جلد 5، شماره 4، زمستان 97، ص‌ص 583- 594

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

# مروری بر خواص مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده باذرات سرامیکی، تولید شده با فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید

**مسلم طیبی[1]، داود رحمت آبادی[2]، رامین هاشمی[3*]**

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114 ، rhashemi@iust.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

تاریخ دریافت: 96/8/15

تاریخ پذیرش : 96/10/26

**کلیدواژگان:**

کامپوزیت زمینه فلزی

تعیین شکل پلاستیک

ذرات تقویت‌کننده

خواص مکانیکی و ریزساختاری

مکانیزم‌های حاکم

**چکیده**

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دسته‌ای از مواد می‌باشند که دارای کاربردهای وسیع و گوناگونی از قبیل ساختمانی، سایشی و گرمایی می‌باشند. این نوع کامپوزیت‌ها نسبت به نقطه مقابل خود یعنی فلز پایه کاربردهای دمایی، استحکام، سفتی، هدایت حرارتی، مقاومت به سایش، مقاومت خزشی و پایداری ابعادی بهتری از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش به بررسی روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی به‌ویژه فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مبتنی بر نورد پرداخته شده است. تمرکز اصلی این پژوهش، بررسی خواص ریزساختاری، مکانیکی و مکانیزم‌های حاکم بر این نوع کامپوزیت‌ها که با دو روش نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع تولید شده‌اند است. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داد که در پاس‌های ابتدایی کامپوزیت‌های فراوری شده دارای توزیع مناسبی از ذرات تقویت‌کننده نیستند ولی با افزایش پاس، توزیع ذرات بهبود یافته و ذرات تقویت‌کننده در جهات طولی و عرضی توزیع می‌شوند. استحکام کششی و ریزسختی تقریبا روال مشابهی دارند به گونه‌ای که رفته رفته با افزایش میزان کرنش اعمالی و بهبود توزیع ذرات هر دو افزایش می‌یابند اما ازدیاد طول در پاس‌های ابتدایی به سبب توزیع نامناسب ذرات، تخلخل و ذرات خوشه‌ای ابتدا افت و سپس با رفع این عیوب و توزیع مناسب بهبود می‌یابد. البته خواص مکانیکی و ریزساختاری در روش نورد تجمعی متقاطع مطلوب‌تر می‌باشد. همچنین مکانیزم‌های حاکم بر اصلاح ریزساختار در کامپوزیت‌های فرآوری شده با استفاده از فرآیندهای برپایه نورد، تشکیل حلقه‌ی اوروان، نقش ذرات تقویت-کننده، اختلاف در ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده و غیره می‌باشد.

# Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD processes

**Moslem Tayyebi[1], Davood Rahmatabadi[2], Ramin Hashemi[2*]**

1- Department of Material Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

**Keywords**

Metal matrix composite

Sever plastic deformation

Reinforced particles

Microstructure and mechanical properties

Governing mechanism

**Abstract**

Metal matrix composites are bunch of materials that have wide range of uses such as construction, abrasion, and heat. This type of composite exhibits better dimension than the base metal such as temperature applications, strength, rigidity, thermal conductivity, wear resistance, creep resistance and stability. In this study, the methods of producing aluminum composite reinforced with ceramic particles, especially the processes of sever plastic deformation, have been investigated. The main focus of this research is to study the microstructure, mechanical properties and mechanisms governing this type of composite produced by two ARB and cross CARB methods. The results of the research showed that in the initial passes of the processed composites there is no proper distribution of reinforcing particles but by increasing the number of passes, the particle distribution is improved and the reinforcing particles are distributed in longitudinal and transverse directions. Tensile strength and microhardness have the same trend which they gradually increased with increasing strain rates and improvement of particle distribution but elongation at first decreased in the initial passes due to the inappropriate distribution of the particles, porosity and cluster particles, and then improved with the elimination of these imperfections and distribution. However, the mechanical and microstructural properties of the CARB method are more favorable. Also, the governing mechanisms for microstructure modification in produced composites by rolling processes are the formation of the Orowan loop, role of reinforcing particles, difference in the coefficient of thermal expansion of the matrix and reinforcement, and so on.

**Please cite this article using:**

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:**

Tayyebi, M. Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD processes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 583-594, 2019.

## 1- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی[1] به دلیل سبکی، استحکام و مدول الاستیسیته بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین و مقاوت سایشی خوب، جز گروه جدیدی از مواد مهندسی به‌شمار می‌روند [1-3]. این خواص ویژه سبب شده است که این دسته از مواد کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف همچون هوافضا، خودروسازی، دریایی، الکترونیک، نظامی و غیره داشته باشند [2, 4-6]. همچنین کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی[2] دسته‌ای از مواد متشکل از دو نوع ذرات تقویت‌کننده می‌باشند که اخیرا ساخت آن‌ها با روش‌های جدید مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [2, 7]. به‌منظور ساخت کامپوزیت-های زمینه آلومینیمی تقویت‌شده با ذرات، از روش‌های مختلفی مانند متالورژی پودر، ریخته‌گری کوبشی، ریخته‌گری همزدنی، اسپری فورمینگ استفاده شده است [1, 8]. از معایب این روش‌ها می‌توان به ترشوندگی ضعیف مابین ذرات تقویت‌کننده و زمینه آلومینیمی، توزیع غیریکنواخت در زمینه و درصد تخلخل بالا اشاره کرد. این معایب سبب می‌شوند که خواص مکانیکی کامپوزیت‌های فرآوری شده با روش‌های مذکور افت پیدا کند [2, 9]. همچنین در کامپوزیت-های زمینه فلزی به‌منظور دست‌یابی به خواص مکانیکی بهینه، باید از ذرات تقویت‌کننده با اندازه کوچک و کسر حجمی بالا استفاده شود، ولی استفاده از ذرات کوچک در کامپوزیت موجب خوشه‌ای شدن و در نتیجه افت خواص مکانیکی می‌شود [10]. در سال‌های اخیرا روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید[3] به‌خصوص فرآیند نورد تجمعی[4] به‌منظور برطرف کردن این معایب مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند [2, 11, 12]. فرآیند نورد تجمعی نسبت به دیگر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مانند پرس زاویه‌ای با مقطع یکسان[5]، تغییر شکل پیچشی با فشار بالا[6] فشردن و اکستروژن پاسی[7] دارای مزایای زیادی است. از جمله این مزایا می‌توان به عدم نیاز به ابزارآلات شکل‌دهی با توان بالا و گران قیمت، قابلیت صنعتی شدن، فرآوری مواد حجیم و بازده تولید بالا اشاره کرد [2]. فرآیند نورد تجمعی برای اولین بار توسط سایتو در سال 1998 ابداع شد [13] و کیتازونو در سال 2003 برای اولین بار از روش نورد تجمعی برای ساخت کامپوزیت‌های حاوی پودر استفاده کرد [14]. نمونه‌های تولیدی کیتازونو نشان داد که روش نورد تجمعی برای تولید کامپوزیت‌های حاوی پودرهای سرامیکی، بسیار مطلوب می‌باشد و پس از آن، این روش مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت و مواد کامپوزیتی متنوع تولید و خواص مکانیکی و ریزساختاری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین ذرات سرامیکی که به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند پودرهای $Al_2O_3$، SiC، $B_4C$ و WC می‌باشند [10]. پس از اینکه روش نورد تجمعی مورد توجه قرار گرفت، روش‌های جدیدی مبتنی بر همین روش توسط محققین جهت بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری ارائه شد. در سال 2009 روش نورد و آنیل متوالی توسط جماعتی و همکاران ارائه شد [15] و در سال 2010 روش نورد تجمعی متقاطع توسط علیزاده ارائه شد [16]. همچنین امبرخانلو در سال 2013 از روش جدید پرس تجمعی برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی حاوی ذرات سرامیکی استفاده کرد [17]. در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های فراوانی در زمینه ساخت و بررسی خواص‌های کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده با دو یا چند تقویت کننده سرامیکی انجام شده که اکثرا از ذرات سرامیکی $Al_2O_3$- $B_4C$ [18, 19]، $Al_2O_3$-SiC [20, 21]، $B_4C$-SiC [22] و غیره استفاده شده است [23].

در پژوهش حاضر، روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی حاوی ذرات سرامیکی با ذکر مزایا و معایب مورد بحث قرار می‌گیرد. البته تمرکز اصلی این پژوهش مروری بر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه نورد به خصوص فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع می‌باشد. همچنین در این مقاله، به بررسی خواص ریز ساختاری، خواص مکانیکی و عوامل موثر بر تغییرات خواص و همچنین مکانیزم‌های حاکم بر استحکام بخشی کامپوزیت-های تولید شده به روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه نورد پرداخته می‌شود.

## 2- مروری بر روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات

### 2-1- ریخته‌گری همزدنی[8]

روش ریخته‌گری همزدنی شامل همزدن فلز مذاب با ذرات جامد است و سپس به مخلوط اجازه داده می‌شود تا منجمد شود.به‌طور خلاصه می‌توان گفت که ارزان بودن و قابلیت صنعتی شدن از مزایای این روش می‌باشد [24]. از معایب این روش نیز می‌توان به احتمال واکنش بین اجزا، تشکیل باندهای ضعیف بین ذره و زمینه به‌دلیل حبس گاز، تنش برشی پایین به‌دلیل بالا بودن دمای اختلاط و توزیع غیر یکنواخت ذرات در زمینه خوشه‌ای شدن ذرات یا پس زده شدن آن‌ها به آخرین مناطق انجمادی اشاره کرد [24, 25].

### 2-2- ریخته‌گری کوبشی[9]

در روش ریخته‌گری کوبشی نیرو مستقیما به یک جز از قالب فلزی اعمال می‌شود و فشار قالب، فاصله هوایی بین مذاب و قالب را حذف نموده و این امر به افزایش سرعت انجماد کمک می‌کند. در روش ریخته‌گری کوبشی، میل به واکنش بین تقویت‌کننده و فلز مذاب در تولید کامپوزیت‌ها حداقل است، که به علت زمان توقف کوتاه در دمای بالا می‌باشد. محصولات تولید شده به‌این روش عیوب ریخته‌گری معمول مانند تخلخل و حفره‌های انقباضی را ندارند. در ریخته‌گری کوبشی، به‌منظور انجام صحیح فرآیند بایستی فلز مذاب دارای ویسکوزیته نسبتا کمی باشد و ترشوندگی خوبی با فلز تقویت‌کننده داشته باشد. این روش می‌تواند برای تولید کامپوزیت‌هایی با کسر بالای تقویت‌کننده‌ها بیشتر مورد استفاده قرار بگیرد [25].

### 2-3- کامپوکستینگ[10]

زمانی که یک مذاب در دمای ما بین لیکوییدوس و سالیدوس همزده می‌شود، ذرات در مذاب شناور می‌شوند. همزدن با سرعت بالا نرخ برش بالایی در مذاب ایجاد می‌کند، که تمایل به کاهش ویسکوزیته دارد و بالا بودن ویسکوزیته ناشی از حالت نیمه جامد مذاب را جبران می‌کند. چون این فرآیند نسبت به سایر روش‌های ریخته‌گری در دمای کمتری انجام می‌شود از واکنش‌های شیمیایی جلوگیری می‌کند و حفرات انقباضی را کاهش می‌دهد [24]. از مزایای روش کامپوکستینگ می‌توان به کاهش جدایش میکروسکوپی، شکسته شدن شاخه-های دندریتی و تغییر آن به دانه‌بندی‌های مجزا یا سلول گسسته و پراکنده

[1] Aluminum metal matrix composites (Al MMCs)
[2] Hybrid metal matrix composites (HMMCs)
[3] Sever Plastic Deformation (SPD)
[4] Accumulative Roll Bonding (ARB)
[5] Equal Channel Angular Pressing (ECAP)
[6] High Pressure Torsion (HPT)
[7] Cyclic Extrusion Compression (CEC)
[8] Stir casting
[9] Squeeze casting
[10] Compocast

شدن ذرات تقویت‌کننده و فازهای ثانویه اشاره کرد. همچنین این روش برای تولید انبوه مناسب می‌باشد [24].

**2-4- متالورژی پودر**

روش متالورژی پودر ، بیشتر برای تهیه کامپوزیت زمینه فلزی که با الیاف ناپیوسته، ذرات و ویسکرها[1] تقویت شده، استفاده می‌شود. این روش در مقابل سایر روش‌های ریخته‌گری قابلیت اطمینان بیشتری دارد، اما مرحله ترکیب و مخلوط کردن زمینه و تقویت‌کننده، وقت‌گیر و هزینه‌بر است. همچنین، توزیع درست و یکنواخت ذرات محصول نهایی دشوار است. نسبت اندازه ذرات تقویت کننده به زمینه فاکتور بسیار مهمی در توزیع ذرات در زمینه می‌باشد [26]. مزایای روش متالورژی پودر، دمای کم فرآوری است، که مانع از واکنش شدید در فصل مشترک می‌شود. می توان از پودرهای از پیش آلیاژی شده یا به عبارت دیگر پودر تولید شده از مذاب آلیاژی استفاده کرد و یا می‌توان پودر فلزات خالص را با هم مخلوط نمود. قابل ذکر است که استفاده از پودرهای از پیش آلیاژ شده نسبت به پودر فلزات در متالورژی پودر، دارای هزینه‌ی بیشتر و یکنواختی بهتر در ریزساختار است [26].

**2-5- رسوب اسپری[2]**

در این روش از یک تفنگ اسپری برای اتمیزه کردن زمینه آلیاژ آلومینیم مذاب همراه با ذرات سرامیکی مانند کاربیدسیلسیم استفاده می‌شود. مزایای اصلی این روش سرعت بالای تولید (در حدود 10-6 کیلوگرم بر دقیقه) و سرعت انجماد خیلی زیاد است که واکنش بین ذرات و زمینه را به حداقل می‌رساند. همچنین ذرات به صورت همگن در زمینه توزیع می‌شوند. بیلت تهیه شده کاملا چگال نبوده و باید یک عملیات ثانویه جهت متراکم نمودن و همگن ساختن کامپوزیت در آن انجام شود. همچنین این روش انعطاف‌پذیری زیادی داشته و می‌توان کامپوزیت تقویت‌کننده‌های مختلفی را به این روش فرآوری کرد. این فرآیند به علت بالا بودن هزینه‌ی تجهیزات آن دارای محدودیت است [25].

**2-6- تغییر شکل پلاستیک شدید**

یکی از پرکاربردترین روش های ساخت مواد ریزساختار، روش تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد [27]. فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از مناسب‌ترین روش‌های تولید مواد فلزی با اندازه دانه‌ی میکرو و نانومتری در مقیاس صنعتی است [28]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، تنها برای فلزات قابل کاربرد می‌باشند. در تمامی این روش‌ها بلورهای داخل فلزات تحت فشار زیاد و در معرض تنش برشی بالایی قرار می‌گیرند و این کار موجب کاهش اندازه بلور فلزات می‌شود. ویژگی مشترک و منحصر به‌فرد این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد نمونه‌ی اولیه و عدم تغییر شکل ظاهری آن حین فرآیند است که در نتیجه محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دست‌یابی به کرنش‌های بسیار بالا در ماده به‌راحتی میسر می‌شود. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، درحالی‌که شکل نمونه تغییری نکرده است [29]. تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شده‌اند و هم‌اکنون نیز در حال توسعه و گسترش می‌باشند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فرآیندهای تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد [30]، تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار [31]، فرآیند نورد تجمعی [11, 32]، نورد تجمعی متقاطع [33] و پرس تجمعی [17, 34] اشاره کرد. برخی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید علاوه بر اصلاح ریزساختار تا مقیاس نانومتری نمونه‌های فلزی، امکان استفاده به عنوان فرآیند تولیدی برای کامپوزیت‌های لایه‌ای با تقویت‌کننده‌های سرامیکی به شکل پودر، را نیز دارند. در این زمینه و از بین روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، روش نورد تجمعی مهم‌ترین فرآیند می‌باشد که بیشتر از سایرین مورد توجه قرار گرفته است. البته فرآیندهای دیگر نظیر نورد تجمعی متقاطع، نورد و آنیل متوالی و پرس تجمعی مبتنی بر همین روش نورد تجمعی ابداع شده که باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت‌های تولید شده در مقایسه با فرآیند نورد تجمعی شده است. در ادامه به معرفی و بررسی بیشتر فرآیندهای مذکور پرداخته می‌شود.

**2-6-1- فرآیند نورد تجمعی**

در سال 1998 سایتو و همکارانش در زمینه‌ی تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دست‌یابی به مواد فلزی ریزساختار فرآیند نورد تجمعی را ابداع نمودند [11, 12, 32]. مهم‌ترین برتری فرآیند نورد تجمعی نسبت به دیگر روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق‌العاده ریزدانه و عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا می‌باشد که درنتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه است [32]. از این روش به‌عنوان روشی جدید برای تولید مواد ریزدانه، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامکی، مواد چندلایه با خواص مکانیکی مطلوب استفاده می‌شود. در این روش ابتدا دو یا چند ورق با ابعاد کاملاً یکسان، آماده‌سازی سطحی می‌شوند. آماده‌سازی سطحی شامل، شست‌وشوی اولیه نمونه‌ها با آب و صابون، چربی‌زدایی با استفاده از حمام استون و زبر کردن لایه‌هایی که در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، می‌باشد [35]. پس از عملیات آماده‌سازی اولیه، ورق‌ها روی یکدیگر قرار گرفته و به منظور جلوگیری از سر خوردن آن‌ها به وسیله سیم از چهار طرف بسته می‌شوند. سپس توسط فرآیند نورد، یک کاهش ضخامت بالا (معمولا بالای 50%) اعمال‌شده و به یکدیگر متصل می‌شوند. برای ایجاد پیوند مناسب حتی گاهی دما تا زیر دمای تبلور مجدد ماده نیز می‌تواند افزایش یابد. در ادامه، ورق نوردشده، از وسط برش خورده و به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و دوباره مراحل ذکر شده تکرار می‌گردند. بنابراین با افزایش تعداد این پاس‌ها، می‌توان کرنش پلاستیکی زیادی به ماده اعمال کرد [36]. کیتازونو[3] در سال 2003 برای اولین بار از روش نورد تجمعی برای ساخت کامپوزیت‌های حاوی پودر استفاده کرد [14]. در این روش بعد از عملیات آماده‌سازی سطحی میزان پودر مورد استفاده در بین لایه‌ها ریخته می‌شود و مراحل دیگر فرآیند نورد تجمعی تکرار می‌شود.

**2-6-2- فرآیند نورد تجمعی متقاطع**

یکی از روش‌های جدیدی که در ساخت مواد مرکب ریزدانه و حاوی ذرات تقویت‌کننده به‌کار می‌رود، روش نورد تجمعی متقاطع[4] است. اساس این روش مبتنی بر همان روش نورد تجمعی می‌باشد و برای اولین بار در سال 2010، توسط علیزاده با تولید کامپوزیت آلومینیم/کاربیدبور ابداع شد و پس از آن مورد توجه محققین قرار گرفت [16]. تنها تفاوت روش نورد تجمعی متقاطع با روش نورد تجمعی معمولی در نحوه‌ی تولید مواد مرکب لایه‌ای، چرخش حول محور

[1] Whisker
[2] Spray forming
[3] Kitazono
[4] Cross accumulative roll bonding (CARB)

عمود بر صفحه در هر پاس می‌باشد [37]. از مزیت‌های روش نورد تجمعی متقاطع نسبت به روش نورد تجمعی معمولی، می‌توان به توزیع بهتر و یکنواخت‌تر ذرات تقویت‌کننده، ساخت کامپوزیت با تعداد پاس بیشتر (اعمال کرنش بیشتر) و نهایتا دست‌یابی به ماده خواص مکانیکی و ریزساختار بهتر اشاره کرد [38].

### 2-6-3- فرآیند نورد و آنیل متوالی[1]

فرآیند نورد و آنیل متوالی نیز بر اساس فرآیند نورد تجمعی و به‌منظور بهبود کیفیت و استحکام لایه‌ها در کامپوزیت‌های حاوی کسر حجمی بیشتر از ذرات سرامیکی ارائه شد. این فرآیند در سال 2009 جماعتی و همکاران با ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیم متشکل از 15% ذرات تقویت‌کننده آلومینا ابداع شد [15]. در فرآیند نورد و آنیل متوالی پس از اعمال هر پاس فرآیند نورد، نمونه آنیل می‌شود و قابلیت تغییر شکل نمونه به آن بازگردانده می‌شود. البته پس از آخرین پاس آنیل صورت نمی‌گیرد. تاثیر این روش بر روی استحکام پیوند لایه-ها با توجه به افزایش قابلیت تغییر شکل فلزات بیشتر می‌باشد [15, 39, 40].

### 2-6-4- فرآیند پرس تجمعی

فرآیند پرس تجمعی-پیوندی به‌عنوان روشی جدید از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید توسط امیرخانلو و همکارانش مطرح شد [17]. فناوری نوین به سمت تولید آلیاژهای مستحکم‌تر و سبک‌تر پیش می‌رود تا از این طریق در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. مهم ترین ویژگی این روش نسبت به دو روش نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع، ابعاد بزرگ‌تر در محصول نهایی می‌باشد [17]. فرآیند پرس تجمعی-پیوندی، شامل مراحل آماده‌سازی سطحی دو نمونه، روی‌هم قرار دادن آن‌ها، پرس دو نمونه با کاهش ضخامت 50 درصد در یک قالب ساده و برش پس از پرس می‌باشد. در این زمینه نیز کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم زیادی نظیر Al-WC [41]، Al-ZnO [34]، Al-SiC [42] تولید شده است .

## 3- بررسی ریزساختاری MMCs فرآوری شده با فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع

در حین انجام فرآیند نورد به‌دلیل سطح کل بالای ذرات تقویت‌کننده و جاذبه واندروالس[2] مابین آن‌ها، ذرات به صورت خوشه‌ای شده و به هم چسبیده در ساختار حضور دارند. در فضای مابین این ذرات هوا به دام محبوس می‌شود و تخلخل‌ها و حفراتی را تشکیل می‌دهد که این عوامل باعث پیوند ضعیف بین ذرات تقویت‌کننده و لایه‌های زمینه می‌شود [2, 9, 18, 43].

شکل 1 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از کامپوزیت زمینه آلومنیمی در پاس‌های مختلف از فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل 1a بعد از پاس اول مناطق بزرگ خالی از ذرات تقویت‌کننده، تخلخل و حفرات و خوشه‌های به‌هم چسبیده ذرات مشاهده می‌شود. با توجه به نظریه فیلم، در ترک‌هایی که در سطح و لابه‌لای پودرها ایجاد شده، ذرات آلومینیمی از بین ترک‌های سطحی و خوشه‌های ذرات، سیلان یافته و به بیرون اکسترود می‌شود. در این حالت زمینه آلومینیمی به عنوان واسطه برای اتصال نیرو به تقویت‌کننده‌ها عمل می‌کند و فضای بین آن‌ها را پر می‌کند. چون ذرات فاقد قابلیت تغییر شکل پلاستیک هستند یا قابلیت تغییر شکل پلاستیک آن‌ها اندک است، زمینه آلومینیمی می‌تواند به آسانی در اطراف ذرات سیلان یابد که این اثر سیلان برشی[3] نام دارد [44]. ذرات تقویت‌کننده قابلیت تغییر شکل پلاستیک ندارند و تنها پاسخ آن‌ها به تنش شکست است و خوشه‌های ذرات تجمع یافته در اثر تنش به ذرات کوچکتری تبدیل شده است. سیلان فلز ذرات شکسته شده از خوشه‌ها را به اطراف انتقال می‌دهد و آن‌ها را در زمینه توزیع می‌کند. بنابراین مطابق با شکل 1b خوشه‌های بزرگتر به خوشه‌های کوچکتر تبدیل شده است [18]. در حالت خوشه‌ای بودن ذرات، به‌علت تمرکز ذرات و عدم توزیع آن‌ها خواص مکانیکی ضعیف است. با انتقال ذرات توسط سیلان آلومینیم فاصله بین ذرات بهبود یافته و پخش یکنواخت می‌شود و مناطق خالی از ذرات و تخلخل‌ها ناپدید شده است. بنابراین با شکست خوشه‌ها و انتقال آن‌ها توسط آلومینیم شکل و اندازه خوشه‌ها اصلاح می‌شود. از سوی دیگر و مطابق با شکل 1c توزیع یکنواخت ذرات و جدا شدن خوشه‌ها، موجب بهبود تماس لایه‌های فلز به فلز می‌شود و اتصال بهتری رخ می‌دهد. همچنین سیلان زمینه آلومینیمی در اطراف تقویت‌کننده باعث بهبود اتصال فصل مشترک زمینه و ذرات تقویت‌کننده می‌شود [2, 18].

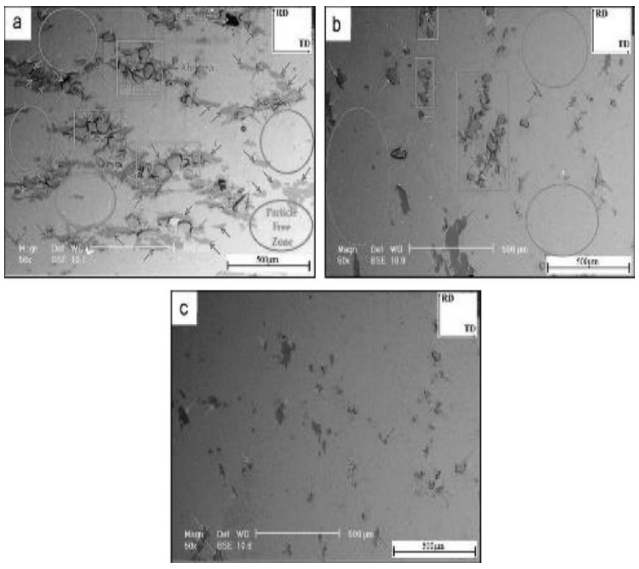


**Fig. 1** SEM micrographs of the Al/B4C/Al2O3 composites after different ARB cycle: (a) first, (b) fifth and (c) tenth [18]

**شکل 1** میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از کامپوزیت Al/B4C/Al2O3 در پاس‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی: (a) اول، (b) پنجم و (c) دهم

### 3-1- مکانیزم‌های توزیع ذرات تقویت‌کننده در فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع

در فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع برای توزیع و پخش ذرات تقویت‌کننده مکانیزم‌هایی معرفی شده است که هر کدام در نحوه‌ی پخش ذرات سهیم می‌باشند. مهم‌ترین مکانیزم‌های پخش ذرات به شرح زیر می‌باشند که توضیح داده می‌شود.

1- افزایش تعداد لایه‌ها: به عنوان مثال بعد از 8 پاس فرآیند نورد تجمعی (کامپوزیتی که ساندویچ اولیه آن متشکل از دو لایه آلومینیم می‌باشد)، یعنی 8 بار بریدن و چسباندن و نورد ورق‌های آلومینیم حاوی ذرات تقویت‌کننده، 256 لایه آلومینیم و 255 فصل مشترک وجود دارد و ضخامت لایه های

[1] Continual Annealing and Roll-bonding (CAR)
[2] van der Waals
[3] shear flow effect

آلومینیمی کاهش می‌یابد و بنابراین توزیع ذرات در راستای عمود بر نورد (ND) بهتر می شود [45].

2- اکستروژن آلومینیم از میان خوشه‌های ذرات تقویت‌کننده: تحت فشار عمودی نورد، زمینه آلومینیم در بین خوشه‌های ذرات تقویت‌کننده جریان و اکسترود می‌شود که نتیجه‌ی آن پخش یکنواخت ذرات است .

3- تغییر شکل شدید در زمینه آلومینیم: افزایش کرنش اعمالی باعث بهبود در شکل و اندازه ذرات خوشه‌ای می‌شود. بنابراین ذرات بسیار یکنواخت‌تر در سراسر زمینه پخش می‌شوند.

4- افزایش طول ورق: به سبب افزایش طول ورق، ذرات خوشه‌ای همراستای جهت نورد ایجاد می‌شوند. این پدیده باعث افزایش فاصله‌ی ذرات، پخش خوشه‌ای شدن، انقباض ناحیه آزاد ذرات و بهبود یکنواختی در ریزساختار می‌شود [8, 46]. در فرآیند نورد تجمعی، مقدار ازدیاد طول ورق در جهت نورد رخ می‌دهد که تابعی از کاهش ضخامت در حین نورد است. از طرف دیگر، چون تغییر شکل کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود، کرنش در جهت عرضی تقریبا صفر می‌باشد. بنابراین ازدیاد طول ورق در ارتباط با پخش ذرات در راستای عرض ورق بی‌تاثیر است. در مقابل در فرآیند نورد تجمعی متقاطع، ازدیاد طول ورق در راستای عرض هم وجود دارد و این عامل باعث بهبود در پخش ذرات تقویت‌کننده می‌شود. از بین چهار مکانیزم توضیح داده شده، سه مکانیزم اول برای هر دو فرآیند کاملا یکسان می‌باشد، ولی در فرآیند نورد تجمعی متقاطع به‌دلیل تغییر مسیر کرنش (چرخاندن ورق و اعمال کرنش در راستای عرضی)، کرنش در راستای عرضی هم اعمال می‌شود و همین مسئله باعث بهبود در ریزساختار و پخش بهتر و یکنواخت‌تر ذرات تقویت‌کننده می‌باشد.

**2-3- مقایسه توزیع ذرات در فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع**

در فرآیند نورد تجمعی حالت تنش مسطح برقرار است و در جهت TD کرنش صفر در نظرگرفته می‌شود. بنابراین در فرآوری کامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده به روش نورد تجمعی مکانیزم‌های توزیع ذرات در زمینه آلومینیمی صرفا در جهات ND و RD وارد عمل شده و از توزیع ذرات در جهت TD صرف‌نظر می‌شود. در طی فرآیند نورد تجمعی متقاطع به‌علت چرخش 90 درجه‌ای نمونه حول محور ND در طی پاس‌های متناوب هر دو جهت طولی و عرضی در راستای نورد قرار گرفته و کرنش بر هر دو جهت اعمال می‌شود. بنابراین توزیع ذرات در هر دو جهت طولی و عرضی صورت گرفته و در کل توزیع ذرات یکنواخت‌تر می‌شود. شکل 2 توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیمی توسط دو روش نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع ارائه شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که با مقایسه توزیع ذرات در صفحات و جهات مختلف در نمونه‌های نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع نتایج زیر به دست آمده است که توزیع ذرات در جهت TD درنمونه نورد تجمعی متقاطع بهتر از توزیع ذرات در جهت TD نمونه نورد تجمعی است (شکل 2)، ولی توزیع ذرات در جهت RD نمونه نورد تجمعی بهتر از توزیع ذرات در جهت RD نمونه نورد تجمعی متقاطع است. دلیل آن به این نکته برمی‌گردد که در فرآیند نورد تجمعی کرنش درتمامی پاس‌ها در یک جهت اعمال می‌شود ولی در فرآیند نورد تجمعی متقاطع با چرخش نمونه حول محور ND بر هر دو راستای طولی و عرضی کرنش اعمال می‌شود و توزیع ذرات در هر دو جهت یکنواخت می‌شود [2].

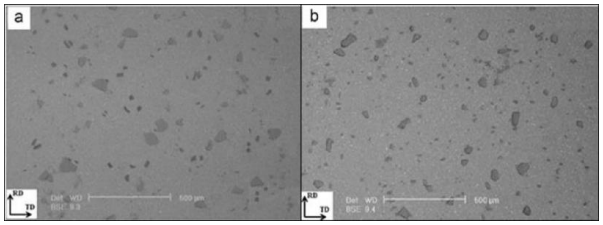


**Fig. 2** Comparison of the distribution of particles in produced composite by: (a) ARB and (b) CARB process [2]

**شکل 2** مقایسه توزیع ذرات در کامپوزیت تولید شده به روش: (a) نورد تجمعی (b) نورد تجمعی متقاطع [2]

**3-3- تغییرات ریزساختاری در فرآیند نورد و آنیل متوالی**

در فرآیند نورد و آنیل متوالی پس از هر پاس نورد، نمونه آنیل می‌شود، بنابراین فلز آلومینیم درای قابلیت تغییر شکل پلاستیک بیشتری است و توزیع ذرات و اتصال بین ورق‌های آلومینیم بهتر صورت می‌گیرد. توزیع ذرات بر مبنای سیلان آلومینیم در اطراف خوشه‌ها و اکسترود شدن از لابه‌لای خوشه‌ها می‌باشد که ذرات موجود در خوشه‌ها را به اطراف منتقل می‌کند، پس هرچه قابلیت تغییر شکل آلومینیم بیشتر باشد توزیع ذرات بهتر صورت می‌گیرد. همچنین به علت افزایش قابلیت تغییر شکل پلاستیک آلومینیم و بر اساس تئوری فیلم بیرون-زدن فلز از لابه‌لای ترک‌های سطحی و اتصال ورق‌های آلومینیم بهتر صورت می‌گیرد. به‌سبب آنیل نمونه‌ها بعد از هر پاس، قابلیت تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد و استحکام نمونه‌های فرآوری شده نسبت به نمونه آنیل نشده کاهش می‌یابد. البته با توزیع بهتر ذرات در این روش و بهبود استحکام پیوند لایه‌های آلومینیم، کاهش استحکام را جبران می‌کند. همچنین چون آنیل بعد از پاس مورد نظر نیست و قبل از آن صورت می‌گیرد، اثر کارسختی وجود دارد اما نسبت به نمونه آنیل نشده دارای استحکام کمتری است. انعطاف‌پذیری قابل توجهی در مواد فرآوری‌شده در این روش وجود دارد که به‌دلیل آنیل قبل از هر مرحله، توزیع بهتر ذرات و حذف خوشه ها در فرآیند می‌باشد. خوشه‌ها به‌دلیل تجمع ذرات مکان مناسبی برای جوانه‌زنی و رشد ترک هستند، اما با توزیع آن‌ها در زمینه فاصله اشاعه ترک افزایش می‌یابد. مقدار تخلخل‌ها نیز به‌دلیل افزایش قابلیت تغییر شکل پلاستیک آلومینیم کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین بر اساس تئوری فیلم، با تغییر شکل پلاستیک بیشتر آلومینیم، بیرون آمدن آلومینیم از لابه‌لای ترک‌ها آسان‌تر صورت گرفته و اتصال بهتری برقرار می‌شود [9, 15].

**4-3- تاثیر نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع بر خواص ریزساختاری و مکانیکی کامپوزیت‌های ریختگی**

جماعتی و همکاران تاثیر اعمال فرآیندهای نورد تجمعی و نورد و آنیل پیوسته را بر ریزساختار کامپوزیت ریختگی Al-SiC بررسی کردند [47]. مطابق با شکل 3، ساختار ریختگی یکنواخت نمی‌باشد و خوشه‌های بسیاری از سیلیسیم و کاربید سیلیسیم به صورت پراکنده در آن وجود دارد. ذرات سیلیسیم درشت و با شکل‌های نامنظم ، حفرات و مناطق بزرگ خالی از ذره مشاهده می‌شود و کیفیت فصل مشترک آلومینیم و SiC نامطلوب به نظر می رسد. بر اساس شکل 3، با اعمال فرآیندهای ARB و CAR تغییرات ریزساختاری زیر حاصل شد [47]: یکنواخت شدن توزیع ذرات SiC و Si، ریز شدن ذرات SiC و حذف آگلومره ها، کوچک شدن اندازه Siو کاهش فاصله بین ذرات، اصلاح شکل Si و تبدیل آن از حالت گوشه‌دار به کروی، بهبود کیفیت اتصال فصل مشترک آلومینیم و SiC، حذف حفرات و ریز شدن دانه‌های زمینه در شکل 4 تغییرات

خواص مکانیکی کامپوزیت Al/SiC ریخته‌شده و ریخته‌گی اصلاح شده با فرآیندهای نورد تجمعی و نورد و آنیل پیوسته مشاهده می‌شود که استحکام نمونه پس از اعمال فرآیندهای نورد تجمعی و نورد و آنیل پیوسته به ترتیب 3.31و 1.59 برابر بیشتر از نمونه کامپوزیت ریختگی است [47]. استحکام نمونه نورد تجمعی شده بیشتر از نمونه‌ی ریختگی اصلاح شده به روش نورد و آنبل پیوسته است و در نمونه CAR به‌دلیل آنیل قبل از هر پاس نورد، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است. به‌همین دلیل، توزیع ذرات را با افزایش قابلیت تغییر شکل مکانیکی زمینه آسان‌تر می‌کند و به علت فرآیندهای نفوذی در آنیل، کروی کردن Si را آسان‌تر می‌کند [47].

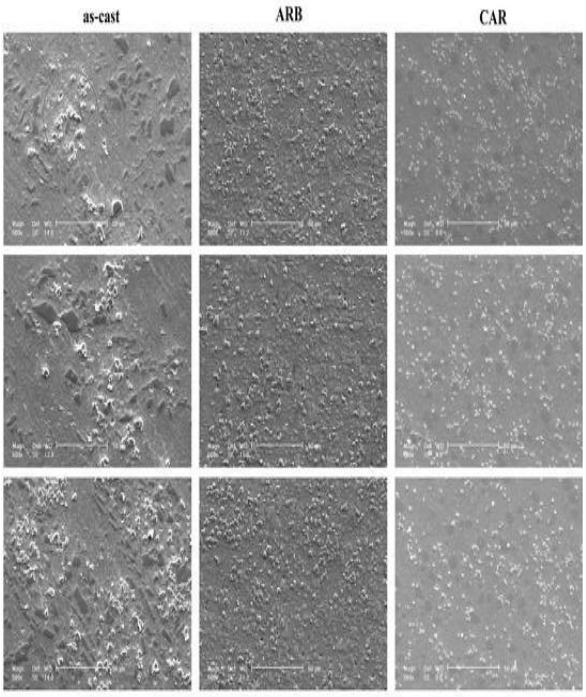


**Fig. 3** Distribution of particles in produced composite by: (a) as-cast and modified by (b) ARB and (c) CAR processes [47]

**شکل 3** توزیع ذرات در کامپوزیت Al-SiC ریختگی و ریختگی اصلاح شده با فرآیندهای ARB و CAR [47]

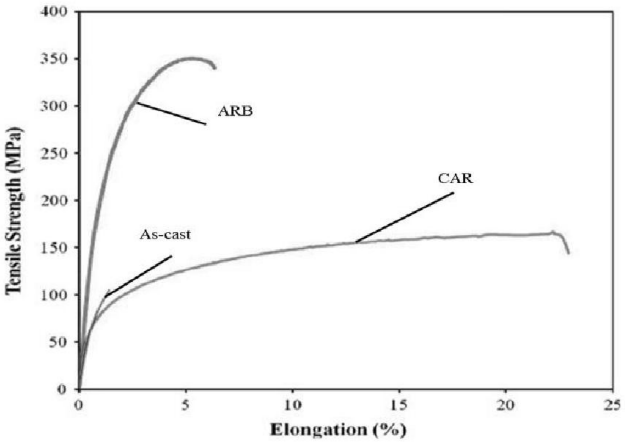


**Fig. 4** comparison of stress-strain curves of Al-SiC produced as-cast and modified by ARB and CAR processes [47]

**شکل 4** مقایسه منحنی های تنش کرنش در کامپوزیت Al-SiC ریختگی و ریختگی اصلاح شده با فرآیندهای ARB و CAR [47]

## 4- بررسی خواص مکانیکی MMCs فرآوری شده با فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع

### 4-1- عوامل تاثیر گذار در بهبود خواص مکانیکی

#### 4-1-1- کارسختی و ریزدانه شدن

سایتو و همکارانش گزارش کردند که تغییرات استحکام کششی فلزات تولید شده به روش نورد تجمعی به‌دلیل کرنش‌سختی، بهبود ریزساختار و تشکیل ریزدانه‌ها (مکانیزم تقویت مرزدانه‌ها) می‌باشد [13]. در مراحل اولیه از فرآیند نورد تجمعی، کرنش‌سختی یا تقویت نابه‌جایی نقش اصلی افزایش استحکام را بازی می‌کند. در حالی که در پاس‌های بالاتر، استحکام بالا به‌دلیل اصلاح دانه‌ها به‌دست می‌آید [13]. هنگامی که اثر کارسختی کاهش می‌یابد، بهبود تدریجی ریزدانه‌ها نقش اصلی استحکام بخشی را بازی می‌کند [45].

#### 4-1-2- نقش ذرات تقویت‌کننده در زمینه

افزایش استحکام را با افزایش تعداد پاس ARB می‌توان به توزیع همگن تقویت‌کننده‌ها درزمینه‌ی آلمینیومی و همچنین کاهش عیوب ساختاری مانند خوشه‌ای شدن ذرات و تخلخل‌ها در میکرو ساختار کامپوزیت فرآوری شده نسبت داد [48]. همچنین ذرات تقویت‌کننده از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کنند و شرایط بهتری برای تشکیل دانه‌های فوق‌ریز را فراهم می‌کنند. در مرحله‌ی اول فرآیند، ذرات تقویت‌کننده به زمینه اضافه می‌شوند. حضور ذرات در زمینه سبب می‌شود که نابه‌جایی‌ها در همسایگی آن‌ها جمع شوند و بنابراین چگالی نابه‌جایی در زمینه و نزدیک فصل مشترک زمینه/پودر زیاد می‌شود و باعث بهبود استحکام می‌شود [18, 20]. دیگر رابطه ذرات برای تقویت استحکام، ناشی از تفاوت خواص سیلان زمینه و تقویت‌کننده است. از آن‌جا که ذرات غیرقابل تغییرشکل و زمینه‌فلزی به‌صورت تغییرشکل پلاستیک، تغییر شکل می‌یابند، ناسازکاری کرنشی بین ذرات و زمینه تولید می‌شود. ناسازگاری کرنش منجر به تولید نابه‌جایی‌های لازم هندسی می‌شود که در زمینه و نزدیک سطح مشترک زمینه/پودر ذخیره می‌شوند [45, 46]. همچنین ذرات تقویت‌کننده سرامیکی در حین آزمون کشش مانند یک مانع عمل می‌کنند و در نتیجه سبب افزایش استحکام می‌شوند.

#### 4-1-3- تخلخل

حضور تخلخل به‌خصوص در اطراف ذرات تقویت‌کننده سبب کاهش استحکام و ازدیاد طول می‌شود [8, 49, 50]. وجود تخلخل در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات، نقش مهمی را در کاهش استحکام و ازدیاد طول نمونه ایفا می‌کند. تخلخل موجود در اطراف پودرها که غالبا به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت به‌کار می‌روند با وجود تخلخل می‌توانند نقش معکوس ایفا کنند و باعث افت خواص مکانیکی شوند. شکل 5 میزان تخلخل در پاس‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل 5 در پاس‌های ابتدایی فرآیند نورد تجمعی به‌سبب بالا بودن میزان تخلخل، خواص مکانیکی کامپوزیت افت پیدا می‌کند و با افزایش پاس‌های نورد تجمعی و کاهش میزان تخلخل، استحکام و ازدیاد طول بهبود می‌یابد. از دیگر عوامل افت استحکام می‌توان به حفرات ریز فصل مشترکی به‌خصوص در گوشه‌های تیز تقویت‌کننده‌ها که نواحی با تنش بالا می‌باشند اشاره کرد [8, 51]. به‌طور کلی بالا رفتن ناسازگاری پلاستیک بین فصل مشترک ذرات-زمینه موجب به‌وجود آمدن تخلخل در کامپوزیت می‌شود. کاهش تخلخل در کامپوزیت طی نورد به سبب سیلان زمینه تحت فشار اعمالی و نیروی برشی و در نتیجه پر شدن حفرات و جداسازی ذرات از یکدیگر است. با افزایش تعداد پاس‌های نورد تخلخل کاهش می‌یابد. افزایش

تعداد پاس‌ها سیلان آسان‌تری را در زمینه مهیا می‌کند و از این سو موجب کاهش تخلخل و تشکیل یک ورق بالک چگال می‌شود. در کل مهم‌ترین دلیل نورد در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات، کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی است [50].

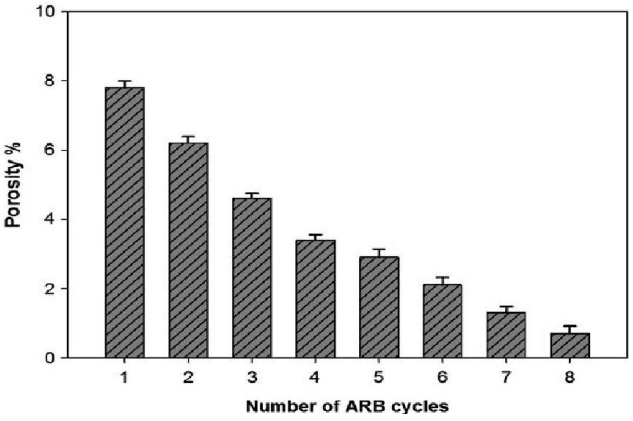


**Fig. 5** Porosity of produced composite by ARB process according to the number of pass

**شکل 5** تخلخل در کامپوزیت تولید شده با فرآیند نورد تجمعی برحسب پاس [50]

**4-1-4- اندازه و کسر حجمی ذرات تقویت کننده**

ذرات ریز سبب افزایش موانع برای حرکت مرزدانه‌ها و جلوگیری از رشد دانه‌ها و تاخیر در بازیابی و تبلور مجدد می‌شوند که سبب افزایش استحکام می‌شوند. همچنین ذرات‌ریز، فصل مشترک‌های ذره/فلز بیشتری ایجاد می‌کنند، بنابراین ترک‌ها زودتر می‌توانند به یکدیگر بپیوندند و ازدیاد طول کاهش می‌یابد [49]. اندازه‌ی ریز ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش تعداد موانع می‌شود و در نتیجه تاثیر ذرات تقویت‌کننده بیشتر می‌شود.توزیع ذرات به شدت به انتخاب اندازه و کسر حجمی ذرات بستگی دارد. تان و ژانگ مدلی برای انتخاب اندازه ذرات برای دست یابی به توزیعی یکنواخت از ذرات در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تولید شده با متالورژی پودر پیشنهاد این مدل سپس توسط ریحانیان و همکارانش توسعه داده شد [52]. اندازه و کسر حجمی ذرات دو فاکتور کلیدی کنترل‌کننده خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند. برای بدست آوردن کامپوزیتی با ترکیبی از استحکام و داکتیلیتی خوب، به ذرات با اندازه کوچک و کسر حجمی بزرگ نیاز است. اگرچه این نیاز معمولاً با توزیع ناهمگن ذرات و افت خواص مکانیکی کامپوزیت همراه است. [53].

**4-1-5- توزیع ذرات تقویت کننده**

توزیع ذرات تقویت‌کننده نقش مهمی بر استحکام و ازدیاد طول کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی حاوی ذرات دارد. هنگامی‌که تعداد پاس‌های نورد افزایش می‌یابد، توزیع ذرات در کامپوزیت یکنواخت‌تر شده و به‌سبب تغییر شکل پلاستیک فواصل بین فصل مشترک‌های ذرات/فلزات افزایش یافته و به همین دلیل جوانه‌زنی ترک در فصل مشترک‌ها به تاخیر می‌افتد و استحکام و ازدیاد طول کامپوزیت بهبود می‌یابد [22, 49, 54].

در مرحله‌ی دوم فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع اعمال کرنش بدون اضافه کردن پودرهای تقویت‌کننده انجام می‌شود. در این مرحله، با افزایش پاس‌های فرآیند، پخش یکنواخت‌تر به‌دست می‌آید و پیوند بهتر بین لایه‌ها ایجاد می‌شود. همچنین تخلخل حذف می‌شود و استحکام بیشتری حاصل می‌شود [45].

**4-1-6- اختلاف ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده**

هنگام نورد، افزایش دما به سبب تغییر شکل پلاستیک در نمونه ایجاد می‌شود و زمانی که نمونه بعد از نورد سرد می‌شود به‌علت اختلاف در ضریب انبساط حرارتی ذره و فلز، تنش‌های حرارتی در فصل مشترک‌ها به‌وجود می‌آید و نابجایی‌ها تولید می‌شوند که این امر موجب بهبود استحکام و کاهش ازدیاد طول می‌شود [49, 55].

**4-1-7- کیفیت اتصال فصل مشترک‌ها**

مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ایجاد ترک در فصل مشترک‌ها و پیوستن به یکدیگر می‌باشد. هنگامی‌که تعداد پاس‌های نورد تجمعی افزایش می‌یابد، پیوند بین فصل مشترک‌های فلز/ذره قوی‌تر شده که این نیز به‌دلیل فشار ناشی از غلتک‌های نورد می‌باشد و نتیجتا استحکام و تغییر طول افزایش می‌یابد [49, 56]. این عامل نیز می‌تواند باعث انتقال تنش بین دو فاز گردد که یک پیوند مناسب باعث انتقال تنش و درنتیجه بهبود انعطاف‌پذیری و استحکام کششی می‌گردد.

**4-2- ریزسختی**

در پاس‌های اول نورد، ریزسختی به‌شدت و سپس در پاس‌های بعدی با شیب کمتری افزایش می‌یابد. افزایش سختی در پاس های اول به کارسختی بر می‌گردد و سپس در پاس های بعدی به تشکیل دانه های فوق‌ریز مربوط می‌شود [57]. به‌دلیل تاثیر کم و پایدار بودن این دانه‌ها تغییرات سختی در پاس‌های پایانی در کامپوزیت‌های فلز-فلز ناچیز بود، اما در کامپوزیت‌های فلز- ذرات سرامیکی فرآوری شده، سختی روند افزایش خود را به دلایل زیر حفظ می‌کند و اشباع نمی‌شود. اثر تقویت‌کنندگی و تشکیل نابه‌جایی‌هایی ها در اطراف ذرات در پی مکانیزم اوروان کارسختی ایجاد می‌کند. همچنین تشکیل نابجایی‌های ضروری هندسی در زمینه و اطراف ذرات به‌دلیل عدم انطباق کرنش ذرات و زمینه، کارسختی بیشتری ایجاد می‌کند و نیز با بهبود توزیع ذرات در زمینه با افزایش پاس سختی روند افزایشی خود را حفظ می‌کند [9, 15, 18, 44, 58].

**4-3- شکل‌پذیری**

انعطاف‌پذیری در پاس های اولیه نورد، به‌دلیل مکانیزم‌های کارسختی و کاهش تحرک نابه‌جایی‌ها در اثر افزودن ذرات شدیدا کاهش می‌یابد [59]. دلیل دیگر تشکیل فصل مشترک‌های ضعیف بین لایه های آلومینیم و اتصالات ضعیف حاصل است. همچنین وجود ذرات به هم چسبیده، حفرات مابین ذرات و تجمع ذرات دلایل دیگر کاهش انعطاف‌پذیری است. حفرات مابین ذرات و فصل مشترک‌های ضعیف بین آلومینیم و تقویت‌کننده ها به‌عنوان مکان مناسب جوانه‌زنی ترک عمل می‌کند و به‌علت نزدیک بودن ذرات در تجمع ها و خوشه ها اشاعه ترک بسیار آسان می شود. با افزایش پاس های نورد، حذف خوشه‌ها، توزیع آن‌ها در زمینه آلومینیم، حذف حفرات، کاهش کسر عیوب در فصل مشترک، بهبود استحکام پیوند زمینه و تقویت‌کننده، حذف ساختار لایه‌ای و توزیع یکنواخت‌تر ذرات در زمینه، استحکام پیوند بهبود می یابد [60]. همچنین افزایش فاصله بین ذرات در اثر توزیع مناسب و یکنواخت ذرات در زمینه، مسیر لازم برای اشاعه ترک را افزایش می‌دهد [9, 15, 18, 44, 58].

**4-4- شکست نگاری**

در پاس های اولیه کامپوزیت فرآوری شده با روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مبتنی بر نورد، به علت اتصال ضعیف بین لایه‌های آلومینیم و تجمع ذرات در این فصل مشترک‌ها، شکست در همان نقاط اتفاق می‌افتد [15, 18].

در فصل مشترک‌ها به‌علت وجود مناطق فاقد اتصال مناسب با ذرات و خوشه‌هایی با فصل مشترک ضعیف با زمینه، موقعیت مناسبی برای جوانه‌زنی و اشاعه ترک هستند. با افزایش پاس‌های نورد، در اثر فشار نورد کیفیت اتصال لایه‌ها بهبود یافته و مناطق اتصال نیافته کاهش می‌یابد [18]. تصاویر میکروسکوپی عمدتا نشان‌دهنده شکست داکتیل برشی همراه با ایجاد حفرات میکرو، رشد و به هم پیوستن آن‌ها و شکست نهایی رشته‌ها در زمینه می‌باشد [18, 61]. حضور ذرات در مرکز حفرات نشان‌دهنده شروع ایجاد حفره از فصل مشترک ذره تقویت‌کننده و زمینه می‌باشد [62].

**5-4- مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات سرامیکی تولید شده به روش نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع**

آن‌چه باعث برتری خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده به روش نورد تجمعی متقاطع بر روش نورد تجمعی می‌باشد، پخش یکنواخت‌تر و خواص ریزساختاری بهتر در حضور ذرات تقویت‌کننده می‌باشد. مطابق جدول 1 و در همه‌ی تحقیقات پیشین، برتری در خواص مکانیکی برای فرآیند نورد تجمعی متقاطع بر نورد تجمعی ارائه شده است. در تحقیق علیزاده مقدار استحکام کششی نمونه‌ی تولید شده با نورد تجمعی متقاطع 1.1 برابر نمونه‌ی نورد تجمعی شده می‌باشد [6, 33, 63]. همچنین در این تحقیق، ازدیاد طول نمونه‌ی نورد تجمعی متقاطع هم بیشتر می‌باشد. در پژوهش ناصری و همکاران مقدار میکروسختی، استحکام کششی و ازدیاد طول برای نمونه‌ی تولید شده به روش نورد تجمعی متقاطع بیشتر گزارش شده است [45].

## 5- مکانیزم‌های حاکم

اصلاح دانه در طی فرآیندهای مبتنی بر نورد حاوی ذرات، به ذرات سخت سرامیکی نسبت داده شده است که می‌توانند اساس افزایش چگالی نابجایی‌ها باشند. در حالیکه آن‌ها می‌توانند منجر به افزایش نرخ تولید مرزدانه‌های بزرگ زاویه با کرنش شوند. دلایل افزایش چگالی نابجایی‌ها عبارتند از:

**5-1- تشکیل حلقه‌های اوروان**

در حین تغییر شکل، ذرات ریز و اصلاح شده با تشکیل حلقه‌ی اوروان می‌توانند عاملی برای افزایش نرخ تولید نابجایی‌ها باشد. در حقیقت، از آن‌جایی‌که ذرات استقامت کافی برای عبور در مقابل نابجایی‌ها را دارند در نتیجه حلقه‌ی اوروان می‌تواند تشکیل شود. حین فرآیند نورد تجمعی به سبب تغییر شکل پیوسته، شمار زیادی از حلقه‌ها اوروان تشکیل می‌شوند که نهایتا تنش‌ها موجب سیلان پلاستیک موضعی یا تنش پسماند در زمینه می‌شود [64].

**5-2- اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده**

به‌دلیل اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده‌ها، به‌سبب افزایش دما حین نورد، تنش‌های حرارتی در اطراف ذرات به اندازه کافی به‌وجود می‌آیند و موجب تغییر شکل پلاستیک در زمینه به‌خصوص در ناحیه فصل مشترک‌ها می‌شود. این تنش‌ها به‌سرعت با افزایش فاصله از مرزها کاهش می‌یابند که می‌توانند عیوب کوچکی مانند نابجایی‌ها را در اطراف ذرات تقویت‌کننده تولید کنند [65].

**5-3- ناسازگاری کرنشی**

طی فرآیند نورد تجمعی، نابجایی‌ها احتمالاً به دلیل ناسازگاری کرنشی[1] در فصل مشترک ذرات-زمینه تولید می‌شوند. درحقیقت حضور ذرات سخت باعث افزایش کرنش موضعی زمینه در مجاورت ذرات می‌شود که کارسختی در زمینه را نسبت به کامپوزیت بدون ذرات، تقویت می‌کند [66, 67].

**5-4- قفل شدن مرز دانه‌ها توسط ذرات تقویت کننده و ذرات فیلم اکسیدی**

بعد از اعمال چندین پاس فرآیند نورد تجمعی، تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد تعداد زیادی از فصل مشترک به‌وجود می‌آید. ذرات تقویت‌کننده و ذرات تشکیل‌شده‌ی فیلم اکسیدی روی سطح، به عنوان مانعی برای رشد دانه عمل می‌کنند. ذرات تقویت کننده و ذرات اکسیدی می‌توانند مانعی برای حرکت و افزایش نابه‌جایی‌ها باشند [67].

**5-5- تغییر شکل‌های برشی شدید**

اصطکاک مابین ورق‌ها و غلتک (در شرایط بدون روان‌کننده) موجب ایجاد تغییر شکل‌های برشی شدید می‌شوند. همین امر عاملی ترغیب‌کننده برای ریز دانه شدن ریزساختار می‌شود. با تکرار این فرآیند مناطق تغییر شکل یافته‌ی شدید به قسمت‌های داخلی منتقل می‌شوند.

**جدول 1** مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه تقویت‌شده با ذرات سرامیکی تولید شده با فرآیندهای نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع

**Table 1** Comparison of mechanical properties of the multilayered ARBed and CARBed composite reinforced by ceramics particles

| ماده | تعداد پاس | کرنش معادل | (نورد تجمعی/متقاطع) | درصد حجمی پودر | اندازه متوسط پودر (μm) | استحکام کششی نهایی (MPa) | ازدیاد طول (%) | میکروسختی (VHN) | مرجع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آلومینیم/کاربیدبور | 8 | 6.4 | متقاطع | 8% | 3 | ~360 | ** | ~89 | [33] |
| آلومینیم/کاربیدبور | 8 | 6.4 | نورد تجمعی | 8% | 3 | ~325 | ** | ** | [63] |
| آلومینیم خالص | 8 | 6.4 | متقاطع | 0 | ** | ~280 | ** | ~75 | [63] |
| آلومینیم/کاربیدبور/کاربیدسیلیسیوم | 8 | 6.4 | متقاطع | 2%-2% | < 50 | 280 | 10.9 | 100 | [45] |
| آلومینیم/کاربیدبور/کاربیدسیلیسیوم | 8 | 6.4 | نورد تجمعی | 2%-2% | < 50 | 240 | 9.1 | 84 | [45] |
| آلومینیم/آلومینا | 8 | 6.4 | ریخته‌گری و متقاطع | 2% | < 0.1 | 344 | 6.4 | ** | [68] |
| آلومینیم/سیلیسیوم کاربید | 8 | 6.4 | کامپوکستینگ و متقاطع | 2% | < 0.1 | 354 | 6.9 | ** | [69] |
| آلومینیم/آلومینا | 8 | 6.4 | متقاطع | 15% | 3 | ~275 | ** | ~90 | [10] |
| آلومینیم/آلومینا | 8 | 6.4 | نورد تجمعی | 15% | 3 | ~245 | ** | ~85 | [10] |

[1] strain in compatibility

## 6- نتیجه‌گیری

با پیشرفت تکنولوژی و افزایش نیاز صنایع به مواد با خواص چندگانه و مختلف به‌صورت همزمان، سبب پیدایش و گسترش کامپوزیت‌ها شده است. در سال‌های اخیر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه نورد جهت تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی مورد توجه محققین گرفته‌اند. این روش‌ها نسبت به دیگر روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی مانند روش‌های ریخته‌گری و متالورژی پودر از معایب ریزساختاری کمتری برخوردار می‌باشند و این عامل باعث بهبود در خواص مکانیکی، برتری و افزایش توجه به روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید شده است. در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، با ترک خوردن لایه‌ها، اجتماع پودرها و بیرون ریختن فلز از بین ذرات، اتصال برقرار می‌شود. در پاس‌های ابتدایی به علت تجمع و عدم توزیع مناسب ذرات، اتصال بین لایه‌ها ضعیف است و حفرات، خوشه‌ها و مناطق عاری از ذرات تقویت‌کننده وجود دارد. اما با افزایش کرنش اعمالی فلز از بین ترک‌ها بیرون زده و ذرات را منتقل و توزیع می‌کند و نیز با برش و نورد مجدد ذرات در راستای عمودی توزیع می‌شوند که باعث پخش همگن و یکنواخت ذرات می‌شود. همچنین، در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، به‌دلیل عدم محدودیت در کرنش اعمالی، نمونه‌های کامپوزیتی با ساختار فوق ریزدانه و حتی نانوساختار تولید شده است که سبب دستیابی به خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب‌تر می‌شود. دو فرآیند نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع، با افزایش کرنش اعمالی، پخش ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیم با توزیع یکنواخت‌تر صورت می‌گیرد. همچنین با افزایش پاس، از میزان تخلخل و ذرات خوشه‌ای به‌شدت کاسته می‌شود. البته کامپوزیت‌های فرآوری‌شده با فرآیند نورد تجمعی متقاطع به دلیل یکنواختی و همگنی بهتر در پخش ذرات تقویت‌کننده و همچنین انجام عملیات نورد در دو جهت، نسبت به فرآیند نورد تجمعی دارای خواص ریزساختاری و مکانیکی بهتری می‌باشند. یکی از نقاط ضعف در این فرآیندها، کاهش شدید انعطاف پذیری در سیکل ابتدایی می‌باشد که با افزایش کرنش اعمالی، کاهش اندازه دانه و توزیع یکنواخت ذرات در سیکل‌های انتهایی بهبود می‌یابد. همچنین در پاس‌های نهایی فرآیندها در اثر فشار نورد، کیفیت اتصال لایه‌ها بهبود یافته و مناطق اتصال نیافته کاهش می‌یابد و سطح مقطع شکست عمدتا از نوع داکتیل برشی می‌باشد. مهم‌ترین مکانیزم‌های حاکم در فرآیند نورد تجمعی و نورد تجمعی متقاطع، کرنش سختی (پاس‌های ابتدایی) و اصلاح دانه‌ها (پاس‌های انتهایی) می‌باشند.

## 7- مراجع


[1] Alizadeh, M., "Processing of Al/B 4 C Composites by Cross-Roll Accumulative Roll Bonding" Materials Letters, Vol. 64, No. 23, pp. 2641-2643, 2010.

[2] Naseri, M., Hassani, A. and Tajally, M., "An Alternative Method for Manufacturing Al/B 4 C/Sic Hybrid Composite Strips by Cross Accumulative Roll Bonding (Carb) Process" Ceramics International, Vol. 41, No. 10, pp. 13461-13469, 2015.

[3] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaee, T., "Experimental Evaluation of the Plane Stress Fracture Toughness for Ultra-Fine Grained Aluminum Specimens Prepared by Accumulative Roll Bonding Process" Materials Science and Engineering: A.

[4] Gopalakrishnan, S. and Murugan, N., "Prediction of Tensile Strength of Friction Stir Welded Aluminium Matrix Tic P Particulate Reinforced Composite" Materials & Design, Vol. 32, No. 1, pp. 462-467, 2011.

[5] Abdizadeh, H. and Baghchesara, M. A., "Investigation on Mechanical Properties and Fracture Behavior of A356 Aluminum Alloy Based Zro 2 Particle Reinforced Metal-Matrix Composites" Ceramics International, Vol. 39, No. 2, pp. 2045-2050, 2013.

[6] Alizadeh, M. and Paydar, M., "High-Strength Nanostructured Al/B 4 C Composite Processed by Cross-Roll Accumulative Roll Bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 538, pp. 14-19, 2012.

[7] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental Investigation of Formability of Aluminum Sheets Produced by Cold Roll Bonding Process Used Nakazima test, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 451-454, 2017.

[8] Alizadeh, M. and Paydar, M., "Fabrication of Nanostructure Al/Sic P Composite by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" Journal of Alloys and Compounds, Vol. 492, No. 1, pp. 231-235, 2010.

[9] Hashemi, M., Jamaati, R. and Toroghinejad, M. R., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Sio 2 Composite Produced by Car Process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 532, pp. 275-281, 2012.

[10] Alizadeh, M. and Salahinejad, E., "A Comparative Study on Metal–Matrix Composites Fabricated by Conventional and Cross Accumulative Roll-Bonding Processes" Journal of Alloys and Compounds, Vol. 620, pp. 180-184, 2015.

[11] Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N. and Sakai, T., "Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials—Development of the Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" Acta materialia, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.

[12] Jamaati, R. and Toroghinejad, M. R., "Manufacturing of High-Strength Aluminum/Alumina Composite by Accumulative Roll Bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 16, pp. 4146-4151, 2010.

[13] Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T. and Hong, R., "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" Scripta materialia, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.

[14] Kitazono, K., Sato, E. and Kuribayashi, K., "Novel Manufacturing Process of Closed-Cell Aluminum Foam by Accumulative Roll-Bonding" Scripta Materialia, Vol. 50, No. 4, pp. 495-498, 2//, 2004.

[15] Hosseini, M., Yazdani, A. and Manesh, H. D., "Al 5083/Sic P Composites Produced by Continual Annealing and Roll-Bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 585, pp. 415-421, 2013.

[16] Alizadeh, M., "Comparison of Nanostructured Al/B 4 C Composite Produced by Arb and Al/B 4 C Composite Produced by Rrb Process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 2, pp. 578-582, 2010.

[17] Amirkhanlou, S., Ketabchi, M., Parvin, N., Khorsand, S. and Bahrami, R., "Accumulative Press Bonding; a Novel Manufacturing Process of Nanostructured Metal Matrix Composites" Materials & Design, Vol. 51, pp. 367-374, 10//, 2013.

[18] Toroghinejad, M. R., Jamaati, R., Nooryan, A. and Edris, H., "Hybrid Composites Produced by Anodizing and Accumulative Roll Bonding (Arb) Processes" Ceramics International, Vol. 40, No. 7, Part A, pp. 10027-10035, 8//, 2014.

[19] Akbari beni, H., Alizadeh, M., Ghaffari, M. and Amini, R., "Investigation of Grain Refinement in Al/Al2o3/B4c Nano-Composite Produced by Arb" Composites Part B: Engineering, Vol. 58, pp. 438-442, 3//, 2014.

[20] Ahmadi, A., Toroghinejad, M. R. and Najafizadeh, A., "Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Al/Al2o3/Sic Hybrid Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding Process" Materials & Design, Vol. 53, pp. 13-19, 1//, 2014.

[21] Reihanian, M., Hadadian, F. K. and Paydar, M. H., "Fabrication of Al–2 Vol% Al2o3/Sic Hybrid Composite Via Accumulative Roll Bonding (Arb): An Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties" Materials Science and Engineering: A, Vol. 607, pp. 188-196, 6/23/, 2014.

[22] Naseri, M., Hassani, A. and Tajally, M., "Fabrication and Characterization of Hybrid Composite Strips with Homogeneously Dispersed Ceramic Particles by Severe Plastic Deformation" Ceramics International, Vol. 41, No. 3, pp. 3952-3960, 2015.

[23] Farajzadeh Dehkordi, H., Toroghinejad, M. R. and Raeissi, K., "Fabrication of Al/Al2o3/Tic Hybrid Composite by Anodizing and Accumulative Roll Bonding Processes and Investigation of Its Microstructure and Mechanical Properties" Materials Science and Engineering: A, Vol. 585, pp. 460-467, 11/15/, 2013.

Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding“ Composites Part B: Engineering, Vol. 77, pp. 84-92, 2015.
[45] Naseri, M., Hassani, A. and Tajally, M., “An Alternative Method for Manufacturing Al/B4c/Sic Hybrid Composite Strips by Cross Accumulative Roll Bonding (Carb) Process“ Ceramics International, Vol. 41, No. 10, Part A, pp. 13461-13469, 2015/12/01/, 2015.
[46] Jamaati, R., Naseri, M. and Toroghinejad, M. R., “Wear Behavior of Nanostructured Al/Al2o3 Composite Fabricated Via Accumulative Roll Bonding (Arb) Process“ Materials & Design, Vol. 59, pp. 540-549, 7//, 2014.
[47] Jamaati, R., Amirkhanlou, S., Toroghinejad, M. R. and Niroumand, B., “Comparison of the Microstructure and Mechanical Properties of as-Cast A356/Sic Mmc Processed by Arb and Car Methods“ Journal of materials engineering and performance, Vol. 21, No. 7, pp. 1249-1253, 2012.
[48] Dehkordi, H. F., Toroghinejad, M. R. and Raeissi, K., “Fabrication of Al/Al 2 O 3/Tic Hybrid Composite by Anodizing and Accumulative Roll Bonding Processes and Investigation of Its Microstructure and Mechanical Properties“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 585, pp. 460-467, 2013.
[49] Jamaati, R., Amirkhanlou, S., Toroghinejad, M. R. and Niroumand, B., “Effect of Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of Composites Produced by Arb Process“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 4, pp. 2143-2148, 2011.
[50] Shamanian, M., Mohammadnezhad, M., Asgari, H. and Szpunar, J., “Fabrication and Characterization of Al–Al2o3–Zrc Composite Produced by Accumulative Roll Bonding (Arb) Process“ Journal of Alloys and Compounds, Vol. 618, pp. 19-26, 1/5/, 2015.
[51] Christman, T., Needleman, A. and Suresh, S., “An Experimental and Numerical Study of Deformation in Metal-Ceramic Composites“ Acta Metallurgica, Vol. 37, No. 11, pp. 3029-3050, 1989.
[52] Reihanian, M., Bagherpour, E. and Paydar, M., “Particle Distribution in Metal Matrix Composites Fabricated by Accumulative Roll Bonding“ Materials Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 103-108, 2012.
[53] Reihanian, M., Bagherpour, E. and Paydar, M., “On the Achievement of Uniform Particle Distribution in Metal Matrix Composites Fabricated by Accumulative Roll Bonding“ Materials Letters, Vol. 91, pp. 59-62, 2013.
[54] Mehr, V. Y., Rezaeian, A. and Toroghinejad, M. R., “Application of Accumulative Roll Bonding and Anodizing Process to Produce Al–Cu–Al 2 O 3 Composite“ Materials & Design, Vol. 70, pp. 53-59, 2015.
[55] Mahdavian, M. M., Ghalandari, L. and Reihanian, M., “Accumulative Roll Bonding of Multilayered Cu/Zn/Al: An Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 579, pp. 99-107, 9/1/, 2013.
[56] Shabani, A., Toroghinejad, M. R. and Shafyei, A., “Fabrication of Al/Ni/Cu Composite by Accumulative Roll Bonding and Electroplating Processes and Investigation of Its Microstructure and Mechanical Properties“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 558, pp. 386-393, 12/15/, 2012.
[57] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental Investigation of Fracture Surfaces and Mechanical Properties of AA1050 Aluminum Produced by Aaccumulative Roll Bonding Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016.
[58] Rezayat, M., Akbarzadeh, A. and Owhadi, A., “Production of High Strength Al–Al 2 O 3 Composite by Accumulative Roll Bonding“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 43, No. 2, pp. 261-267, 2012.
[59] D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, Experimental Investigation of Plane Stress Fracture Toughness for Al/Cu/Al Multilayer Produced by Cold Roll Bonding Process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017.
[60] D. Rahmatabadi, R. H., “Experimental Evaluation of Forming Limit Diagram and Mechanical Properties of Nano/Ultra-Fine Grained Al Strips Fabricated by Accumulative Roll Bonding Process“ International Journal of Materials Research, 2017.
[61] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experimental Investigation of Plane Stress Fracture Toughness for Two Layers of Aluminum Sheets Produced by Cold Roll Bonding Process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 101-108, 2017.
[24] Baker, A. A. B., “Composite Materials for Aircraft Structures“, AIAA, 2004.
[25] Chawla, N. and Chawla, K., “Metal-Matrix Composites in Ground Transportation“ JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 58, No. 11, pp. 67-70, 2006.
[26] Torralba, J. M., da Costa, C. E. and Velasco, F., “P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview“ Journal of Materials Processing Technology, Vol. 133, No. 1, pp. 203-206, 2003/02/01/, 2003.
[27] Shingu, P., Ishihara, K., Otsuki, A. and Daigo, I., “Nano-Scaled Multi-Layered Bulk Materials Manufactured by Repeated Pressing and Rolling in the Cu–Fe System“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 304, pp. 399-402, 2001.
[28] Movchan, B. and Lemkey, F., “Mechanical Properties of Fine-Crystalline Two-Phase Materials“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 224, No. 1, pp. 136-145, 1997.
[29] Pirgazi, H., Akbarzadeh, A., Petrov, R. and Kestens, L., “Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Aa1100 Aluminum Sheet Processed by Accumulative Roll Bonding“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 497, No. 1, pp. 132-138, 2008.
[30] Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. and Alexandrov, I. V., “Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation“ Progress in materials science, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
[31] Segal, V., “Materials Processing by Simple Shear“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 197, No. 2, pp. 157-164, 1995.
[32] Tsuji, N., Saito, Y., Lee, S. H. and Minamino, Y., “Arb (Accumulative Roll-Bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials“ Advanced Engineering Materials, Vol. 5, No. 5, pp. 338-344, 2003.
[33] Alizadeh, M., “Processing of Al/B4c Composites by Cross-Roll Accumulative Roll Bonding“ Materials Letters, Vol. 64, No. 23, pp. 2641-2643, 12/15/, 2010.
[34] Amirkhanlou, S., Ketabchi, M., Parvin, N., Askarian, M. and Carreño, F., “Achieving Ultrafine Grained and Homogeneous Aa1050/Zno Nanocomposite with Well-Developed High Angle Grain Boundaries through Accumulative Press Bonding“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 627, pp. 374-380, 3/11/, 2015.
[35] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, Investigation of Mechanical Properties, Fracturgeraphi and Microstructure of Layered Al/Cu Composite Produced by Cold Roll Bonding, journal of science and technology of composites, 2017.
[36] Jamaati, R. and Toroghinejad, M., “Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review“ Materials Science and Technology, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
[37] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, B. Eghbali, Investigation of Mechanical Properties and Microstructure for Al/Cu/SiC Composite Produced by Cross Accumulative Roll Bonding Process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 180-184, 2017
[38] Ruppert, M., Höppel, H. W. and Göken, M., “Influence of Cross-Rolling on the Mechanical Properties of an Accumulative Roll Bonded Aluminum Alloy Aa6014“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 597, pp. 122-127, 2014.
[39] Dehsorkhi, R. N., Qods, F. and Tajally, M., “Application of Continual Annealing and Roll Bonding (Car) Process for Manufacturing Al–Zn Multilayered Composites“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 549, pp. 206-212, 7/15/, 2012.
[40] Hosseini, M., Yazdani, A. and Danesh Manesh, H., “Al 5083/Sicp Composites Produced by Continual Annealing and Roll-Bonding“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 585, pp. 415-421, 11/15/, 2013.
[41] Amirkhanlou, S., Askarian, M., Ketabchi, M., Azimi, N., Parvin, N. and Carreño, F., “Gradual Formation of Nano/Ultrafine Structure under Accumulative Press Bonding (Apb) Process“ Materials Characterization, Vol. 109, pp. 57-65, 11//, 2015.
[42] Amirkhanlou, S., Ketabchi, M., Parvin, N., Orozco-Caballero, A. and Carreño, F., “Homogeneous and Ultrafine-Grained Metal Matrix Nanocomposite Achieved by Accumulative Press Bonding as a Novel Severe Plastic Deformation Process“ Scripta Materialia, Vol. 100, pp. 40-43, 4/15/, 2015.
[43] Jamaati, R. and Toroghinejad, M. R., “Fabrication of Mmc Strip by Crb Process“ Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, No. 6, pp. 859-864, June 01, 2012.
[44] Jafarian, H., Habibi-Livar, J. and Razavi, S. H., “Microstructure Evolution and Mechanical Properties in Ultrafine Grained Al/Tic

[62] Naseri, M., Hassani, A. and Tajally, M., "Fabrication and Characterization of Hybrid Composite Strips with Homogeneously Dispersed Ceramic Particles by Severe Plastic Deformation" Ceramics International, Vol. 41, No. 3, Part A, pp. 3952-3960, 2015/04/01/, 2015.
[63] Alizadeh, M. and Paydar, M. H., "High-Strength Nanostructured Al/B4c Composite Processed by Cross-Roll Accumulative Roll Bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 538, pp. 14-19, 3/15/, 2012.
[64] Apps, P., Berta, M. and Prangnell, P., "The Effect of Dispersoids on the Grain Refinement Mechanisms During Deformation of Aluminium Alloys to Ultra-High Strains" Acta materialia, Vol. 53, No. 2, pp. 499-511, 2005.
[65] Zhang, Z. and Chen, D., "Consideration of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A Model for Predicting Their Yield Strength" Scripta Materialia, Vol. 54, No. 7, pp. 1321-1326, 2006.
[66] Alizadeh, M., Ghaffari, M. and Amini, R., "Properties of High Specific Strength Al–4wt.% Al 2 O 3/B 4 C Nano-Composite Produced by Accumulative Roll Bonding Process" Materials & Design, Vol. 50, pp. 427-432, 2013.
[67] Toroghinejad, M. R., Jamaati, R., Hoseini, M., Szpunar, J. A. and Dutkiewicz, J., "Texture Evolution of Nanostructured Aluminum/Copper Composite Produced by the Accumulative Roll Bonding and Folding Process" Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 44, No. 3, pp. 1587-1598, 2013.
[68] Ardakani, M. R. K., Amirkhanlou, S. and Khorsand, S., "Cross Accumulative Roll Bonding—a Novel Mechanical Technique for Significant Improvement of Stir-Cast Al/Al2o3 Nanocomposite Properties" Materials Science and Engineering: A, Vol. 591, pp. 144-149, 1/3/, 2014.
[69] Kamali Ardakani, M. R., Khorsand, S., Amirkhanlou, S. and Javad Nayyeri, M., "Application of Compocasting and Cross Accumulative Roll Bonding Processes for Manufacturing High-Strength, Highly Uniform and Ultra-Fine Structured Al/Sicp Nanocomposite" Materials Science and Engineering: A, Vol. 592, pp. 121-127, 1/13/, 2014.