که از ذرات آسیاب شده آلومینیم/آلومینا استفاده می شود، ذرات آلومینا نوعی پوشش موضعی گرفته و از این طریق همگام با تزریق با گاز خنثی، در تماس با مذاب آلومینیم بوده و ترشوندگی این ذرات با زمینه افزایش می یابد، به همین خاطر است که مطابق جدول 4 کمترین مقدار تخلخل در نتایج نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینیم/آلومینا آسیاب شده به دست آمد.

### 3-2- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیتی شامل سختی، انرژی شکست و ضریب اصطکاک در جدول 5 درج شده است.

### 3-2-1- آزمون سختی

با توجه به جدول 5 کمترین مقدار سختی مربوط به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات است.

جدول 4 چگالی و تخلخل نمونه های کامپوزیتی تولید شده

| شماره | عنوان  | چگالی ظاهری<br>(گرم بر سانتی متر مکعب) | چگالی نهایی<br>(گرم بر سانتی متر مکعب) | درصد تخلخل |
|-------|--------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------|
| 1     | Hi     | 2/74                                   | 2/59                                   | 5/5        |
| 2     | WHT    | 2/74                                   | 2/64                                   | 3/7        |
| 3     | HT     | 2/74                                   | 2/68                                   | 2/2        |
| 4     | milled | 2/74                                   | 2/71                                   | 1/1        |

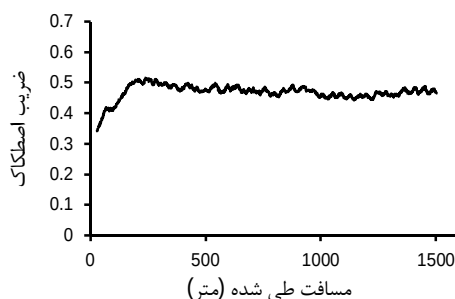
هنگامی که ذرات آسیاب شده آلومینیم/آلومینا در مذاب آلومینیم قرار می گیرند، ذرات آلومینیم حل شده و به تدریج ذرات آلومینا را آزاد می کنند. همانطور که ذرات آلومینا در فرآیند آسیاب بین ذرات آلومینیم توزیع مناسبی دارند، در فرآیند تزریق و در مذاب آلومینیم نیز انتظار می رود توزیع مناسبی داشته باشند.

### 3-1-1- تخلخل

وجود تخلخل در حالت کلی به دلایل مهم زیر برمی گردد: (1) افزایش سطح تماس ذرات با هوا در نتیجه افزایش تعداد آن ها و یا کاهش اندازه ذرات (2) گاز محبوس شده در طی فرآیند همزدن (3) ورود هوا به مذاب هنگام تزریق ذرات به مذاب (4) زمان طولانی بارریزی مذاب درون قالب و (5) انقباض در طول انجماد [16]. در جدول 4 نتایج مربوط به چگالی نمونه های کامپوزیتی در شرایط مختلف را درج شده است. از نتایج چگالی تئوری و نهایی اندازه گیری شده نمونه های کامپوزیتی به دست می آید که در تزریق دستی ذرات مقدار تخلخل ها به دلیل افزایش تماس ذرات با هوای اطراف افزایش می یابد. این ذرات یا کلوخه شده و هوا بین ذرات کلوخه شده قرار گرفته و روی سطح شناور می شوند یا با کاهش دما تا ناحیه دو فازی توسط جبهه انجماد به ناحیه یوتکتیک منتقل می شوند. در این صورت است که مقدار تخلخل در این نمونه افزایش پیدا می کند. از طرف دیگر ذرات منفرد آلومینا نیز توسط گازها احاطه می شوند و مشابه حالت قبل موجب افزایش مقدار تخلخل در کامپوزیت زمینه فلزی می شوند [21]. البته همزدن در دمای نیمه جامد خود موجب کاهش در جذب گاز می شود. به این ترتیب که با رسیدن به دمای نیمه جامد فاز آلومینیم اولیه خواهیم داشت. با ایجاد تلاطم شدید و سایش و برخورد میان فاز اولیه جامد و ذرات تقویت کننده می توان تا حدودی به شکسته شدن لایه های گازی و همچنین پراکنده شدن ذرات تقویت کننده درون مذاب فلزی که در نهایت رسیدن به ترشوندگی خوبی است، کمک کرد. [22]

جدول 5 خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده

| شماره عنوان اختصاری سختی (برینل) انرژی شکست (ژول) ضریب اصطکاک |        |                |               |      |
|---------------------------------------------------------------|--------|----------------|---------------|------|
| 1                                                             | Hi     | $66/1 \pm 2/3$ | $6/2 \pm 0/3$ | 0/58 |
| 2                                                             | WHT    | $67/4 \pm 0/6$ | $6/4 \pm 0/1$ | 0/51 |
| 3                                                             | HT     | $71/9 \pm 0/2$ | $7/1 \pm 0/1$ | 0/48 |
| 4                                                             | Milled | $78/7 \pm 0/1$ | $8/2 \pm 0/1$ | 0/42 |



شکل 8 نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا بدون پیش عملیات

عدم توزیع یکنواخت ذرات و وجود تخلخل از دلایل عمده این کاهش محسوب می‌شود. دامنه مقدار سختی در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده که این خود دلیلی بر عدم توزیع یکنواخت ذرات و در کل عدم همگن بودن خواص کامپوزیت تولیدی است. افزایش میزان سختی نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات بدون پیش عملیات تزریقی با گاز خنثی را می‌توان به توزیع بهتر ذرات نسبت به حالت تزریق دستی ذرات نسبت داد. انجام عملیات حرارتی ذرات آلومینا قبل از تزریق نیز در ترشوندگی ذرات توسط زمینه و کاهش میزان تخلخل مؤثر بوده و موجب بالا رفتن میزان سختی می‌شود. در نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا/آلومینیم آسیاب شده به دلیل وجود ذرات کمکی آلومینیم و خمیری شدن آن در دمای بالا، این ذرات موجب کاهش تخلخل، افزایش ترشوندگی و بهبود پیوند ذرات آلومینا با زمینه شده و به دلیل توزیع مناسب ذرات آلومینا بین ذرات آلومینیم در فرآیند آسیاب، این توزیع در زمینه نیز حفظ می‌شود. نتیجه این توزیع همگن، افزایش مقدار سختی خواهد بود. از دلایل افزایش در مقدار سختی می‌توان به حضور ذرات آلومینا به عنوان موانعی در حرکت نابجایی‌ها اشاره کرد. همچنین با افزایش این ذرات در زمینه اندازه دانه‌های زمینه کاهش یافته و مقدار سختی نیز افزایش می‌یابد.

### 3-2-2- آزمون ضربه

استحکام ضربه‌ای مقاومت در برابر بار ضربه‌ای و چقرمگی آن ماده تحت بار دینامیکی است. مقدار انرژی جذب شده مشخصه‌ای ماهیت فیزیکی آن ماده است [23]. انرژی ضربه نمونه‌های کامپوزیتی به توزیع ذرات تقویت کننده، اندازه و درصد این ذرات بستگی دارد [24]. هرچه توزیع ذرات در زمینه یکنواخت تر باشد، و ذرات در ابعاد کوچک‌تری باشند، انرژی ضربه افزایش خواهد یافت. با افزودن ذرات، اندازه ذرات زمینه کاهش یافته که این خود موجب افزایش چقرمگی نمونه کامپوزیتی مورد نظر می‌شود. مطابق جدول 5 کمترین مقدار انرژی شکست مربوط به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات است. تجمع ذرات در زمینه و وجود تخلخل میان آن‌ها موجب ایجاد تمرکز تنش شده و در صورت ایجاد سطحی پایین از تنش گسست رخ می‌دهد. مشابه آزمون سختی، در آزمون ضربه نیز دامنه انرژی شکست این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. با استفاده از سیستم تزریق گاز

خنثی توزیع ذرات بهبود یافته و از تجمع و کلوخه شدن ذرات کاسته می‌شود. حفرات گازی اطراف ذرات نیز کاهش یافته ولی به دلیل ترشوندگی ضعیف ذرات در زمینه استحکام ضربه‌ای افزایش ناچیزی پیدا می‌کند. استفاده از عملیات حرارتی ذرات پیش از تزریق موجب بهبود ترشوندگی و توزیع ذرات در زمینه شده و اندازه دانه ذرات آلومینا را کاهش می‌دهد. در نتیجه افزایش انرژی شکست را خواهیم داشت. بیشترین مقدار انرژی ضربه‌ای از نمونه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم با مقدار 8/2 ژول به دست آمد. چسبندگی مناسب بین زمینه و ذرات، کاهش تخلخل و حفرات گازی، توزیع مناسب ذرات در زمینه و کاهش اندازه دانه از دلایل افزایش مقدار استحکام ضربه‌ای در این نمونه کامپوزیتی محسوب می‌شود.

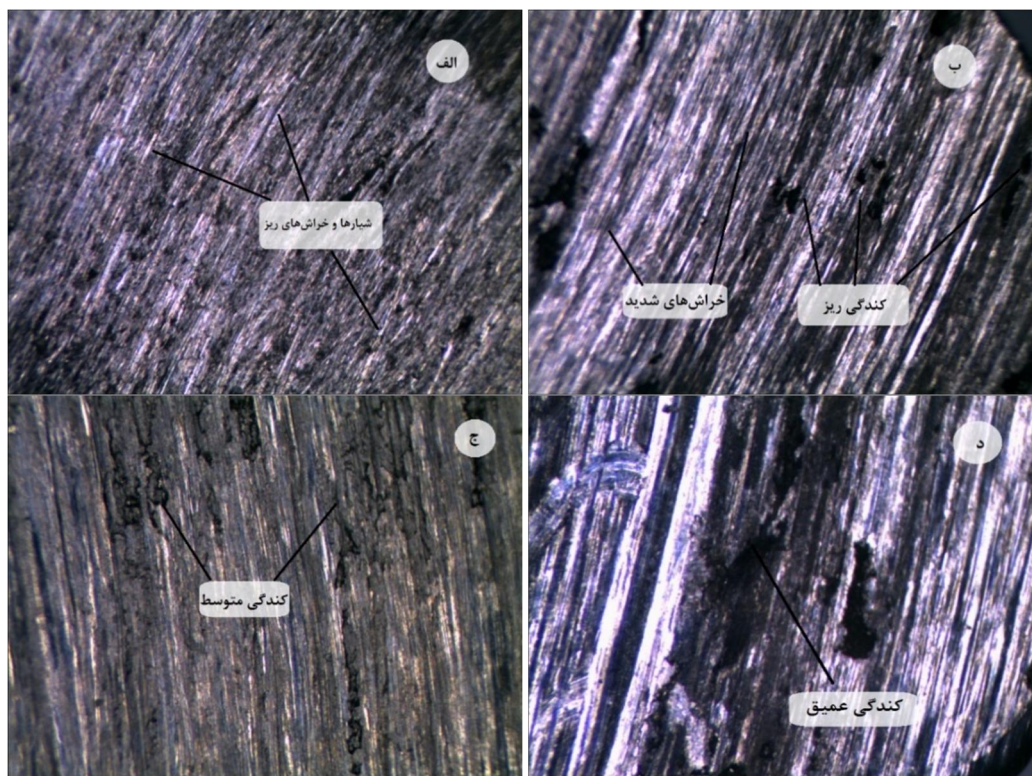
### 3-2-3- آزمون سایش

در جدول 5 ضریب اصطکاک میانگین نمونه‌های کامپوزیتی پس از طی مسافت 1500 متر درج شده است. کمترین مقدار ضریب اصطکاک میانگین مربوط به نمونه کامپوزیتی با ذرات آلومینا/آلومینیم آسیاب شده است. این کاهش را که در واقع افزایش مقاومت به سایش است می‌توان به افزایش مقاومت به تغییر شکل پلاستیک نمونه در اثر حضور ذرات آلومینا و همچنین افزایش سختی در اثر پیوستگی مناسب بین ذرات و زمینه و کاهش میزان تخلخل نسبت داد. توزیع مناسب ذرات از تمرکز تنش کاسته و بر استحکام می‌افزاید. در واقع توزیع یکنواخت و کاهش فاصله بین ذرات تقویت کننده از رشد ترک و اتصال آن‌ها به یکدیگر جلوگیری می‌نماید. ذرات سرامیکی در نیروی 60 نیوتنی از زمینه نرم آلومینیمی کنده می‌شوند و این ذرات در بین سطوح سایش همانند روانکار عمل کرده و موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شوند. از طرف دیگر بیشترین مقدار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه با تزریق دستی ذرات است. تجمع ذرات آلومینا و وجود تخلخل و عدم توزیع یکنواخت ذرات در زمینه مقاومت به سایش کامپوزیت را کاهش داده و منجر به تمرکز تنش و شکست غیرمنتظره کامپوزیت می‌شود. استفاده از گاز خنثی موجب توزیع مناسب تر ذرات و کاهش تجمع این ذرات نسبت به کامپوزیت با تزریق دستی می‌شود. در نتیجه مقاومت سایشی بیشتری انتظار می‌رود. عملیات حرارتی ذرات نیز موجب توزیع یکنواخت تر ذرات و پیوستگی مناسب ذرات با زمینه شده و افزایش مقاومت به سایش نسبت به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات و نمونه کامپوزیتی با ذرات بدون پیش عملیات را به دنبال دارد.

شکل 8 نمودار ضریب اصطکاک این نمونه را بر حسب مسافت طی شده و شکل 9 تصویر میکروسکوپ استریو از سطح نمونه کامپوزیتی با ذرات بدون پیش عملیات و تزریق شده با گاز آرگون را به ترتیب در مسافت‌های 150، 300، 900 و 1500 متر نشان می‌دهد.

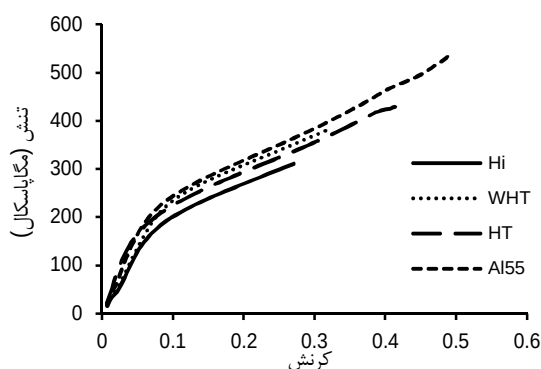
با توجه به این نمودار و تصاویر گرفته شده از سطوح سایشی می‌توان مکانیزم سایشی این نوع کامپوزیت را مورد بررسی قرار داد. در نیروی 60 نیوتن و به واسطه گرمای تولید شده متأثر از اصطکاک، پیوندهای چسبان ایجاد می‌شود. پیشگیری از ایجاد پیوندهای چسبان در مقاطعی که سطوح به یکدیگر نزدیک شده‌اند غیرقابل اجتناب است و از طرف دیگر اتصال سبب فرورفتن ناهمواری‌های جسم صلب تر در جسم نرم تر می‌گردد. در چنین شرایطی بر اثر حرکت لغزشی در سطح، ماده به طرف جلو و اطراف جابجا شده، شیارهایی در جهت حرکت به صورت خراش‌هایی روی سطح تشکیل می‌دهد که مکانیزمی از نوع خراشان را به وجود می‌آورد این حالت در شکل 9- الف و ب نشان داده شده است. پایین بودن میزان ضریب اصطکاک مطابق با شکل 8 در این محدوده نشان دهنده مکانیزم خراشان است.





شکل 9 تصویر میکروسکوپ استریو از سطح نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا بدون پیش‌عملیات پس از طی مسافت (الف) 150 متر (ب) 300 متر (ج) 900 متر و (د) 1500 متر

ترشوندگی و بهبود توزیع ذرات همانطور که از جدول 6 و شکل 10 بر می‌آید، افزایش استحکام فشاری و درصد تغییر طول است. در نهایت بیشترین مقدار استحکام فشاری به همراه بالاترین درصد تغییر طول مربوط به نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آلومینا/آلومینیم آسیاب شده تزریقی با گاز آرگون به ترتیب با مقدار 539/1 مگاپاسکال و 49/3 درصد است. افزایش ذرات آلومینا در زمینه آلومینیمی، افزایش ترشوندگی این ذرات با زمینه و همچنین توزیع یکنواخت - بواسطه استفاده از ذرات کمکی آلومینیم از جمله مهم‌ترین عوامل افزایش استحکام فشاری و درصد تغییر طول می‌باشند.



شکل 10 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیتی حاصل از آزمون فشار

جدول 6 مقادیر استحکام فشاری و درصد تغییر طول نمونه‌های کامپوزیتی

| شماره | عنوان اختصاری | استحکام فشاری (MPa) | درصد تغییر طول |
|-------|---------------|---------------------|----------------|
| 1     | Hi            | 310/9±23/2          | 27/1           |
| 2     | WHT           | 366/8±4/2           | 31/9           |
| 3     | HT            | 429/1±4/6           | 41/4           |
| 4     | Milled        | 539/1±4/9           | 49/3           |

رفته رفته با ادامه لغزش، افزایش مسافت و افزایش دمای سطحی، لایه‌های دو سطح به هم جوش خورده و مرتباً در نقاط اتصال و در عمق مشخصی گسیخته می‌شوند و مکانیزمی از نوع چسبان را ایجاد کرده که این اندرکنش بین دو سطح مطابق با شکل 9- ج و د، منجر به خستگی سطحی و در نهایت ترک و کندگی در سطح می‌شود.

### 3-2-4- استحکام فشاری

مقدار استحکام فشاری و درصد تغییر طول نمونه‌های کامپوزیتی WHT، Hi، Milled و HT در جدول 6 درج شده است. شکل 10 نیز نمودار استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. عواملی چون اصلاح دانه زمینه، توزیع منطقی ذرات در زمینه، تنش‌های حرارتی مستحکم چند جهتی در فصل مشترک زمینه و ذرات سرامیکی به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده (که منجر به افزایش تراکم نایبایی‌ها درون زمینه شده و همچنین ممکن است منجر به ایجاد تنش موضعی و افزایش استحکام زمینه شود)، بار انتقالی از زمینه به ذرات و مکانیزم استحکام بخشی اوروان از دلایل کلی افزایش استحکام فشاری می‌باشند. [16]

مطابق جدول 6 و شکل 10 کمترین مقدار استحکام فشاری و درصد تغییر طول مربوط به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات است. عدم اتصال مناسب بین ذرات و زمینه به دلیل حضور تخلخل اطراف ذرات و ترشوندگی ضعیف موجب کاهش در مقدار استحکام و همچنین درصد تغییر طول شده است. با استفاده از گاز خنثی تجمع و شناوری ذرات آلومینا کاهش یافته و در نتیجه مقدار ذرات بیشتری در زمینه باقی می‌ماند و این امر موجب افزایش استحکام فشاری می‌شود. عملیات حرارتی ذرات نیز حذف تخلخل اطراف ذرات را تسریع کرده و با اصلاح شکل دانه ذرات آلومینا از حالت نامنظم به کروی موجب افزایش ترشوندگی و توزیع مناسب‌تر در زمینه می‌شود. نتیجه این افزایش در

- [6] J. Segurado, C. Gonz  les, J. Llorca, "A numerical investigation of the effect of particle clustering on the mechanical properties of composites." *Acta Mater*; 51: pp. 2355-2369, 2003.
- [7] X. Deng, N. Chawla, " Modeling the effect of particle clustering on the mechanical behavior of SiC particle reinforced Al matrix composites." *J Mater Sci*; 41: pp. 5731-5734, 2006.
- [8] D.J. Lloyd, " Aspects of fracture in particulate reinforced metal matrix composites." *Acta Metal Mater*; 39(1): pp. 59-71, 1991.
- [9] Y.M. Youssef, R.J. Dashwood, P.D. Lee, " Effect of clustering on particle pushing and solidification behavior in TiB<sub>2</sub> reinforced aluminium PMMCs." *Compos Part A*; 36: pp. 747-763, 2005.
- [10] S.Y. Oh, J.A. Cornie, K.C. Russel, " wetting of ceramic particulates with liquid aluminum alloys: Part II. Study of wettability." *Metal Trans a*; 20A: pp. 533-541, 1989.
- [11] S. Naher, D. Brabazon, L. Looney, " Computational and experimental analysis of particulate distribution during Al-SiC MMC fabrication." *Compos Part A*; 38: pp. 719-729, 2007.
- [12] K.R. Ravi, V.M. Sreekumar, P.M. Pillai, C. Mahato, K.R. Amaranathan, R. Arul kumar, B.C. Pai, " Optimization of mixing parameters through a water model for metal matrix composites synthesis." *Mater Des*; 28: pp. 871- 881, 2007.
- [13] Y. Liu, X. S. Ning, " Influence of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0 0 0 1) surface reconstruction on wettability of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interface: A first-principle study", *Computational Materials Science*, 85, Pp. 193–199, 2014.
- [14] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi. " Particle distribution in cast metal matrix composites- Part I. *J Mater Process Technol*; 123: pp. 251-257, 2002.
- [15] J. Tomas, " Adhesion of ultrafine particles – A micromechanical approach." *Chem Eng Sci*; 62: Pp. 1997- 2010, 2007.
- [16] S.A. Sajjadi, H.R. Ezatpour, H. Beygi, "Microstructure and mechanical properties of Al– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> micro and nano composites fabricated by stir casting". *Materials Science and Engineering a*. Vol 528, Pp. 8765– 8771, 2011.
- [17] S.A. Sajjadi, M. Torabi Parizi, H.R. Ezatpour, A. Sedghi, Fabrication of A356 composite reinforced with micro and nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles by a developed compo-casting method and study of its properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 511 226– 231, 2012.
- [18] A. Kamarei, A. kolahdooz, S. Nourouzi, M. Bakhshi, A.H. Gorji, " effect of mold temperature and reheating on microstructure of Al-A360 alloy in casting with mechanical stirrer ", in the 10th conference of manufacturing Engineering, Noshirvani university, babol, 2010. (In Persian)
- [19] m. Hosseinzadeh, o. Mirzaee, p. Saidi, " Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles" *Materials and Design*. Vol 54, Pp. 245–250, 2014.
- [20] A. Sangghaleh, M. Halali. " An investigation on the wetting of polycrystalline alumina by aluminum" *J Mater Process Technology*, Vol 197, Pp.156–160, 2008.
- [21] M. Karbalaee Akbari, O. Mirzaee, H.R. Baharvandi, " Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method" *Materials and Design*, 46, 199–205, 2013.
- [22] W. Zhou, Z. M. Xu, " Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites" *Journal of Materials Processing Technology*, 63, Pp. 358-363, 1997.
- [23] K. Kannikeswaran, R.Y. Lin, " Trace element effects on aluminium silicon carbide interfaces". *Springer*, Vol 39, Issue 9, Pp. 17-19, 1987.
- [24] S. Amirhanlou, R. Jamaati, B. Niroumand, and M.R. Toroghinejad, " Fabrication and Characterization of Al/SiC Composites by CAR Process". *Materials Science and Engineering a*, Vol 528, Issues 13–14, Pp. 4462-446, 2011.
- [25] S. Panda, K. Dash, B. C. Ray, " Processing and properties of Cu based micro- and nano-composites", *Bull. Mater. Sci*, Vol. 37, No. 2, pp. 227– 238, 2014.

تنش فازی و حرارتی در یک کامپوزیت به سبب تفاوت در ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده ایجاد می شود. تنش فازی به درصد حجمی فاز تقویت کننده، شکل فاز تقویت کننده، تخلخل، بافت کریستالی زمینه، شرایط بارگذاری و حالت تنش بستگی دارد [25]. کاهش تجمع ذرات و جلوگیری از شناوری این ذرات در سطح مذاب موجب حضور بیشتر ذرات در زمینه شده است. به سبب اختلاف ضریب انبساط حرارتی ذرات آلومینا با زمینه آلومینیمی تراکم نایجایی ها افزایش می یابد. تراکم نایجایی ها با افزایش ذرات آلومینا در زمینه (افزایش مکان های با اختلاف ضریب انبساط حرارتی) افزایش می یابد، در نتیجه حضور بیشتر ذرات آلومینا در زمینه آلومینیمی در نمونه کامپوزیتی Milled منجر افزایش استحکام فشاری می شود.

#### 4- نتیجه گیری

1. وجود تخلخل و لایه های گازی اطراف ذرات آلومینا در نمونه های کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات آلومینا موجب تضعیف خواص مکانیکی چون استحکام فشاری، سختی، استحکام ضربه ای و مقاومت سایشی شده است.
2. استفاده از گاز خنثی و عملیات حرارتی در دمای 1100 درجه سانتی- گراد به مدت 20 دقیقه موجب کاهش تخلخل نمونه های کامپوزیتی و افزایش خواص مکانیکی را شده است.
3. بهترین نتیجه از نظر بهبود خواص مکانیکی در نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم به دست آمد. پیوستگی ذرات با زمینه و توزیع همگن این ذرات به بیشترین مقدار خود رسید و از مقدار تخلخل در کامپوزیت کاسته شد.
4. بالاترین مقادیر سختی، استحکام فشاری و انرژی شکست در نمونه کامپوزیت تقویت شده با ذرات آسیاب شده آلومینا/آلومینیم حاصل شد که نسبت به نمونه کامپوزیتی با تزریق دستی ذرات بترتیب افزایش 19 درصد، 73 درصد و 32 درصد و در ضریب اصطکاک میانگین کاهش 28 درصدی را نشان داده است.
5. مکانیزم سایشی این نوع کامپوزیت در نیروی 60 نیوتن، در مسافت های پایین از نوع خراشان بوده و در مسافت های بالا و با افزایش دمای نمونه به مکانیزم چسبان تغییر نمود.

#### 5- مراجع

- [1] M. Khademian, M. Saeedi Heydari, A. Alizadeh, H. R. Baharvandi, " Investigation the effect of hot rolling process on properties and microstructure of Al-B4C composite by vortex ", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 140-146, 2014 (In Persian).
- [2] D.B. Miracle, " Metal matrix composites -From science to technological significance." *Compos Sci Techno*, 65:pp. 2526-2540, 2005.
- [3] P. Rohatgi, " Cast metal matrix composites: Past, present and future." *AFS Trans: pp.* 01-133, 2001.
- [4] I.A. Ibrahim, F.A. Mohamed, E.J. Lavernia, " Particulate reinforced metal matrix composites – a review." *J Mater Sci*; 26; pp. 1137-1156, 1991.
- [5] H. Su, W. Gao, Z. Feng, Z. Lu, " Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced aluminum matrix composites ", *Materials and Design*, 36, 590–596, 2012.