



مروری بر خواص مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی، تولید شده با فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید

مسلم طیبی¹، داود رحمت آبادی²، 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

چکیده

اطلاعات مقاله

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 تقریباً 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 فراوری شده با استفاده از فرآیندهای برپایه نورد، تشکیل حلقه‌ی اوروان، نقش ذرات تقویت‌کننده، اختلاف در ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده و غیره می‌باشد.

تاریخ دریافت: 96/8/15

تاریخ پذیرش: 96/10/26

کلیدواژگان:

کامپوزیت زمینه فلزی
تعبیر شکل پلاستیک
ذرات تقویت‌کننده
خواص مکانیکی و ریزساختاری
مکانیزم‌های حاکم

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

Moslem Tayyebi¹, Davood Rahmatbadi², 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. Rahmatbadi, 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

سرامیکی انجام شده که اکثراً از ذرات Al_2O_3 - B_4C [19, 18]، Al_2O_3 - SiC [20, 21]، B_4C - SiC [22] و غیره استفاده شده است [23]. در پژوهش حاضر، روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی 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 ریزساختاری، 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**1-2- ریخته‌گری همزدنی⁸**

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 به دلیل حبس گاز، تنش برشی پایین به دلیل 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 کوبشی⁹

در روش ریخته‌گری کوبشی نیرو مستقیماً 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 به این روش عیوب ریخته‌گری معمول مانند تخلخل و حفره‌های انقباضی را ندارند. در ریخته‌گری کوبشی، به‌منظور انجام صحیح فرآیند بایستی فلز مذاب دارای ویسکوزیته نسبتاً 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].

3-2- کامپوکستینگ¹⁰

زمانی که یک مذاب در دمای ما بین لیکوییدوس و سالییدوس 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

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی¹ 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 هیبریدی² دسته‌ای از مواد متشکل از دو نوع ذرات تقویت‌کننده می‌باشند که اخیراً ساخت آن‌ها با روش‌های جدید مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [2, 7]. به‌منظور ساخت کامپوزیت-های زمینه آلومینیومی 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 آلومینیومی، توزیع غیر یکنواخت 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 اخیر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید³ به‌خصوص فرآیند نورد تجمعی⁴ 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 یکسان⁵، تغییر شکل پیچشی با فشار بالا⁶ فشردن و اکستروژن پاسی⁷ 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 آلومینیومی مورد استفاده قرار می‌گیرند پوردهای 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 آلومینیومی حاوی ذرات سرامیکی استفاده کرد [17]. در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های فراوانی در زمینه ساخت و بررسی خواص‌های کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با دو یا چند تقویت‌کننده

⁷ Cyclic Extrusion Compression (CEC)⁸ Stir casting⁹ Squeeze casting¹⁰ Compocast¹ 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)

شکل پیچشی تحت فشار زیاد [30]، تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار [31]، فرآیند نورد جمعی [11, 32]، نورد جمعی متقاطع [33] و پرس جمعی [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 جمعی مهم‌ترین فرآیند می‌باشد که بیشتر از سایرین مورد توجه قرار گرفته است. البته فرآیندهای دیگر نظیر نورد جمعی متقاطع، نورد و آنیل متوالی و پرس جمعی مبتنی بر همین روش نورد جمعی ابداع شده که باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت‌های تولید شده در مقایسه با فرآیند نورد جمعی شده است. در ادامه به معرفی و بررسی بیشتر فرآیندهای مذکور پرداخته می‌شود.

2-6-1- فرآیند نورد جمعی

در سال 1998 سایتو و همکارانش در زمینه‌ی تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دستیابی به مواد فلزی ریزساختار فرآیند نورد جمعی را ابداع نمودند [11, 12, 32]. مهم‌ترین برتری فرآیند نورد جمعی نسبت به دیگر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق‌العاده ریزدانه و عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا می‌باشد که در نتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است [32]. از این روش به‌عنوان روشی جدید برای تولید مواد ریزدانه، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی، 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 (معمولاً بالای 50%) اعمال شده 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 نورد شده، 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]. کیتازونو³ در سال 2003 برای اولین بار از روش نورد جمعی 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 جمعی تکرار می‌شود.

2-6-2- فرآیند نورد جمعی متقاطع

یکی از روش‌های جدیدی که در ساخت مواد مرکب ریزدانه و حاوی ذرات تقویت‌کننده به کار می‌رود، روش نورد جمعی متقاطع⁴ است. اساس این روش مبتنی بر همان روش نورد جمعی می‌باشد و برای اولین بار در سال 2010، توسط علیزاده با تولید کامپوزیت آلومینیوم/کاربیدبور ابداع شد و پس از آن مورد توجه محققین قرار گرفت [16]. تنها تفاوت روش نورد جمعی متقاطع با روش نورد جمعی معمولی در نحوه‌ی تولید مواد مرکب لایه‌ای، چرخش حول محور

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 ویسکرها¹ 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 تقویت‌کننده 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. می‌توان 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 آلیاژی شده نسبت به پودر فلزات در متالورژی پودر، دارای هزینه‌ی بیشتر و یکنواختی بهتر در ریزساختار است [26].

2-5- رسوب اسپری²

در این روش از یک تنگ اسپری برای اتمیزه کردن زمینه آلیاژ آلومینیوم مذاب همراه با ذرات سرامیکی مانند کاربیدسیلیسیم 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 کاملاً 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 روش‌های 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 به فرد 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 به راحتی 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، در حالی که 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

¹ Whisker

² Spray forming

³ Kitazono

⁴ Cross accumulative roll bonding (CARB)

این اثر سیلان برشی³ 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، به علت 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 آلومینیومی در اطراف تقویت‌کننده باعث بهبود اتصال فصل مشترک زمینه و ذرات تقویت‌کننده می‌شود [2, 18].

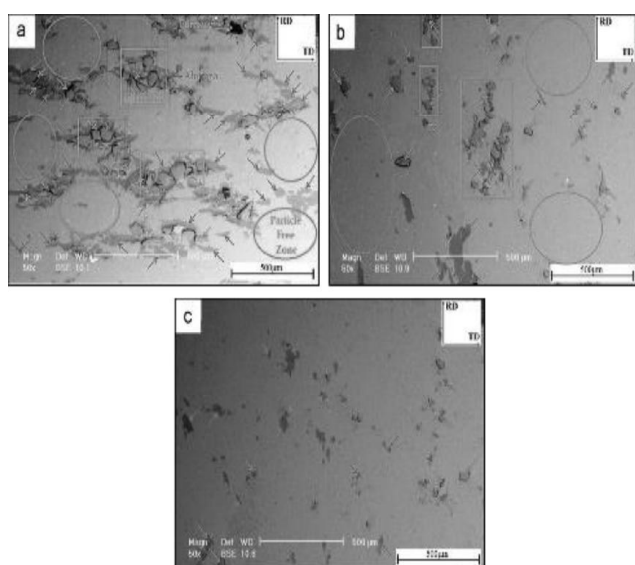


Fig. 1 SEM micrographs of the Al/B4C/Al₂O₃ composites after different ARB cycle: (a) first, (b) fifth and (c) tenth [18]

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 سهم 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 لایه‌های

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 نهایتاً دست‌یابی به ماده خواص مکانیکی و ریزساختار بهتر اشاره کرد [38].

2-6-3 فرآیند نورد و آنیل متوالی¹

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 لایه‌ها 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. مهم‌ترین 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، روی هم 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 [41] Al-WC، [34] Al-ZnO، [42] Al-SiC 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 و اندروال² 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 آلومینیومی 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 به هم چسبیده ذرات مشاهده می‌شود. با توجه به نظریه فیلم، در ترک‌هایی که در سطح و لایه‌لای پودرها ایجاد شده، ذرات آلومینیومی از بین ترک‌های سطحی و خوشه‌های ذرات، سیلان یافته و به بیرون اکستروود می‌شود. در این حالت زمینه آلومینیومی 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 آلومینیومی می‌تواند به آسانی در اطراف ذرات سیلان یابد که

³ shear flow effect

¹ Continual Annealing and Roll-bonding (CAR)

² van der Waals

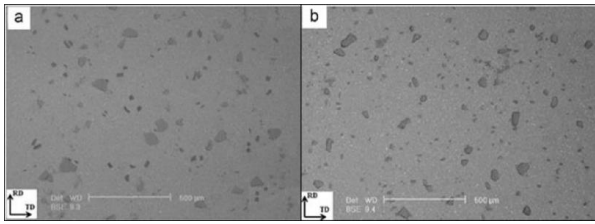


Fig. 2 Comparison of the distribution of particles in produced composite by: (a) ARB and (b) CARB process [2]

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 هر چه 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. به سبب 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 فرآوری شده در این روش وجود دارد که به دلیل آنیل قبل از هر مرحله، توزیع بهتر ذرات و حذف خوشه‌ها در فرآیند می‌باشد. خوشه‌ها به دلیل تجمع ذرات مکان مناسبی برای جوانه‌زنی و رشد ترک هستند، اما با توزیع آن‌ها در زمینه فاصله اشاعه ترک افزایش می‌یابد. مقدار تخلخل‌ها نیز به دلیل 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].

3-4- 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 می‌رسد. 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 آگلومره‌ها، کوچک شدن اندازه Si و 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

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

2- اکسترودن آلومینیم از میان خوشه‌های ذرات تقویت‌کننده: تحت فشار عمودی نورد، زمینه آلومینیم در بین خوشه‌های ذرات تقویت‌کننده جریان و اکسترود می‌شود که نتیجه 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 تقریباً 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 کاملاً یکسان می‌باشد، ولی در فرآیند نورد تجمعی متقاطع به دلیل 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.

3-2- 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 نظر گرفته می‌شود. بنابراین در فرآوری کامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده به روش نورد تجمعی مکانیزم‌های توزیع ذرات در زمینه آلومینیمی صرفاً در جهات ND و RD وارد عمل شده و از توزیع ذرات در جهت TD صرف‌نظر می‌شود. در طی فرآیند نورد تجمعی متقاطع به علت 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 در نمونه 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 در تمامی 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].

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

1-4- عوامل تاثیر گذار در بهبود خواص مکانیکی

1-1-4- کارسختی و ریزدانه شدن

سایتو و همکارانش گزارش کردند که تغییرات استحکام کششی فلزات تولید شده به روش نورد تجمعی به دلیل 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 به دلیل اصلاح دانه‌ها به دست می‌آید [13]. هنگامی که اثر کارسختی کاهش می‌یابد، بهبود تدریجی ریزدانه‌ها نقش اصلی استحکام بخشی را بازی می‌کند [45].

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

افزایش استحکام را با افزایش تعداد پاس ARB می‌توان به توزیع همگن تقویت‌کننده‌ها در زمینه آلومینیومی 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 مرحله 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 به صورت تغییرشکل پلاستیک، تغییر شکل می‌یابند، ناسازگاری 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.

1-1-4-3- تخلخل

حضور تخلخل به خصوص 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 غالباً به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت به کار 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 به سبب 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 به خصوص در گوشه‌های تیز تقویت‌کننده‌ها که نواحی با تنش بالا می‌باشند اشاره کرد [8, 51]. به طور کلی بالا رفتن ناسازگاری پلاستیک بین فصل مشترک ذرات-زمینه موجب به وجود 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

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 3.1 و 1.59 برابر بیشتر از نمونه کامپوزیت ریخته‌گی است [47]. استحکام نمونه نورد تجمعی شده بیشتر از نمونه‌ی ریخته‌گی اصلاح شده به روش نورد و آنیل پیوسته است و در نمونه CAR به دلیل آنیل قبل از هر پاس نورد، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است. به همین 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].

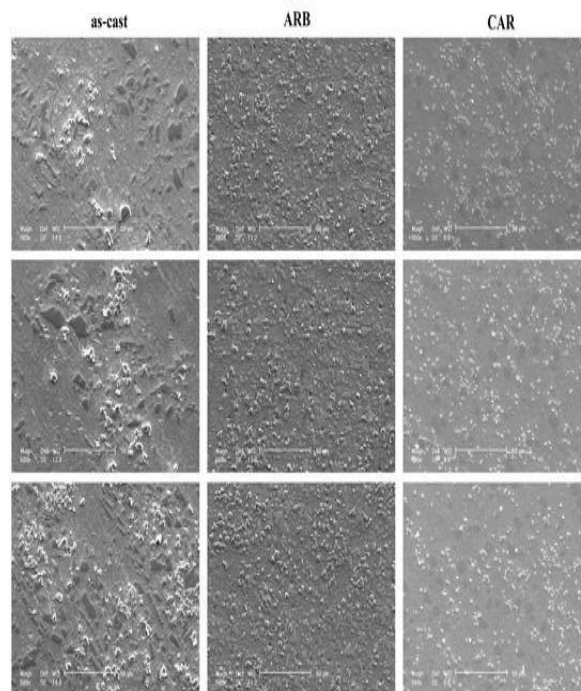


Fig. 3 Distribution of particles in produced composite by: (a) as-cast and modified by (b) ARB and (c) CAR processes [47]

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

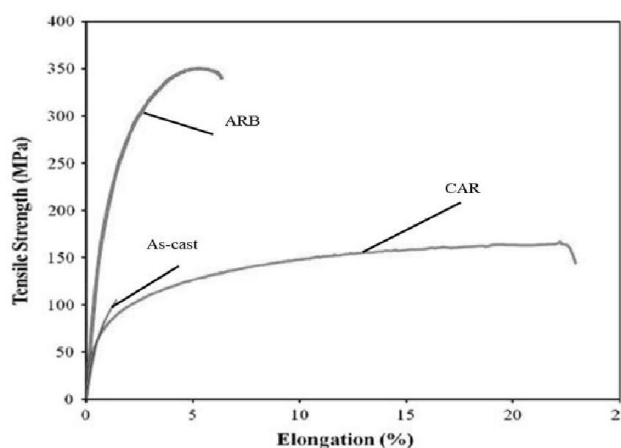


Fig. 4 comparison of stress-strain curves of Al-SiC produced as-cast and modified by ARB and CAR processes [47]

شکل 4 مقایسه منحنی‌های تنش کرنش در کامپوزیت Al-SiC ریخته‌گی و ریخته‌گی اصلاح شده با فرآیندهای ARB و CAR [47]

هنگام نورد، افزایش دما به سبب تغییر شکل پلاستیک در نمونه ایجاد می‌شود و زمانی که نمونه بعد از نورد سرد می‌شود به علت اختلاف در ضریب انبساط حرارتی ذره و فلز، تنش‌های حرارتی در فصل مشترک‌ها به وجود می‌آید و نابعایی‌ها 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. هنگامی که تعداد پاس‌های نورد تجمعی افزایش می‌یابد، پیوند بین فصل مشترک‌های فلز/ذره قوی‌تر شده که این نیز به دلیل فشار ناشی از غلتک‌های نورد می‌باشد و نتیجتاً 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 در نتیجه بهبود انعطاف‌پذیری و استحکام کششی می‌گردد.

4-2- ریزسختی

در پاس‌های اول نورد، ریزسختی به شدت و سپس در پاس‌های بعدی با شیب کمتری افزایش می‌یابد. افزایش سختی در پاس‌های اول به کارسختی بر می‌گردد و سپس در پاس‌های بعدی به تشکیل دانه‌های فوق‌ریز مربوط می‌شود [57]. به دلیل 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 اشیاع نمی‌شود. اثر تقویت‌کنندگی و تشکیل نابعایی‌هایی‌ها در اطراف ذرات در پی مکانیزم اوروان کارسختی ایجاد می‌کند. همچنین تشکیل نابعایی‌های ضروری هندسی در زمینه و اطراف ذرات به دلیل 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 پاس‌های اولیه نورد، به دلیل مکانیزم‌های کارسختی و کاهش تحرک نابعایی‌ها در اثر افزودن ذرات شدیداً کاهش می‌یابد [59]. دلیل دیگر تشکیل فصل مشترک‌های ضعیف بین لایه‌های 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 تقویت‌کننده‌ها به عنوان مکان مناسب جوانه‌زنی ترک عمل می‌کند و به علت نزدیک بودن ذرات در تجمع‌ها و خوشه‌ها اشاعه ترک بسیار آسان می‌شود. با افزایش پاس‌های 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 می‌یابد [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 پاس‌های 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].

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].

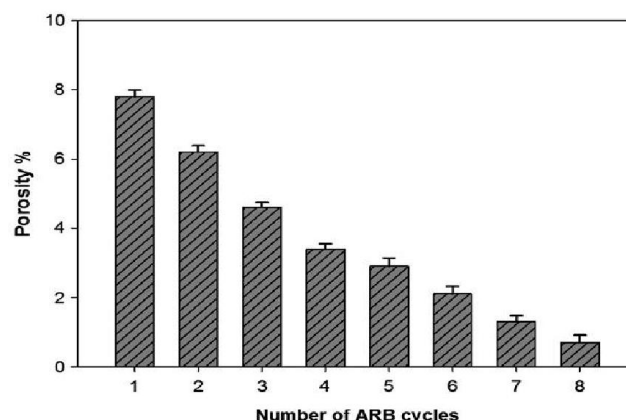


Fig. 5 Porosity of produced composite by ARB process according to the number of pass

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

4-1-4- اندازه و کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده

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 ذرات ریز، فصل مشترک‌های ذره/فلز بیشتری ایجاد می‌کنند، بنابراین ترک‌ها زودتر می‌توانند به یکدیگر پیوندند 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 دست‌یابی 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 تقویت‌کننده

توزیع ذرات تقویت‌کننده نقش مهمی بر استحکام و ازدیاد طول کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی حاوی ذرات دارد. هنگامی که تعداد پاس‌های نورد افزایش می‌یابد، توزیع ذرات در کامپوزیت یکنواخت‌تر شده و به سبب 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 به دست 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 تقویت‌کننده

در فصل مشترک‌ها به علت وجود مناطق فاقد اتصال مناسب با ذرات و خوشه-هایی 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 عمدتاً 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].

5-2- اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده

به دلیل اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده‌ها، به سبب افزایش دما حین نورد، تنش‌های حرارتی در اطراف ذرات به اندازه کافی به وجود می‌آیند و موجب تغییر شکل پلاستیک در زمینه به‌خصوص در ناحیه فصل مشترک‌ها می‌شود. این تنش‌ها به سرعت 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 جمعی، نابجایی‌ها احتمالاً به دلیل ناسازگاری کرنشی¹ 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 تقویت‌کننده و ذرات فیلم اکسیدی

بعد از اعمال چندین پاس فرآیند نورد جمعی، تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد تعداد زیادی از فصل مشترک به وجود می‌آید. ذرات تقویت‌کننده و ذرات تشکیل‌دهنده فیلم اکسیدی روی سطح، به عنوان مانعی برای رشد دانه عمل می‌کنند. ذرات تقویت‌کننده و ذرات اکسیدی می‌توانند مانعی برای حرکت و افزایش نابجایی‌ها 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.

4-5- مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات سرامیکی

تولید شده به روش نورد جمعی و نورد جمعی متقاطع

آنچه باعث برتری خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده به روش نورد جمعی متقاطع بر روش نورد جمعی 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 جمعی متقاطع بر نورد جمعی ارائه شده است. در تحقیق علیزاده مقدار استحکام کششی نمونه‌ی تولید شده با نورد جمعی متقاطع 1.1 برابر نمونه‌ی نورد جمعی شده می‌باشد [6, 33, 63]. همچنین در این تحقیق، ازدیاد طول نمونه‌ی نورد جمعی متقاطع هم بیشتر می‌باشد. در پژوهش ناصری و همکاران مقدار میکروسختی، استحکام کششی و ازدیاد طول برای نمونه‌ی تولید شده به روش نورد جمعی 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:

1-5- 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 آن جایی که ذرات

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

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

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

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، به دلیل عدم محدودیت در کرنش اعمالی، نمونه‌های کامپوزیتی با ساختار فوق ریزدانه و حتی نانو ساختار 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 به شدت کاسته می‌شود. البته کامپوزیت‌های فرآوری شده 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 عمدتاً 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

- [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, 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 Najafzadeh, 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.
- [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 Shojaei, 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

- 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., Amirkanlou, 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 Raieisi, K., "Fabrication of Al/Al₂O₃ 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., Amirkanlou, 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-Al₂O₃ 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 Shafeyi, 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 Accumulative Roll Bonding Process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016.
- [58] Rezaayat, M., Akbarzadeh, A. and Owjadi, A., "Production of High Strength Al-Al₂O₃ 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 Aal100 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] Amirkanlou, 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, Fracturgraphi 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] Amirkanlou, 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] Amirkanlou, 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.% Al₂O₃/B₄C 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., Amir Khanlou, 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., Amir Khanlou, S. and Javad Nayyeri, M., "Application of Compcasting 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.

Archive

Archive of SID