



بررسی و مقایسه‌ی خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت Al/CNT و کامپوزیت هیبریدی Al/CNT/Al₂O₃ تولید شده توسط فرایند نورد اتصال انباشتی ترکیبی

علی تابش¹، غلامرضا ابراهیمی²، حمیدرضا عزت پور³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه فن آوری‌های نوین، سبزوار

* سبزوار، صندوق پستی 16846-13114، ebrahimi@hsu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/02/25

پذیرش: 96/06/03

کلیدواژگان:

کامپوزیت هیبریدی

فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی

نانولوله‌ی کربنی

خواص مکانیکی

فرایند اتصال نورد انباشتی یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد فوق ریزدانه با استحکام بالا می‌باشد. در این پژوهش از فرایند جدید اتصال نورد انباشتی ترکیبی برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات آلومینا و نانولوله‌ی کربنی استفاده شد. این فرایند در واقع ترکیبی از روش اتصال نورد انباشتی همراه با آنیل متناوب و روش اتصال نورد انباشتی متقاطع می‌باشد. این فرایند شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی اول افزودن تقویت کننده همراه با اتصال نورد انباشتی در چهار پاس ابتدایی نورد، به همراه آنیل ورق‌ها پس از هر پاس بمدت یک ساعت در دمای 350 درجه سانتی‌گراد و در مرحله‌ی دوم اتصال نورد انباشتی بدون اضافه کردن تقویت کننده و بدون آنیل، انجام شد. در هر دو مرحله پس از هر پاس نورد، ورق‌ها به اندازه‌ی 90 درجه در جهت ساعتگرد چرخیده و سپس نورد شدند. کامپوزیت زمینه آلومینیومی با 1٪ وزنی تقویت کننده‌ی نانولوله‌ی کربنی تا 11 پاس و کامپوزیت هیبریدی زمینه آلومینیومی با 1٪ وزنی نانولوله‌ی کربنی و 2٪ وزنی آلومینا تا 9 پاس نورد تولید شدند. نتایج XRD نشان دهنده ایجاد دانه‌های فرعی در حد ابعاد نانومتری در پاس انتهایی در هر دو کامپوزیت می‌باشند. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که با افزایش پاس در هر دو کامپوزیت استحکام کششی افزایش و انعطاف پذیری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. استحکام در کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ نسبت به کامپوزیت Al/CNT در پاس‌های مشابه مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی تأیید می‌کند که توزیع خوب تقویت کننده‌ها بین ورق‌ها در پاس آخر نورد حاصل می‌گردد.

The investigation and comparison of mechanical propertise and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al₂O₃ coposites produced by mixed accumulative roll bonding

Ali Tabesh¹, Gholamreza Ebrahimi^{1*}, Hamidreza Ezatpour²

1 - Department of Materials and Polymer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- Faculty of Engineering, Sabzevar University of New Technology, Sabzevar, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, sabzevar, Iran, ebrahimi@hsu.ac.ir

Keywords

Hybrid composite
Mixed accumulative roll bonding process
Carbon nanotube
Mechanical properties

Abstract

Accumulative roll bonding process is one of severe plastic deformation procedures for produce high strength-ultrafine grain materials. In this investigation, the new method of mixed accumulative roll bonding was used to produce Al-based composite reinforced with carbon nanotube and alumina. This method is mixed of Continual Annealing roll Bonding and cross roll accumulative roll bonding procedures. This process has two steps. The first step is reinforcement adding with accumulative roll bonding in four rolling passes and annealing for one hour and 350°C after any pass. The next step is accumulative roll bonding without adding reinforcement and annealing. After any rolling pass, strips rotate 90° in each step and then rolled. In this process 11 rolling passes perform on Al/(1%wt CNT) composite and 9 rolling passes on Al/(1%wt)CNT/(2%wt) Al₂O₃ composite. X-ray diffraction result show that grain size is about nanometer in final rolling pass for both composite and with increase pass number increases tensile strength and elongation decrease first and then increases. strenght in Al/CNT/Al₂O₃ composite is higher than Al/CNT composite at the same rolling pass. FESEM picture show that reinforced distribution was well in final rolling pass.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Tabesh, A. Ebrahimi, Gh. and Ezatpour, H.R., "The investigation and comparison of mechanical propertise and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al₂O₃ coposites produced by mixed accumulative roll bonding ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.

1- مقدمه

تولید شده به روش اتصال نورد انباشتی متقاطع نسبت به کامپوزیت تولید شده به روش اتصال نورد انباشتی پس از 8 پاس 10٪ افزایش و انعطاف-پذیری حدود 3٪ افزایش داشته است [14]. روش جدید اتصال نورد انباشتی ترکیبی، در واقع ترکیبی از روش نورد انباشتی متقاطع و روش نورد انباشتی با آنیل متناوب می‌باشد، بگونه‌ای که مزیت‌های هر دو روش را دارا می‌باشد. هدف از این پژوهش تولید کامپوزیت به روش اتصال نورد انباشتی ترکیبی می‌باشد که محصول نهایی، استحکام بالای محصول تولید شده به روش نورد انباشتی متقاطع و نیز انعطاف‌پذیری مطلوب محصول تولید شده به روش نورد انباشتی با آنیل متناوب را داشته باشد. مطالعات ریزساختاری در این تحقیق توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) انجام شده است. جهت بررسی تغییرات خواص مکانیکی با افزایش پاس نورد، از آزمون کشش تک محور استفاده شد. راستای نمونه‌های برش یافته توسط دستگاه وایر کات در جهت نورد پاس پایانی بوده است. همچنین بمنظور بررسی تغییرات اندازه دانه‌های فرعی در پاس‌های مختلف نورد، از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شد. در پایان میکروسختی ورق‌ها در جهت ضخامت اندازه‌گیری شده و تغییرات میکروسختی با افزایش پاس بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ورق آلومینیوم 1050 با ابعاد $80 \times 80 \times 0.5$ mm³ آنیل شده به مدت 1 ساعت در دمای 350°C و در اتمسفر محیط به عنوان آلیاژ زمینه و از نانولوله‌ی کربنی چند جداره و ذرات آلومینا با سایز متوسط $0.4 \mu\text{m}$ بعنوان تقویت کننده استفاده شده است. ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم استفاده شده، در جدول 1 نشان داده شده است. ابتدا ورق‌ها به منظور روغن‌زدایی و تمیزکاری سطحی به مدت 10 دقیقه در استون غوطه‌ور و سپس با پنبه خشک و تمیز شدند. در ادامه با برس سیمی فولادی برس-کاری شده تا لایه‌های اکسیدی سطح ورق‌ها شکسته و زبری مناسب روی سطح ورق‌ها ایجاد شود. جهت تولید کامپوزیت هیبریدی با تقویت کننده‌ی نانولوله‌ی کربنی و آلومینا، به منظور اختلاط کامل، مخلوط نانولوله‌ی کربنی و آلومینا با نسبت 1 به 2 در آسیاب گلوله‌ای به مدت یک ساعت و در اتمسفر گاز آرگون آسیاب شدند. دو ورق که تقویت کننده‌ها توسط الک بین آن‌ها پاشیده شده روی هم قرار داده و چهار گوشه آن توسط سیم مسی جهت جلوگیری از لغزش ورق‌ها حین نورد بسته شدند. فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی انجام شده در تحقیق حاضر شامل دو مرحله بود:

مرحله اول: شامل افزودن ذرات تقویت کننده بین ورق‌های آلومینیوم به همراه آنیل بین پاسی بود. به منظور توزیع یکنواخت تقویت کننده‌ها، در هر مرحله نورد پس از افزودن آنها، ورق‌ها 90 درجه حول محور عمود بر جهت نورد چرخیده و سپس نورد شدند.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیوم استفاده شده در این تحقیق (درصد وزنی)

نام آلیاژ	درصد وزنی	نام آلیاژ	درصد وزنی
آلومینیوم	99.54	منگنز	0.010
آهن	0.157	کروم	0.006
سلیسیوم	0.172	وانادیوم	0.016
مس	0.0025	استرانسیوم	0.003
نیکل	0.0019	-	-

امروزه بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد فوق ریزدانه با اندازه دانه‌های نانومتری موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی علم مواد بوده است. این مواد خواص بی‌نظیری همچون استحکام بالا در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم، مقاومت در برابر سایش، استحکام خستگی بالا و مقاومت عالی در برابر خوردگی را از خود نشان می‌دهند. [1، 2]. فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید بعنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه‌ی دانه‌ی نانومتری می‌باشند. در این فرایندها کرنش پلاستیکی شدیدی بدون تغییر در ابعاد ورق بر آن وارد شده و منجر به تولید ساختار فوق ریز دانه و در نتیجه افزایش استحکام می‌گردد [3، 4]. یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد با ساختار نانومتری، فرایند اتصال نورد انباشتی می‌باشد که توسط ساتیو و همکارانش معرفی شده است [5]. در این فرایند چند لایه‌ی فلزی به هم چسبیده و نورد می‌شوند تا اینکه به درجه‌ی کافی از تغییر شکل برسند. با افزایش کرنش و کاهش ضخامت مواد، در نهایت به دلیل کارسختی اعمال شده به نوارهای فلزی، میزان افزایش تغییرشکل دچار محدودیت می‌گردد. در فرایند اتصال نورد انباشتی، ورقی که توسط فرایند نورد 50 درصد کاهش ضخامت داده شده است، به دو قسمت بریده می‌شود و سپس این دو ورق روی هم قرار داده شده و نورد تکرار می‌گردد [6]. از این فرایند می‌توان برای ساخت ورق‌های کامپوزیت نیز استفاده کرد تا علاوه بر دستیابی به خواص مکانیکی بهتر ناشی از خود فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، از خواص تقویت کننده‌ها نیز در جهت بهبود خواص مکانیکی ورق‌ها بهره برد [7]. برای این منظور در پاس-های ابتدایی نورد، تقویت کننده‌ها تا درصد وزنی مورد نظر بین ورق‌ها بطور یکنواخت پراکنده شده و سپس نورد انجام می‌شود. در این تحقیق از نانولوله-ی کربنی بدلیل داشتن مدول الاستیک بالا و همچنین از ذرات آلومینا بدلیل داشتن سختی بالا جهت تولید کامپوزیت استفاده شد [8]. از فرایندهای توسعه یافته‌ی فرایند اتصال نورد انباشتی، می‌توان به روش اتصال نورد انباشتی همراه با آنیل متناوب و روش اتصال نورد انباشتی متقاطع اشاره کرد. در روش اتصال نورد انباشتی همراه با آنیل متناوب، در ابتدای هر پاس عملیات آنیل انجام می‌شود و تا پاس انتهایی آنیل تکرار می‌شود [9]. عملیات آنیل باعث می‌شود محصول نهایی نسبت به فرایند اتصال نورد انباشتی در پاس‌های مشابه استحکام کمتر ولی انعطاف‌پذیری بالاتری داشته باشد [10]. روش اتصال نورد انباشتی متقاطع بدون آنیل انجام می‌شود و در هر پاس نورد، ورق به اندازه‌ی 90 درجه حول محور ND (محور عمود بر جهت نورد) چرخش می‌کند و سپس نورد می‌شود [11]. محصول نهایی در این روش در پاس مشابه دارای استحکام بیشتری نسبت به فرایند اتصال نورد انباشتی می‌باشد [12]. در یک تحقیق که توسط طرقتی نژاد و جماعتی انجام شد، کامپوزیت Al/SiO₂ با سایز متوسط کمتر از $50 \mu\text{m}$ توسط روش اتصال نورد انباشتی با آنیل متناوب تولید شد. نتایج نشان داد استحکام کامپوزیت پس از 6 پاس، نسبت به استحکام ورق آلومینیوم آنیل شده‌ی اولیه 75٪ افزایش و انعطاف‌پذیری کامپوزیت با افزایش پاس ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته و در پاس 6 به میزان 70٪ انعطاف‌پذیری ورق آلومینیوم آنیل شده‌ی اولیه می‌رسد [13].

در تحقیق دیگری که توسط علیزاده صورت گرفت کامپوزیت Al/B₄C با سایز متوسط ذرات $4 \mu\text{m}$ با دو روش اتصال نورد انباشتی و اتصال نورد انباشتی متقاطع تولید شد. با بررسی نتایج مشاهده شد استحکام کامپوزیت

اطراف آن‌ها و ایجاد کارسختی بیشتر می‌باشد. بنابراین در مورد مکانیزم استحکامدهی در کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ علاوه بر افزایش میزان تقویت کننده‌ها که باعث افزایش استحکام می‌شود می‌توان به مکانیزم استحکامدهی اوروان نیز اشاره کرد [21]. شیب نمودار در سه منطقه برای کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ نشان داده شده است.

میزان درصد افزایش استحکام کششی برای آلومینیوم خالص و کامپوزیت‌های Al/CNT و Al/CNT/Al₂O₃ نسبت به استحکام کششی ورق آلومینیوم آنیل شده (35 MPa) محاسبه و در جدول 2 گزارش شده است. همانگونه مشاهده می‌شود بیشترین درصد افزایش استحکام کششی در پاس 9 برای آلومینیوم خالص به میزان 334٪ و برای کامپوزیت Al/CNT به میزان 394٪ و برای کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ به میزان 465٪ می‌باشد. از این اعداد نتیجه می‌شود استحکام کششی در پاس 9 کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ به میزان 60٪ بیشتر از استحکام کششی آلومینیوم خالص در پاس 9 افزایش داشته است.

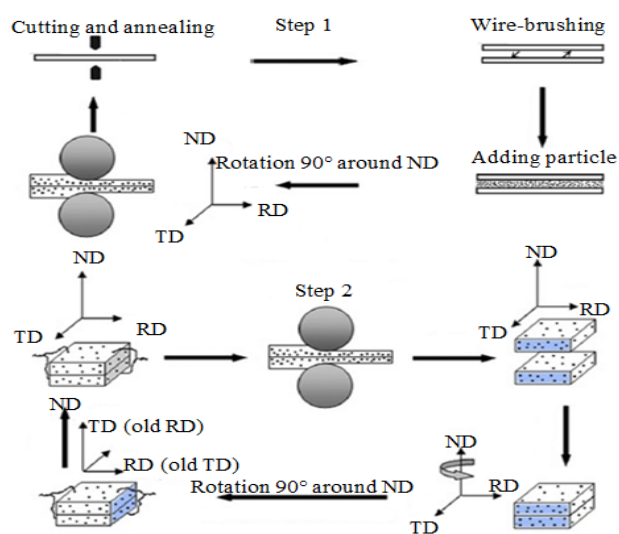


Fig. 1 Schematic illustration of mixed accumulative roll bonding process

شکل 1 شماتیک فرایند نورد تجمعی انباشتی ترکیبی

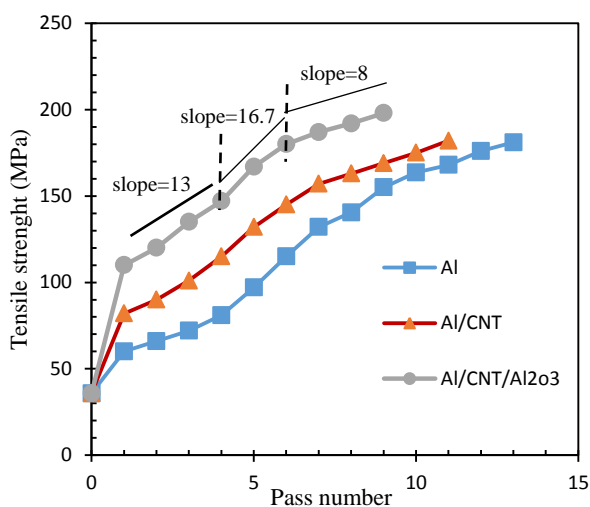


Fig. 2 variation of ultimate tensile strength vs. pass number for pure aluminum, Al/CNT and Al/CNT/Al₂O₃ composites

شکل 2 تغییرات استحکام کششی نهایی آلومینیوم خالص، کامپوزیت Al/CNT و کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ با افزایش پاس نورد

برای تولید هر دو کامپوزیت میزان تقویت کننده‌ها به چهار قسمت مساوی تقسیم شده و در چهار پاس ابتدایی نورد در هر پاس به میزان 0.25 درصد وزنی قبل از هر پاس، بین ورق‌ها توزیع گردید. همچنین جهت افزایش شکل پذیری ورق‌ها، پس از هر پاس نورد در این مرحله، نمونه‌ها در دمای 350°C به مدت یک ساعت آنیل شدند. این دما و زمان در واقع همان شرایط آنیل ابتدایی ورق‌ها جهت شروع فرایند می‌باشد تا قابلیت شکل پذیری ورق‌های نورد شده بمنظور انجام پاس‌های بعدی افزایش یابد (چهار پاس ابتدایی) تا توزیع بهتری از تقویت کننده‌ها بدست آید. [15، 16]. لازم به ذکر است سرعت نورد در مرحله اول 15 rpm بوده است.

مرحله دوم: به منظور افزایش کارسختی و استحکام نهایی ورق‌های تولیدی، فرایند نورد در این مرحله بدون افزودن تقویت کننده‌ها ادامه یافت، تا در نهایت ورق دچار پارگی گردد. همچنین جهت توزیع یکنواخت تقویت کننده‌ها، پس از پایان هر پاس نورد در این مرحله، نمونه‌ها 90 درجه حول محور عمود بر جهت نورد چرخیده شدند. سرعت نورد در مرحله‌ی دوم rpm 25 تنظیم شد. برای اتصال بهتر ورق‌ها در هر دو مرحله، ورق‌ها قبل از نورد به مدت 5 دقیقه در دمای 200°C پیشگرم شدند. در صد کاهش ضخامت در تمام پاس‌های نورد 50٪ بود. کامپوزیت زمینه آلومینیومی با 1٪ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی بعنوان تقویت کننده حداکثر تا 11 پاس نورد و کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی با 1٪ وزنی نانولوله‌ی کربنی و 2٪ درصد وزنی آلومینا بعنوان تقویت کننده حداکثر تا 9 پاس نورد با این روش تولید شدند. ورق آلومینیوم بدون تقویت کننده نیز جهت تولید نمونه‌ی شاهد، حداکثر تا 13 پاس نورد با این روش تولید گردید. شماتیک فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی در شکل 1 نشان داده شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده

منحنی تغییرات استحکام کششی آلومینیوم خالص و دو کامپوزیت بر حسب تعداد پاس نورد در شکل 2 نشان داده شده است. منحنی تنش سیلان برحسب تعداد پاس نورد را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد. منطقه‌ی اول مربوط به چهار پاس ابتدایی نورد می‌باشد که افزایش سطح تنش با افزایش پاس به کندی صورت می‌گیرد. علت آن ایجاد کار نرمی ناشی از حذف و بازآرایی نابجایی‌ها و کاهش چگالی آنها بخاطر آنیل بین پاسی به مدت یک ساعت و در دمای 350°C می‌باشد که باعث کاهش اثر کارسختی ناشی از نورد می‌شود [17]. منطقه‌ی دوم بعلاوه حذف عملیات آنیل بعد از هر پاس، سطح تنش با شدت بیشتری افزایش می‌یابد که علت آن ایجاد کارسختی در هر پاس نورد می‌باشد و افزایش استحکام بعلاوه افزایش چگالی نابجایی‌ها می‌باشد [18].

منطقه‌ی سه مربوط به پاس‌های انتهایی نورد می‌باشد که بعلاوه رسیدن به حالت اشباع در تولید نابجایی و ریزدانه شدن ساختار، افزایش سطح تنش با سرعت کمتری حاصل می‌گردد. رفتار استحکام‌بخشی در کرنش‌های بالا در مواد فوق ریز دانه که توسط فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید تولید می‌شوند در پاس‌های بالا یک حالت اشباع از خود نشان می‌دهد که توسط (Xing) گزارش شده است [19]. علاوه بر آن حالت پایدار در چگالی نابجایی‌ها را می‌توان به تعادل بین بوجود آمدن نابجایی‌ها در اثر فرایند نورد و از بین رفتن آن‌ها توسط پدیده بازبایی دینامیکی نسبت داد [20]. در پاس‌های مشابه، سطح تنش در کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ نسبت به کامپوزیت Al/CNT مقدار بالاتری دارد که بدلیل حضور ذرات آلومینا و ایجاد حلقه‌های اوروان

2-3- بررسی تأثیر فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی بر اندازه دانه‌ها کامپوزیت

شکل 4 الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و شکل 5 الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و آلومینا را نشان می‌دهد.

با استفاده از روش ویلیامسون-هال و الگوی پراش اشعه ایکس می‌توان اندازه کریستالیت‌ها را بدست آورد [22].

رابطه ویلیامسون-هال به صورت (1) می‌باشد:

$$\beta \cos \theta = (K\lambda/d) + 2A\epsilon \sin \theta \quad (1)$$

که در این رابطه β برابر با پهنای پیک در نصف ارتفاع، λ طول موج پرتو ایکس (0.154 نانومتر برای کاند مس $k\alpha$)، θ زاویه پراش پرتو ایکس، A ثابت (معمولاً $A=1$)، ϵ میزان کرنش شبکه و d نیز اندازه کریستالیت و K ثابت ششر ($k=0.91$) می‌باشد. برای محاسبه‌ی مقدار β از نرم افزار سیگما پلات و ایکس پرت استفاده گردید. همانطور که از نوع معادله مشخص است، اگر داده های مربوط به $\beta \cos \theta$ برحسب $\sin \theta$ برای چندین پیک در الگوی تفرق اشعه ایکس در زوایای مختلف رسم شود، بایستی بر روی یک خط راست واقع شوند که از روی شیب آن می‌توان کرنش و از روی عرض از مبدأ آن می‌توان اندازه کریستالیت را تعیین کرد [23].

شکل 6 تغییرات اندازه‌ی کریستالیت برای آلومینیوم خالص و کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و همچنین کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و آلومینا را بر حسب تعداد پاس نورد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در اثر فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی، اندازه‌ی کریستالیت‌های آلومینیوم خالص از $12.4 \mu\text{m}$ در پاس اول به 51.3 nm در پاس 13 کاهش یافته است، درحالیکه این مقدار برای کامپوزیت تقویت شده با 1% نانولوله‌ی کربنی برابر 44.7 nm در پاس 11، و برای کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با 1% نانولوله‌ی کربنی و 2% آلومینا، برابر 53.3 nm در پاس 9 می‌باشد.

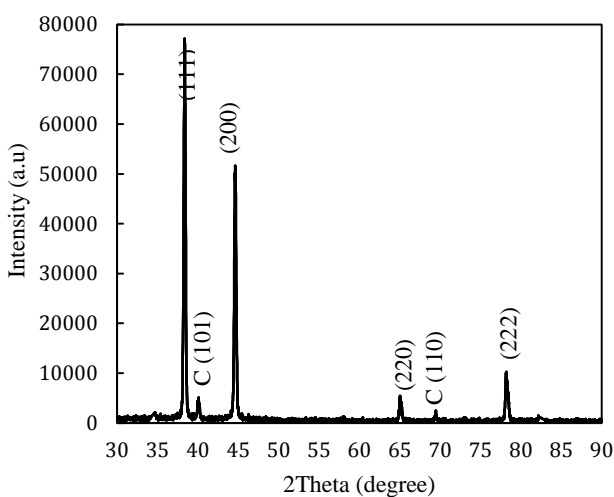


Fig. 4 X-ray diffraction pattern of Al/CNT composite in eleventh cycle
شکل 4 الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al/CNT در پاس 11 نورد

جدول 2 درصد افزایش استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت‌های Al/CNT و $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$ نسبت به استحکام کششی نهایی ورق آلومینیوم آئیل شده در پاس های نورد

Table 2 percent of ultimate tensile strength increase for Al/CNT and $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$ composites than pure Aluminum

تعداد پاس نورد	1	3	5	7	9
ورق Al	54%	102%	180%	270%	334%
کامپوزیت Al/CNT	60%	140%	254%	351%	394%
کامپوزیت $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$	82%	188%	357%	442%	465%

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزودن نانولوله‌ی کربنی میزان افزایش استحکام کششی آلومینیوم خالص را به میزان 60% بهبود داده است و این بعلت تحمل بخشی از بار کششی توسط نانولوله‌های کربنی و همچنین کمک به تولید بیشتر نابجایی و افزایش کار سختی می‌باشد. همچنین این مقدار در پاس 9 کامپوزیت $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$ به میزان 465% می‌باشد که 71% بیشتر از استحکام کششی کامپوزیت Al/CNT می‌باشد و استفاده‌ی همزمان نانولوله-کربنی و آلومینا، به میزان 131% استحکام کششی آلومینیوم خالص را افزایش داده است.

همانگونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود با افزایش پاس، انعطاف‌پذیری در هر دو کامپوزیت کاهش می‌یابد که علت آن کارسختی ایجاد شده در ورق آلومینیوم و همچنین تأثیر ذرات تقویت‌کننده بر روی نابجایی‌ها است که مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند. در پاس‌های انتهایی میزان انعطاف‌پذیری به میزان جزئی افزایش می‌یابد که یک دلیل آن می‌تواند ریزدانه شدن ساختار در پاس‌های پایانی نورد باشد که لغزش دانه‌ها روی هم را تسهیل می‌کند دلیل دیگر در افزایش انعطاف‌پذیری در پاس‌های انتهایی را می‌توان بهتر شدن پراکنش تقویت‌کننده‌ها بین ورق‌ها بعلت چرخش ورق‌ها به اندازه 90 درجه حول محور عمود بر جهت نورد بعد از هر پاس و کاهش تخلخل در اطراف آن‌ها دانست که باعث بهبود کیفیت پیوند ورق‌ها شده و انعطاف‌پذیری کمی افزایش می‌یابد [22].

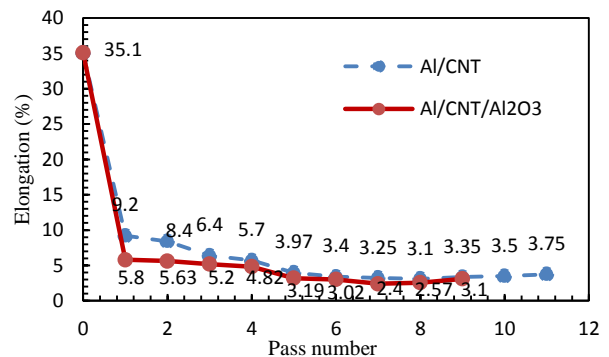


Fig. 3 variation of elongation vs. pass number for Al/CNT and $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$ composites

شکل 3 تغییرات انعطاف‌پذیری کامپوزیت Al/CNT و $\text{Al/CNT/Al}_2\text{O}_3$ بر حسب تعداد پاس نورد

یابد و آنها دانه‌های فرعی را بوجود می‌آورند. دانه‌های بوجود آمده در این مرحله مرزهایی با زاویه‌ی کم هستند. در مراحل بعدی فرایند مرزهای کم-زاویه تبدیل به مرزهای با زاویه‌ی زیاد می‌شوند و در نتیجه دانه‌های فراریز در کل ساختار توسعه پیدا می‌کند.

3-3- بررسی ریزساختاری نمونه های تولید شده توسط فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی

شکل 7 ریزساختار کامپوزیت Al/CNT در پاس اول و شکل 8 ریزساختار کامپوزیت Al/CNT در پاس یازدهم نورد را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود کلوخه های نانوکربنی (فلش نشان داده شده است) که اندازه کلوخه ها بیشتر از یک میکرومتر می باشد با افزایش تعداد پاس، پراکنش نانولوله‌های کربنی ریزتر و متعاقبا یکنواخت‌تر شده است به صورتی که در پاس 11 کلوخه ها به ذرات نانو کربنی تبدیل شده است (شکل 8). که ناشی از شکسته شدن کلوخه های نانو لوله‌ی کربنی توسط فشار ناشی از غلتک‌ها و تنش برشی ناشی از نورد می‌باشد [26]. با شکسته شدن کلوخه‌های نانولوله‌ی کربنی و بهبود پراکنش آن‌ها، تخلخل اطراف کلوخه‌ها کاهش یافته و این باعث می‌شود کیفیت اتصال پیوند بین ذرات نانولوله‌ی کربنی و فلز آلومینیوم و همچنین کیفیت اتصال پیوند بین دو ورق آلومینیوم بهتر شود و در نهایت به بهبود استحکام کامپوزیت کمک می‌کند [27].

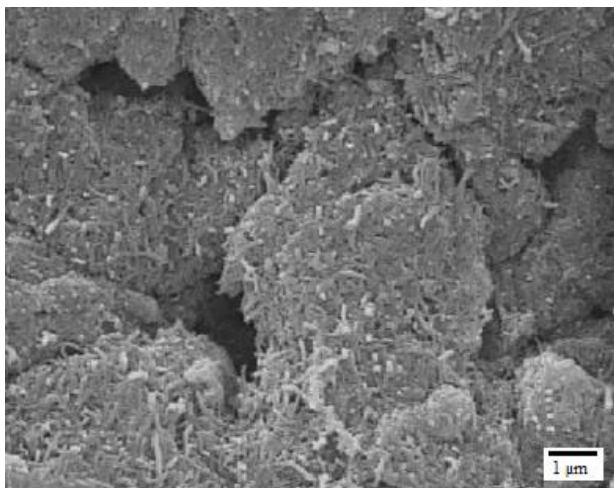


Fig. 7 FESEM micrograph of the Al/CNT composite in the first cycle
شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت Al/CNT در پاس اول

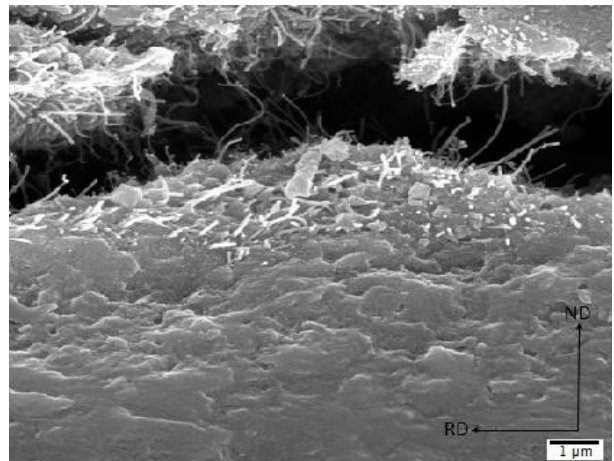


Fig. 8 FSEM micrograph of the Al/CNT composite in the final cycle
شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت Al/CNT در پاس یازدهم

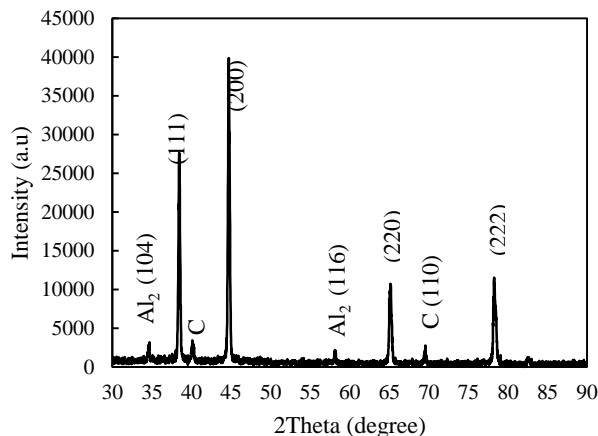


Fig. 5 X-ray diffraction pattern of Al/CNT/Al₂O₃ composite in ninth cycle

شکل 5 الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ در پاس 9 نورد

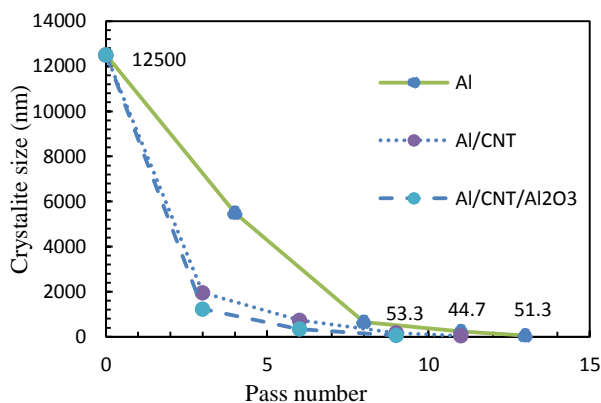


Fig. 6 variation of grain size vs. pass number for pure aluminum and Al/CNT and Al/CNT/Al₂O₃ composites

شکل 6 تغییرات اندازه دانه بر حسب تعداد پاس نورد برای آلومینیوم خالص و کامپوزیت‌های Al/CNT و Al/CNT/Al₂O₃

این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش میزان تقویت‌کننده‌ها به ازاء تعداد پاس نورد یکسان، نرخ کارسختی افزایش یافته و وقوع بازیابی در کرنش‌های کمتر و ریزدانه سازی در اثر تبلور مجدد دینامیکی، نرخ ریزدانه‌سازی افزایش می‌یابد [24, 25].

علاوه بر این، مهمترین مکانیزم تأثیرگذار در ریزدانه‌ی کامپوزیت‌های تولید شده به روش اتصال نورد انباشتی ترکیبی، تغییرشکل برشی شدید در زیر سطح ورق می‌باشد. اصطکاک بین نوارهای فلزی و غلطک‌های عاری از روانساز نقش مهمی را در ریزدانه‌ی بوسیله نورد بازی می‌کند. این تغییرشکل برشی افزایش قابل ملاحظه‌ای را در کرنش معادل و توسعه‌ی ریزدانه‌ی دارد. علاوه بر این، با تکرار نورد ناحیه‌ی تغییرشکل شدید یافته به داخل ورق انتقال می‌یابد. پس از چند سیکل، سرتاسر ضخامت ورق تغییر شکل شدید می‌یابد.

تسوجی و همکارانش [25] مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در فرایند اتصال نورد انباشتی تقسیم شدن دانه‌ها عنوان کردند. در این مکانیزم دانه‌های درشت اولیه بواسطه‌ی تغییر فرم پلاستیک اعمالی به چند دانه‌ی کوچکتر تقسیم می‌شوند. به این صورت که در پاس‌های ابتدایی تعداد زیادی نابجایی در ساختار بوجود می‌آید و در پاس‌های بعدی دانسیته‌ی نابجایی‌ها افزایش می‌-

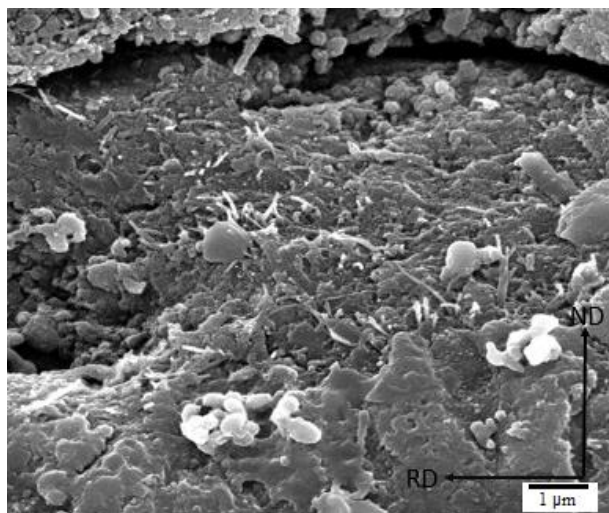


Fig. 10 FSEM micrograph of the Al/CNT/Al₂O₃ composite in the eighth cycle

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ در پاس هشتم

5-مراجع

- [1] Eizadjou, M., Manesh, H.D. and Janghorban, K., "Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process" Journal of Alloys and Compounds, Vol. 474, No. 1, pp. 406-415, 2009.
- [2] 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: Vol. 497, No. 1, pp. 132-138, 2008.
- [3] Lee, S.H., Saito, Y., Sakai, T. and Utsunomiya, H., "Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 325, No. 1, pp.228-235, 2002.
- [4] Chung, Y.H., Park, J.W. and Lee, K.H., "An analysis of accumulated deformation in the equal channel angular rolling (ECAR) process" Metals and Materials International, Vol. 12, No. 4, pp.289-292, 2006.
- [5] 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.
- [6] Shaarabaf, M. and Toroghinejad, M.R., "Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 473, No. 1, pp.28-33, 2008.
- [7] Shamanian, M., Mohammadnezhad, M., Asgari, H., & Szpunar, J. "Fabrication and characterization of Al-Al₂O₃-ZrC composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process". Journal of Alloys and Compounds, Vol. 618, NO. 1, pp 19-26, 2015.
- [8] Salimi, S., H. Izadi, and A. P. Gerlich. "Fabrication of an aluminum-carbon nanotube metal matrix composite by accumulative roll-bonding." Journal of materials science, Vol. 46, No. 2, pp. 409-415, 2001.
- [9] Jamaati, R., Toroghinejad, M.R. and Najafizadeh, A., 2010. "Application of anodizing and CAR processes for manufacturing Al/Al₂O₃ composite". Materials Science and Engineering, Vol. 527, No. 16, pp. 3857-3863, 2010.
- [10] Amir Khanlou, S., Jamaati, R., Niroumand, B. and Toroghinejad, M.R., "Fabrication and characterization of Al/SiC p composites by CAR process" Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 13, pp.4462-4467, 2011.
- [11] 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, Vol. 597, No. 1, pp.122-127, 2014.
- [12] 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, No. 1, pp.14-19, 2012.

شکل‌های 9 و 10 مقطع عرضی کامپوزیت هیبریدی Al/CNT/Al₂O₃ بترتیب در پاس 4 و 8 نورد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نانولوله‌های کربنی که با پودر آلومینا آسیاکاری شده اند، بدلیل پیوندهای واندروالس بین نانولوله‌های کربنی و گره خوردن آن‌ها به یکدیگر، مانع از پراکنش خوب ذرات آلومینا در کامپوزیت شده است. ولی در پاس‌های بالاتر بدلیل شکسته شدن این پیوندها در اثر کار مکانیکی و تنش‌های برشی ناشی از نورد و همچنین افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده، پراکنش ذرات آلومینا و نانولوله‌ی کربنی در کامپوزیت بهبود یافته است.

4- نتیجه گیری

در کامپوزیت زمینه آلومینیومی با تقویت‌کننده‌ی نانولوله‌ی کربنی و کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی با تقویت‌کننده‌ی نانولوله‌ی کربنی و آلومینا که توسط فرایند اتصال نورد انباشتی ترکیبی تولید شده‌اند، خواص مکانیکی با افزایش تعداد پاس نورد نسبت به آلومینیوم خالص نورد شده افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. رابطه ویلیامسون-هال نشان می‌دهد که در کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی، با افزایش پاس نورد، اندازه دانه‌های فرعی کاهش یافته است، بگونه‌ای که در پاس 11، اندازه دانه‌های فرعی به 44.7 nm و در پاس 9 کامپوزیت هیبریدی، اندازه آن‌ها به 53.3 nm کاهش یافت. همچنین عملیات آنیل و چرخش ورق‌ها به اندازه 90 درجه حول محور عمود بر جهت نورد بعد از هر پاس در مرحله‌ی اول، باعث توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده در هر دو کامپوزیت شد و با افزایش پاس نورد کلوخه‌های تقویت‌کننده‌ها بین ورق‌های آلومینیوم کاهش یافته و باعث بهبود کیفیت پیوند بین ورق‌های آلومینیوم و همچنین بین تقویت‌کننده‌ها و ورق آلومینیوم شده و با انتقال بخشی از بار کششی به تقویت‌کننده‌ها، منجر به افزایش استحکام کششی هر دو کامپوزیت شده است.

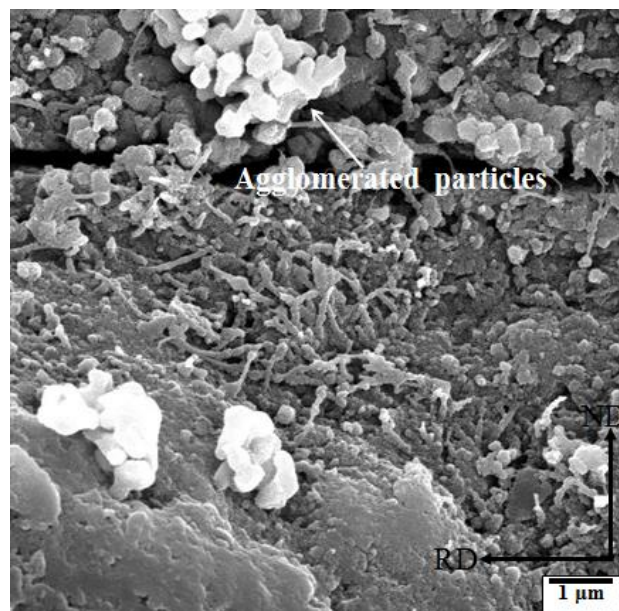


Fig. 9 FSEM micrograph of the Al/CNT/Al₂O₃ composite in the fourth cycle

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت Al/CNT/Al₂O₃ در پاس چهارم

- [13] Hashemi, M., Jamaati, R. and Toroghinejad, M.R., "Microstructure and mechanical properties of Al/SiO₂ composite produced by CAR process" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 532, No. 1, pp.275-281, 2012.
- [14] 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.
- [15] Alizadeh M, 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, No. 1, pp.180-184,2015.
- [16] Kwan, C., Wang, Z. and Kang, S.B., "Mechanical behavior and microstructural evolution upon annealing of the accumulative roll-bonding (ARB) processed Al alloy 1100" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 480, No. 1, pp.148-159, 2008.
- [17] El Mahallawy, N., Fathy, A., Abdelaziem, W. and Hassan, M.. "Microstructure evolution and mechanical properties of Al/Al–12% Si multilayer processed by accumulative roll bonding (ARB)". *Materials Science and Engineering: A*, Vol 647, No. 1, pp.127-135, 2015.
- [18] 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.
- [19] Xing, J., Yang, X., Miura, H. and Sakai, T., "Mechanical properties of magnesium alloy AZ31 after severe plastic deformation" *Materials transactions*, Vol.49, No.1, pp.69-75, 2008.
- [20] Yu HL, Lu C, Tieu AK, Li HJ, Godbole A, Zhang SH. "Special Rolling Techniques for Improvement of Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metal Sheets" a Review. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 18, No. 5, pp.754-69,2016.
- [21] Zhang, Z., and D. L. Chen. "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.
- [22] Jamaati, R., Amir Khanlou, 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.
- [23] 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.
- [24] Schmidt, C.W., Knieke, C., Maier, V., Höppel, H.W., Peukert, W. and Göken, M., "Accelerated grain refinement during accumulative roll bonding by nanoparticle reinforcement". *Scripta Materialia*, Vol. 64, No. 3, pp. 245-248, 2011.
- [25] 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.
- [26] Jamaati, R., Amir Khanlou, S., Toroghinejad, M. R., & Niroumand, B., "Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process". *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 4, pp. 2143-2148, 2011.
- [27] 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.