نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامیوزی۔** http://jstc.iust.ac.ir

| كامپوزيت   |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
| And successing a second       |  |
| <ul> <li>Consumption of the consumption of the construction of</li></ul> |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

# بررسی و مقایسهی خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت Al/CNT و کامپوزیت هیبریدی Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> توليد شده توسط فرايند نورد اتصال انباشتی ترکيبی

على تابش<sup>1</sup>، غلامرضا ابراهيمي<sup>2</sup>، حميدرضا عزتيور<sup>3</sup>

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 يستى hsu.ac,ir ،16846-13114 \*

| چکیدہ   | اطلاعات مقاله                    |
|---|----------------------------------|
| فرایند اتصال نورد انباشتی یکی از روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد فوق ریزدانه با استحکام بالا میباشد. در این             | دريافت: 96/02/25                 |
| پژوهش از فرایند جدید اتصال نورد انباشتی ترکیبی برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات آلومینا و نانولولهی             | پذيرش: 03/06/03                  |
| کربنی استفاده شد. این فرایند در واقع ترکیبی از روش اتصال نورد انباشتی همراه با آنیل متناوب و روش اتصال نورد انباشتی متقاطع            | كليدوا ثكانن                     |
| میباشد. این فرایند شامل دو مرحله است. در مرحلهی اول افزودن تقویت کننده همراه با اتصال نورد انباشتی در چهار پاس ابتدایی نورد،          | حييدورو دن.                      |
| به همراه آنیل ورقها پس از هر پاس بمدت یک ساعت در دمای 350 درجه سانتیگراد و در مرحلهی دوم اتصال نورد انباشتی بدون                      | كامپوزيت هيبريدى                 |
| اضافه کردن تقویتکننده و بدون آنیل، انجام شد. در هر دو مرحله پس از هر پاس نورد، ورق ها به اندازهی90 درجه در جهت ساعتگرد                | فرايند اتصال نورد انباشتي تركيبي |
| چرخیده و سپس نورد شدند. کامپوزیت زمینه آلومینیومی با 1٪ وزنی تقویتکنندهی نانولولهی کربنی تا 11 پاس و کامپوزیت هیبریدی                 | نابولولەي درېنى<br>خيام مكان ك   |
| زمینه آلومینیومی با 1٪ وزنی نانولولهی کربنی و 2٪ وزنی آلومینا تا 9 پاس نورد تولید شدند. نتایج XRD نشان دهنده ایجاد دانه های           | حواط مكاليكي                     |
| 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/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                  |
| نسبت به کامپوزیت Al/CNT در پاس های مشابه مقدار بیشتری را نشان میدهد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی تأیید میکند                     |                                  |
| که توزيع خوب تقويت کننده ها بين ورق ها در پاس آخر نورد حاصل میگردد.   |                                  |
|   |                                  |

# The investigation and comparison of mechanical propertise and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al2O3 copmosites produced by mixed accumulative roll bounding

## Ali Tabesh<sup>1</sup>, Gholamreza Ebrahimi<sup>1\*</sup>, Hamidreza Ezatpour<sup>2</sup>

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

pass.

| Hybrid composite Accmulative roll bonding prcess is one of severe plastic deformation procidures for produce high stre ultrafine grain materials. In this investigation, the new method of mixed accumulative roll bonding   |   |
|--|---|
| bonding process<br>Carbon nanotube<br>Mechanical properties<br>Wechanical properties<br>Used to produce Al-based composite reinforced with carbon nanotube and alumina. This method is mix<br>Continual Annealing roll Bonding and cross roll accumulative roll bonding procedures. This process has<br>steps. The first step is reinforcement adding with accumulative roll bonding in four rolling passes<br>annealing for one hour and 350°C after any pass. The next step is accumulative roll bonding without ac<br>reinforcement and annealing. After any rolling pass, strips rotate 90° in each step and then rolled. In<br>process 11 rolling passes perform on Al/(1%wt CNT) composite and 9 rolling passes<br>Al/(1%wt)CNT/(2%wt) AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> composite. X-ray diffraction result show that grain size is about nanor<br>in final rolling pass for both composite and with increase pass number increases tensile strength<br>elongation decrease first and then increases. Strenght in Al/CNT/Al2O3 composite is higher than Al | ength-<br>g was<br>xed of<br>as two<br>es and<br>idding<br>in this<br>es on<br>meter<br>h and |

#### 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 copmosiles produced by mixed accumulative roll bounding ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018. produced by mixed accumulative roll bounding ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.

#### 1–مقدمه

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 مىدهند. [1، 2]. فرايندهاى تغيير شكل پلاستيک شديد بعنوان يكى 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 توليد ساختار فوق ريز دانه و در نتيجه افزايش استحكام مي گردد [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 می شوند 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 می گردد. در فرایند اتصال نورد انباشتی، ورقی که توسط فرایند نورد 50 درصد کاهش ضخامت داده شده است، به دو قسمت بریده می شود و سپس این دو ورق روی هم قرار داده شده و نورد تکرار می گردد [6]. از این فرایند می توان برای ساخت ورق های کامپوزیت نیز استفاده کرد تا علاوه بر دستیابی به خواص مکانیکی بهتر ناشی از خود فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، از خواص تقویت کننده ها نیز در جهت بهبود خواص مكانيكي ورقها بهره برد [7]. براى اين منظور در پاس-های ابتدایی نورد، تقویت کتتدهها تا درصد وزنی مورد نظر بین ورقها بطور یکنواخت پراکنده شده و سپس نورد انجام می شود. 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 عمليات أنيل انجام مي شود و تا پاس انتهايي أنيل تكرار مي شود [9]. عمليات آنیل باعث میشود محصول نهایی نسبت به فرایند اتصال نورد انباشتی در پاس،های مشابه استحکام کمتر ولی انعطافپذیری بالاتری داشته باشد [10]. روش اتصال نورد انباشتی متقاطع بدون آنیل انجام می شود و در هر

پاس نورد، ورق به اندازهی 90 درجه حول محور ND ( محور عمود بر جهت نورد) چرخش می کند و سپس نورد می شود [11]. محصول نهایی در این روش در پاس مشابه دارای استحکام بیشتری نسبت به فرایند اتصال نورد انباشتی می باشد [12]. در یک تحقیق که توسط طرقینژاد و جماعتی انجام شد، کامپوزیت Al/SiO2 با سایز متوسط کمتر از mm50 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 انعطاف پذیری کامپوزیت با افزایش پاس ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته و در پاس 6 به میزان ٪70 انعطاف پذیری ورق آلومینیوم آنیل شدهی اولیه می رسد [13].

در تحقیق دیگری که توسط علیزاده صورت گرفت کامپوزیت Al/B<sub>4</sub>C با سایز متوسط ذرات μm با دو روش اتصال نورد انباشتی و اتصال نورد انباشتی متقاطع تولید شد. با بررسی نتایج مشاهده شد استحکام کامپوریت

www.SID.ir

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 می باشد.

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 انعطاف پذیری 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 اندازه-گیری شده و تغییرات میکروسختی با افزایش پاس بررسی شده است.

#### 2- مواد و روش ها

در این تحقیق از ورق آلومینیوم 1050 با ابعاد  $mm^3$  و در اتمسفر محیط به عنوان آئیل شده به مدت 1 ساعت در دمای  $3^{\circ}035$  و در اتمسفر محیط به عنوان آلیاژ زمینه و از نانولولهی کربنی چند جداره و ذرات آلومینا با سایز متوسط m آلومینیوم استفاده شده، در جدول 1 نشان داده شده است. ابتدا ورق ها به منظور روغنزدایی و تمیزکاری سطحی به مدت 10 دقیقه در استون غوطهور 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-ملح ورق ها 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 پاشیده شده روی هم قرار داده و چهار گوشه آن توسط سیم مسی جهت پاشیده شده روی هم قرار داده و چهار گوشه آن توسط سیم مسی جهت بلوگیری از لغزش ورق ها 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) Table 1 Chemical composition of used Aluminum in this investigation

| 8         |           |            |           |  |
|-----------|-----------|------------|-----------|--|
| نام آلياژ | درصد وزنى | نام آلياژ  | درصد وزنی |  |
| آلومينيوم | 99.54     | منگنز      | 0.010     |  |
| آهن       | 0.157     | كروم       | 0.006     |  |
| سليسيوم   | 0.172     | واناديوم   | 0.016     |  |
| مس        | 0.0025    | استرانسيوم | 0.003     |  |
| نيكل      | 0.0019    | -          | -         |  |
|           |           |            |           |  |

نشریه علوم و فناوری **کا میو** *ز***یت** 

برای تولید هر دو کامپوزیت میزان تقویت کننده ها 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 ورق ها توزیع گردید. همچنین جهت افزایش شکل-پذیری ورق ها، پس از هر پاس نورد در این مرحله، نمونه ها در دمای 2°350 به مدت یک ساعت آنیل شدند. این دما و زمان در واقع همان شرایط آنیل ابتدایی ورق ها جهت شروع فرایند می باشد تا قابلیت شکل پذیری ورق های نورد شده بمنظور انجام پاس های بعدی افزایش یابد (چهار پاس ابتدایی) تا توزیع بهتری از تقویت کننده ها بدست آید. [15، 16]. لازم به ذکر است سرعت نورد در مرحله اول Tpr 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° 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 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–نتايج و بحث

#### 3-1- خواص مکانیکی کامپوزیت های 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 می توان 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 2°350 میباشد که باعث کاهش اثر کارسختی ناشی از نورد میشود [17]. منطقهی دوم بعلت 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 بعلت افزایش چگالی نابجاییها می-باشد [18].

منطقهی سه مربوط به پاسهای انتهایی نورد می باشد که بعلت رسیدن به حالت اشباع در تولید نابجایی و ریزدانه شدن ساختار، افزایش سطح تنش با سرعت کمتری حاصل می گردد. رفتار استحکام بخشی در کرنشهای بالا در مواد فوق ریز دانه که توسط فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید تولید می شوند در پاسهای بالا یک حالت اشباع از خود نشان می دهد که توسط (Xing) گزارش شده است [19]. علاوه بر آن حالت پایدار در چگالی نابجاییها را می-توان به تعادل بین بوجود آمدن نابجایی ها در اثر فرایند نورد و از بین رفتن آنها توسط پدیده بازیابی دینامیکی نسبت داد [20]. در پاسهای مشابه، سطح تنش در کامپوزیت Al/CNT/Al203 نسبت به کامپوزیت Al/CNT مقدار بالاتری دارد که بدلیل حضور ذرات آلومینا و ایجاد حلقههای اوروان

www.SID.EF

نشریه علوم و فناوری **کا** *میو ز***یت** 

اطراف آنها و ایجاد کارسختی بیشتر میباشد. بنابراین در مورد مکانیزم استحکامدهی در کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O3 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/ Al<sub>2</sub>O3

میزان درصد افزایش استحکام کششی برای آلومینیوم خالص و کامپوزیتهای Al/CNT و Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نسبت به استحکام کششی ورق آلومینیوم آنیل شده (MPa) 35) 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 ٪404 و برای کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به میزان ٪465 میباشد. از این اعداد نتیجه میشود استحکام کششی در پاس 9 کامپوزیت Al/CNT، به میزان ٪60 بیشتر از استحکام کششی آلومینیوم خالص در پاس 9 افزایش



Fig. 1 Schematic illustration of mixed accumulative roll bonding process شكل 1 شماتيك فرايند نورد تجمعي انباشتي تركيبي



Fig. 2 variation of ultimate tensile strength vs. pass number for pure aluminum, Al/CNT and Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites و Al/CNT تغییرات استحکام کششی نهایی آلومینیوم خالص،کامپوزیت Al/CNT کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با افزایش پاس نورد

جدول 2 درصد افزایش استحکام کششی نهایی برای کامپوزیتهای Al/CNT و Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>نسبت به استحکام کششی نهایی ورق آلومینیوم آنیل شده در پاس های نورد

 $\label{eq:Table 2} \mbox{Table 2 percent of ultimate tensile strength increase for Al/CNT and Al/CNT/Al_2O_3 \ composites than pure Aluminum$ 

| تعداد پاس نورد                                    | 1   | 3    | 5    | 7    | 9    |
|---|-----|------|------|------|------|
| ورق AI  | 54% | 102% | 180% | 270% | 334% |
| کامپوزیت<br>Al/CNT                                | 60% | 140% | 254% | 351% | 394% |
| کامپوزیت<br>AI/CNT/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 82% | 188% | 357% | 442% | 465% |

بنابراین می توان نتیجه گرفت افزودن نانولوله ی 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 می باشد. همچنین این مقادیر در پاس 9 کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> می باشد که ./71 بیشتر از استحکام کششی کامپوزیت Al/CNT می باشد و استفاده ی 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، انعطاف پذیری در هر دو کامپوزیت کاهش مییابد که علت آن کارسختی ایجاد شده در ورق آلومینیوم و همچنین تأثیر ذرات تقویت کننده بر روی نابجاییها است که مانع حرکت نابجاییها میشوند. در پاسهای انتهایی میزان انعطاف پذیری 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 انعطاف پذیری در پاسهای انتهایی را میتوان بهتر شدن پراکنش تقویت کنندهها 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 انعطاف پذیری کمی افزایش مییابد [22].



**Fig. 3** variaton of elongation vs. pass number for Al/CNT and Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites م Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر حسب Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر حسب تعداد پاس نورد

3–2– 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 می-دهد.

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

رابطه ويليامسون-هال به صورت (1) ميباشد:

(1)

 $\beta \text{Cos}\theta = (K\lambda/d) + 2A\varepsilon \, \text{Sin}\theta$ 

که در این رابطه  $\beta$  برابر با پهنای پیک در نصف ارتفاع،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس (0.154 نانومتر برای کاتد مس  $k\alpha$ )،  $\theta$  زاویه پراش پرتو ایکس، ثابت(معمولاً (A=1)، a میزان کرنش شبکه و b نیز اندازه کریستالیت و  $\lambda$  ثابت ششر ((k=0.91)، میباشد. برای محاسبهی مقدار  $\beta$  از نرم افزاز سیگما پلات و ایکس پرت استفاده گردید. همانطور که از نوع معادله مشخص است، اگر داده های مربوط به  $\beta \cos \beta$  برحسب  $\sin \beta$  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 می توان کرنش و از روی عرض از مبدأ آن می توان 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 μμ 12.4 در پاس اول به 51.3 nm در پاس 13 کاهش یافته است، درحالیکه این مقدار برای کامپوزیت تقویت شده با 1⁄2 نانولولهی کربنی برابر 44.7 nm 14. در پاس 11، و برای کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با 1⁄2 نانولولهی کربنی و 1⁄2 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 کامپوزیتAl/CNT در پاس 11 نورد



Fig. 5 X-ray diffraction pattern of Al/CNT/Al $_2O_3$  composite in ninth cycle

**شکل 5** الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در پاس 9 نورد



**Fig. 6** variation of grain size vs. pass number for pure aluminum and Al/CNT and Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites شكل 6 تغييرات اندازه دانه بر حسب تعداد پاس نورد براى آلومينيوم خالص و Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al/CNT

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

علاوه بر این، مهمترین مکانیزم تأثیرگذار در ریزدانگی کامپوزیت های 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 ریزدانگی بوسیله نورد بازی میکند. این تغییرشکل برشی افزایش قابل ملاحظهای را در کرنش معادل و توسعهی ریزدانگی 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 می آید و در پاسهای بعدی دانسیتهی نابجاییها افزایش می-

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 درنتیجه دانههای فراریز در کل ساختار توسعه پیدا میکند.

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

شكل 7 ريزساختار كامپوزيت Al/CNT در پاس اول و شكل 8 ريزساختار كامپوزيت Al/CNT در پاس يازدهم نورد را نشان مىدهد. همانطور كه در شكل 7 مشاهده مىشود كلوخه هاى نانوكربنى ( فلش نشان داده شده است) كه اندازه كلوخه ها بيشتر از يك ميكرومتر مى باشد با افزايش تعداد پاس، پراكنش نانولولههاى كربنى ريزتر و متعاقبا يكنواختتر شده است به صورتى كه در پاس 11 كلوخه ها به ذرات نانو كربنى تبديل شده است (شكل 8). كه ناشى از شكسته شدن كلوخه هاى نانو لولهى كربنى توسط فشار ناشى از غلتكها و تنش برشى ناشى از نورد مىباشد [26]. با اطراف كلوخهها كاهش يافته و اين باعث مىشود كيفيت اتصال پيوند بين درات نانولولهى كربنى و فلز آلومينيوم و همچنين كيفيت اتصال پيوند بين دو ورق آلومينيوم بهتر شود و در نهايت به بهبود استحكام كامپوزيت كمك مى-كند [27].



Fig. 7 FESEM micrograph of the Al/CNT composite in the first cycle شكل 7 تصوير ميكروسكوپ الكتروني كامپوزيت 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 یازده

بررسی بررسی و مقایسهی خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت Al/CNT و...

شکلهای 9 و 10 مقطع عرضی کامپوزیت هیبریدی Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بترتیب در پاس 4 و 8 نورد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود 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 پاس های بالاتر بدلیل شکسته شدن این پیوندها در اثر کار مکانیکی و تنشهای برشی ناشی از نورد و همچنین افزایش تعداد لایههای تقویت کننده، پراکنش ذرات آلومینا و نانولولهی کربنی در کامپوزیت بهبود یافته است.

#### 4- نتیجه گیری

در کامپوزیت زمینه آلومینیومی با تقویت کننده انبولوله کربنی و کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی با تقویت کننده انبولوله 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 می دهد. رابطه ویلیامسون-هال نشان می دهد که پاس نورد، اندازه دانههای فرعی تقویت شده با نانولوله کربنی، با افزایش پاس نورد، اندازه دانههای فرعی کاهش یافته است، بگونهای که در پاس 11، اندازه دانههای فرعی به 44.7 nm و کامپوزیت هیبریدی، اندازه اندازه دانههای فرعی به 44.7 nm و کامپوزیت هیبریدی، اندازه اندازه دانههای فرعی به 44.7 nm و کامپوزیت هیبریدی، اندازه اندازه وانههای فرعی به است ، محینین عملیات آنیل و چرخش ورق ها به اندازه را باعث توزیع بهتر ذرات تقویت کننده در هر دو کامپوزیت شد و با افزایش پاس نورد کلوخههای تقویت کننده در هر دو کامپوزیت شد و با افزایش پاس نورد کلوخههای تقویت کننده ها بین ورق های آلومینیوم کاهش یافته و پاعث بهبود کیفیت پیوند بین ورق های آلومینیوم و همچنین بین تقویت-باعث بهبود کیفیت پیوند بین ورق های آلومینیوم و همچنین بین تقویت-کننده ها و ورق آلومینیوم شده و با انتقال بخشی از بار کششی به تقویت-کننده ها، منجر به افزایش استحکام کششی هر دو کامپوزیت شده است.



Fig. 9 FSEM micrograph of the Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite in the fourth cycle

**شکل 9** تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در پاس چهارم

علی تابش و همکا*ر*ان



Fig. 10 FSEM micrograph of the Al/CNT/Al $_2O_3$  composite in the eighth cycle

شكل 10 تصوير ميكروسكوپ الكتروني كامپوزيت Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در پاس هشتم

#### 5-مراجع

- 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] Shaarbaf, 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–Al 2 O 3–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/Al 2 O 3 composite". Materials Science and Engineering, Vol. 527, No. 16, pp. 3857-3863, 2010.
- [10] Amirkhanlou, 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 crossrolling 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/B 4 C composite processed by cross-roll accumulative roll bonding" Materials Science and Engineering: A, Vol. 538, No. 1, pp.14-19, 2012.

- [13] 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, 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 rollbonding 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 rollbonding (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., 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.
- [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., Amirkhanlou, 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 ultrahigh straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process" Acta materialia, Vol. 47, No. 2, pp.579-583, 1999.