



## بررسی تاثیر حرارت بر رفتار کششی و ریزساختاری نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC محمدرضا سلطانی<sup>1</sup>، امیر عطریان<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران  
2- استادیار، مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

\* اصفهان، صندوق پستی 8514143131، atrian@pmc.iaun.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 15 دی 1396  
پذیرش: 30 بهمن 1396  
ارائه در سایت: شهریور 1397

### چکیده

در این پژوهش رفتار کششی دما بالای نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ساخت نمونه‌ها، نانوذرات تقویت کننده کاربید سیلیکون (SiC) به همراه ذرات آلومینیوم (Al) خالص (99/6%) به عنوان زمینه توسط آسیاب سایشی مخلوط شدند. مخلوط حاصل سپس تحت فرایند پرس سرد و اکستروژن گرم در دمای 500 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از فرایند اکستروژن و نمونه‌سازی، رفتار کششی در دماهای مختلف به همراه اندازه گیری چگالی و همچنین مشاهدات ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده بهبود 40 درصدی استحکام نهایی کششی نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC در مقایسه با نمونه تقویت نشده در دمای محیط بود. همچنین، افزایش دما حین آزمون کشش تا 270 درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش حداکثر کرنش قابل تحمل گردید. این افزایش دما همچنین، کاهش استحکام نهایی کششی نمونه تقویت نشده و نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC را به ترتیب برابر 50% و 44% به دنبال داشت. مشاهده سطوح شکست نیز نشان داد در نمونه تقویت نشده با افزایش دما، نوع شکست از ترد به نرم تغییر می‌کند ولی برای نمونه نانوکامپوزیت، نوع شکست همچنان ترد باقی می‌ماند.

### کلیدواژگان:

متالورژی پودر  
اکستروژن گرم  
آلومینیوم  
نانوکامپوزیت  
حرارت

## The effect of temperature on tensile behavior and microstructure of Al-3 vol% SiC nanocomposite

Mohammadreza Soltani, Amir Atrian\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\* P.O.B. 8514143131 Isfahan, Iran, atrian@pmc.iaun.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 05 January 2018  
Accepted 19 February 2018  
Available Online September 2018

### Keywords:

Powder metallurgy  
Hot extrusion  
Aluminum  
Nanocomposite  
Temperature

### Abstract

In this study, high-temperature tensile behavior of Al-3 vol% SiC nanocomposite is investigated. To fabricate the samples, SiC nano reinforcements and Al matrix were mixed using an attrition milling. The mixed powders were then subjected to cold pressing and hot extrusion at temperature of 500° C. Tensile behavior at different temperatures along with density measurement and microstructural examinations were studied. The results represent a 40% improvement in ultimate tensile strength of Al-3vol% SiC nanocomposite in comparison with non-reinforced sample at ambient temperature. Also, a rise in temperature up to 270 ° C during the tensile test led to an increase of the maximum elongation. Moreover, this temperature rise caused to 50% and 44% reduction of ultimate tensile strength of non-reinforced and nanocomposites samples, respectively. Fractured surfaces also showed that the in non-reinforced sample with increasing the temperature, brittle fracture changes to ductile fracture however, for nanocomposite sample the fracture remains brittle.

### 1- مقدمه

خواص ایده‌آل همیشه مورد توجه صنایع مختلف بوده‌اند. در مقابل، کاربرد این آلیاژها به علت نرمی و ضعف رفتاری در دماهای بالا محدود می‌شود [2,1]. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی می‌توان از ذرات سرامیکی به ویژه سیلیکون کاربید به عنوان یکی از ایده‌آل‌ترین تقویت‌کننده‌ها که موجب بهبود استحکام کششی و رفتار مکانیکی آلومینیوم در دماهای مختلف شود، یاد کرد. لازم به

در دنیای امروز، نیاز روزافزون صنایع به پیشرفت تکنولوژی و تنوع و تعدد طرح‌ها، توجه مهندسیین را به سمت تولید موادی با قابلیت‌های ویژه معطوف کرده است. یک دسته از این مواد، کامپوزیت‌ها می‌باشند که اصلی‌ترین ویژگی آن‌ها، امکان ایجاد تلفیقی از خواص مورد نظر در آن‌هاست. آلومینیوم و آلیاژهای آن به علت داشتن نسبت استحکام به وزن بالا، کمی هزینه و

Please cite this article using:

M. Soltani, A. Atrian, The effect of temperature on tensile behavior and microstructure of Al-3 vol% SiC nanocomposite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-8, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش‌های گوناگونی برای افزایش انعطاف‌پذیری فلزات نانو ساختار وجود دارد [7,8,11,12]. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، استفاده از فرایندهای تغییر شکل گرم مانند فرایند اکستروژن گرم می‌باشد. تاثیر نانوذرات تقویت کننده بر خواص مکانیکی و ریزساختاری نانوکامپوزیت از پرسش‌های اصلی این پژوهش می‌باشد. از این بررسی می‌توان برای به دست آوردن رفتار الاستیک و میزان استحکام کششی استفاده کرد. هان و همکاران [13] در پژوهش خود بر روی رفتار کششی کامپوزیت Al/SiC در دماهای بالا، به بهبود استحکام کششی دست یافتند. همچنین رجرام و همکاران [14] در مطالعه‌ای به بررسی خواص کششی و سایشی در دماهای بالا (از دمای اتاق تا 350 درجه سانتی‌گراد) برای کامپوزیت Al/SiC تولید شده به روش ریخته‌گری پرداختند. نتیجه گزارش شده آن بود که با افزایش دما، استحکام کششی کاهش یافت و همچنین درصد ازدیاد طول تا دمای 200 درجه سانتی‌گراد کاهش و پس از آن با افزایش دما، درصد ازدیاد طول با افزایش همراه بود. اونورو و همکاران [15] نیز به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلیاژ Al6061/7015 با ذرات تقویت کننده B<sub>4</sub>C در دمای بالا پرداختند و از روش تولید به صورت پرس گرم و اکستروژن گرم بهره گرفتند از جمله پژوهش‌هایی هم که بر روی استحکام فشاری کار شده است، می‌توان به بررسی تاثیر درجه حرارت بر استحکام فشاری نانوکامپوزیت Al-5%SiC در حالت‌های مختلف با ذرات نانو و میکرونی که توسط کامرانی و همکارانش [16] انجام شده است، اشاره کرد. نتیجه تحقیق مذکور این بوده است که برای هر دو نوع ذرات تقویت کننده، افزایش درجه حرارت موجب افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش استحکام گردید، البته ذرات نانو نسبت به میکرو موجب افزایش بیشتر استحکام کامپوزیت شدند.

در این پژوهش، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC در دماهای بالا (دمای محیط، 170 و 270 درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی این خواص اطلاعات خوبی از رفتار مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها برای درک محدودیت‌های این نوع مواد در دماهای بالا ارائه می‌دهد. با توجه به روش تولید مورد استفاده (آسیاب مکانیکی، پرس سرد و اکستروژن گرم)، امکان تولید نمونه‌هایی با طول مناسب جهت انجام آزمون فشار فراهم گردید.

## 2- مواد، تجهیزات و روش‌ها

در این پژوهش از آلومینیوم خالص تجاری (مورفولوژی نا منظم،

ذکر است استحکام بخشی توسط ذرات تقویت کننده تابع اندازه آن‌هاست (اثر اوروان<sup>1</sup>). ذرات با اندازه کوچک‌تر، به علت ایجاد موانع بیشتر در مسیر حرکت نابجایی‌ها، به مراتب اثر استحکام بخشی بالاتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارند [3,4]. سنتیل کومار و همکارانش [5] در بررسی تجربی بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2014 (به عنوان زمینه کامپوزیت) تقویت شده با ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دو حالت میکرو ذره و نانو ذره به این نتیجه دست یافتند که کامپوزیت تقویت شده با 2 درصد نانو ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> دارای خواص بهتر نسبت به سایر کامپوزیت‌های تولیدی می‌باشند. در پژوهشی دیگر، الکادی و فتحی [6] اثر اندازه ذرات تقویت کننده SiC (با اندازه ذره‌ی 40 میکرومتر، 10 میکرومتر و 70 نانومتر و در 5 و 10 درصد وزنی) بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم را مورد بررسی قراردادند. ایشان از اکستروژن گرم برای ساخت نمونه‌ها استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده رسانایی حرارتی و اندازه دانه‌ها کاهش و سختی و استحکام افزایش می‌یابد. از دلایل استفاده از نانوذرات SiC به عنوان فاز تقویت کننده می‌توان به خواص خوب آن از جمله دمای ذوب بالا، چگالی پایین، سختی بالا، استحکام بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی بالا و مدول الاستیک بالا اشاره کرد [1].

به دلیل گستردگی کاربرد نانوکامپوزیت‌ها در محیط‌های مختلف بسیار لازم است که رفتار این مواد در دماهای بالاتر از محیط نیز تعیین گردد. به دلیل روش‌های ساخت مورد استفاده در تهیه نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، در اغلب مواقع رفتار فشاری این مواد مورد بررسی قرار گرفته است [7,8] و کمتر به مطالعه رفتار کششی آن‌ها در دمای بالا پرداخته شده است [9,10]. همچنین می‌توان گفت، لزوم انجام این تحقیق روی نانوکامپوزیت مذکور پیش‌بینی و بهبود شرایط برای کاربرد آن در دماهای بالا می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق از روش اکستروژن گرم که امکان تهیه نمونه‌هایی به طول مناسب را فراهم می‌آورد، استفاده شده است. در این جا لازم است به این مطلب اشاره شود که اگر چه فلزات نانو ساختار استحکام بسیار بالایی داشته و بسیار سبک هستند، اما یکی از مشکلات اصلی این فلزات، انعطاف‌پذیری بسیار پایین آن‌ها در مقایسه با فلزات درشت دانه می‌باشد. کم بودن انعطاف پذیری این نوع ساختار به محدود شدن حرکت نابجایی‌ها نسبت داده می‌شود [9].

<sup>1</sup> Orowan

از 1 درصد وزنی اسید استتاریک نیز به عنوان کنترل کننده فرایند<sup>1</sup> آسیاب کاری استفاده کردید. همچنین برای یکسان بودن شرایط زمینه نمونه‌ها، آلومینیوم خالص نیز آسیاب گردید. شرایط آسیاب کاری در جدول 1 آورده شده است.

پس از طی مراحل آماده سازی پودر نوبت به شکل دهی اولیه پودرها و سپس فرایند تکمیلی اکستروژن گرم می‌رسد. برای شکل گیری اولیه پودرها از فرایند پرس سرد تحت فشار 400 مگاپاسکال و مدت زمان 5 دقیقه استفاده گردید. مرحله سوم تولید نانوکامپوزیت، فرایند اکستروژن گرم می‌باشد. پس از آماده سازی نمونه پرس شده، حال نوبت به انجام فرایند تکمیلی اکستروژن گرم می‌رسد [10]. شرایط اکستروژن گرم در جدول 2 آمده است. شکل 2 نیز تصویر شماتیک قالب های شکل دهی و اکستروژن گرم را نمایش می‌دهد.

### 2-1- تعیین خواص نمونه ها

ریز ساختار نمونه‌های کامپوزیتی به دست آمده و نحوه توزیع نانوذرات سرامیکی در زمینه به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> (SEM) مشاهده شد.

جدول 1 شرایط آسیاب کاری

Table 1 Milling conditions

مقدار	پارامتر
10	نسبت جرم گلوله به پودر
10 mm	قطر گلوله ها
360 rpm	سرعت آسیاب
12 h	مدت زمان آسیاب
گاز آرگون (خلوص 99.99%)	اتمسفر آسیاب
1 درصد وزنی اسید استتاریک	عامل کنترل کننده فرایند

جدول 2 شرایط انجام اکستروژن گرم

Table 1 Hot extrusion conditions

مقدار	پارامتر
500 C	دمای اکستروژن
30 ton	نیروی اکستروژن Al
43 ton	نیروی اکستروژن Al+1.5%SiC
54 ton	نیروی اکستروژن Al+3%SiC
5 mm/s	سرعت اکستروژن
مولیکوت 1000	روانکار
9	نسبت اکستروژن
1/5 h	مدت زمان گرم شدن قالب
دایره	مقطع اکستروژن

خلوص 99/6 درصد، اندازه کمتر از 100 میکرومتر) به عنوان زمینه و از نانو ذرات سرامیکی کاربید سیلیکون (مورفولوژی کروی، اندازه ذرات حدود 50 نانومتر) به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. مورفولوژی ذرات پودرهای تهیه شده در شکل 1 قابل مشاهده می‌باشد. در مرحله فرآوری پودر که یکی از حیاتی ترین مراحل متالورژی پودر می‌باشد، ابتدا پودرها با استون شسته شدند و پس از آن مخلوطی از پودر و استون درون حمام اولتراسونیک به مدت 2 ساعت قرار گرفت و پس از آن توسط خشک کن در دمای 80 درجه سانتی گراد خشک گردید. حال نوبت به مخلوط سازی یا همان آسیاب کاری مکانیکی پودرهای زمینه و تقویت کننده می‌رسد. آسیاب کاری مکانیکی یک فرایند پودر حالت جامد است که شامل تکرار، تغییر فرم، شکست و دوباره جوش خوردن ذرات پودر می‌باشد [17].

در مرحله آسیاب کاری، مخلوط پودرها به مدت 12 ساعت توسط آسیاب سایشی و با گلوله‌های فولادی به قطر 10 میلی متر و نسبت جرم گلوله به پودر 10 به 1 آسیاب گردید. در تمام مدت انجام آسیاب، گاز آرگون به صورت مداوم درون محفظه آسیاب دمیده می‌شد و نیز در طول این مدت برای جلوگیری از گرم شدن پودرها و انجام واکنش‌های ناخواسته، آب از طریق آب‌گرد به دور محفظه گردش می‌کرد.

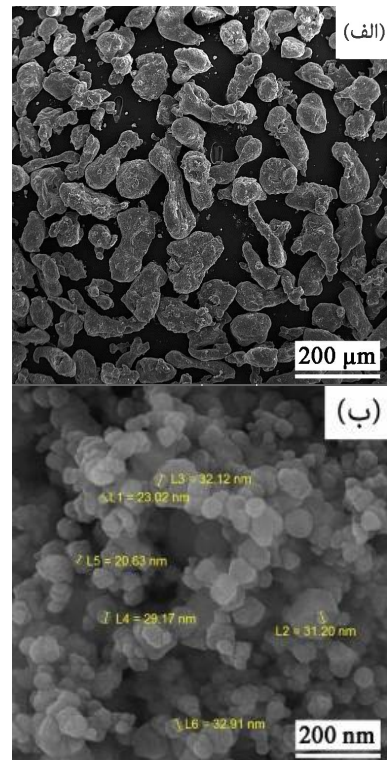


Fig. 1 Morphology of Al particles (a) and SiC nano particles

شکل 1 (الف) مورفولوژی ذرات آلومینیوم و (ب) نانو ذرات سیلیکون کاربید خالص (تصاویر FESEM)

<sup>1</sup> Process control agent (PCA)

<sup>2</sup> Scanning electron microscopy (SEM)

سانتی متر مکعب محاسبه گردید.

$$\rho_{\text{theory}} = (v_r \times \rho_r) + [(1 - v_r) \times \rho_m] \quad (1)$$

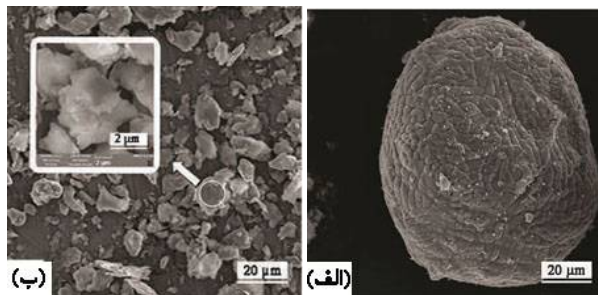


Fig. 3 SEM micrograph of nanocomposite powders, (a) pure Al powder before milling, (b) pure AL powder after milling

شکل 3 تصویر SEM پودرهای نانوکامپوزیت، (الف): پودر آلومینیوم خالص قبل از آسیاب کاری، (ب): پودر آلومینیوم خالص پس از آسیاب کاری

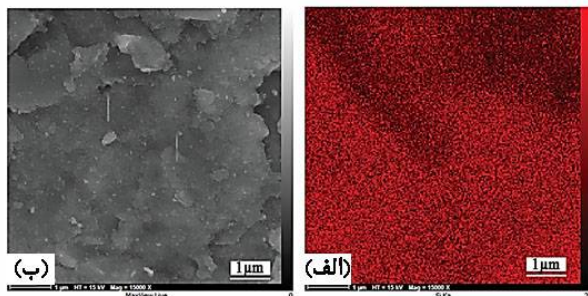


Fig. 4 Nano particles distribution in Al matrix after mechanical milling for Al-3 vol% SiC (obtained by X-Ray Map)

شکل 4 توزیع نانوذرات تقویت کننده در زمینه آلومینیوم توسط X-Ray Map پس از آسیاب کاری مکانیکی برای Al-3%SiC

همان طور که نتایج نشان می دهد، فرایند تولیدی شامل پرس سرد و اکستروژن گرم موجب خارج شدن هوای محبوس و از بین رفتن حفره ها می شود و چگالی را به حد تئوری بسیار نزدیک می سازد. مشخص است که رفتار کاهش چگالی با بالا رفتن فاز دوم در نمونه های تولیدی رخ داده است که این امر توسط عطریان و همکاران [3] نیز به دست آمده است. رحیم نژاد یزدی و همکاران [4] نیز به این نتیجه دست یافته اند که چگالی نسبی نانوکامپوزیت Alumina-SiC با افزایش مقدار کاربرد سیلیکون کاهش می یابد. کاهش چگالی نسبی نمونه تقویت شده نسبت به نمونه آلومینیومی در شکل 5 نشان داده شده است.

### 3-3- بررسی رفتار کششی دما بالا

همان طور که از نتایج بر می آید، با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاربرد سیلیکون استحکام نهایی کششی در همه دماها افزایش یافته است (شکل 6).

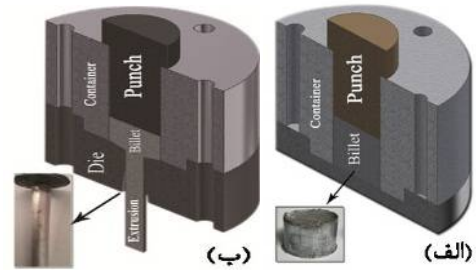


Fig. 2 Die set for (a) cold pressing and (b) extrusion processes

شکل 2 قالب (الف) فرایند پرس سرد و (ب) فرایند اکستروژن

پس از انجام فرایند اکستروژن و ساخت نمونه ها، نمونه های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8 آماده سازی و توسط دستگاه کشش تک محوره 5 تن Hounsfield با سرعت 3 میلی متر بر دقیقه و نرخ کرنش  $0/001 \text{ S}^{-1}$  در دمای اتاق و دماهای 170 و 270 درجه سانتی گراد آزمایش شدند. لازم به ذکر است آزمون کشش در دمای محیط برای اطمینان از نتایج، 3 مرتبه تکرار شد. چگالی نمونه های تولید شده توسط روش ارشمیدس [12,11,8,7] محاسبه گردید و چگالی تئوری نیز از قانون مخلوطها محاسبه گردید. چگالی نسبی نمونه ها نیز از نسبت چگالی اندازه گیری شده به روش ارشمیدس به چگالی تئوری نمونه ها محاسبه می گردد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- خصوصیات پودر نانوکامپوزیت

در شکل 3 تصویر SEM پودر آلومینیوم خالص قبل و پس از آسیاب کاری به مدت 12 ساعت و با سرعت 360 دور بر دقیقه در بزرگنمایی یکسان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، قبل از انجام فرایند آسیاب کاری، یک ذره آلومینیوم در بزرگنمایی 20 میکرومتر و با مورفولوژی تقریباً کروی دیده می شود و در همین بزرگنمایی پس از آسیاب، ریز شدن دانه های آلومینیوم و ورقه ای شدن آن ها مشهود است.

در شکل 4 پراکندگی نانوذرات SiC بر روی زمینه آلومینیوم توسط تحلیل X-Ray Map قابل مشاهده می باشد که نشان دهنده توزیع مناسب نانوذرات تقویت کننده می باشد و این امر تأیید کننده روند مناسب فرآوری پودر برای این نانوکامپوزیتها است.

#### 3-2- چگالی

با توجه به رابطه (1) و داشتن مقادیر چگالی آلومینیوم و SiC (به ترتیب برابر 2/7 و 3/22 گرم بر سانتی متر مکعب)، چگالی تئوری نانوکامپوزیت های Al-3 vol% SiC برابر 2/752 گرم بر

ذرات کاهش و توزیع همگن ذرات تقویت کننده حاصل گردید. نمودار تنش- کرنش نانوکامپوزیتهای تولیدی با کسر حجمی متفاوت از نانوذرات تقویت کننده در هر دما در شکل 6 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودار تنش- کرنش هر کدام از نمونه‌ها در دماهای مختلف نیز در شکل 7 ارائه گردیده است.

با افزایش زمان آسیاب کاری، پودرهای کروی به خاطر نیروی فشاری وارد بر آنها کشیده می‌شوند و در ادامه، ذرات کارسخت می‌شوند که بالا بودن میزان کارسختی نیز می‌تواند یکی از دلایل بالا بودن استحکام باشد. به بیان دیگر، ایجاد کرنش در فصل مشترک ذره با زمینه موجب تولید نابجایی‌های بیشتر در کامپوزیت‌ها شده، ضمن این که خود ذرات موانعی برای حرکت نابجایی‌ها به شمار می‌آیند و نرخ کارسختی را افزایش می‌دهند که باعث افزایش استحکام کششی می‌شود [18]. پژوهش‌گران بیان کرده‌اند که در حین فرایند تغییر شکل، کلیه تنش‌ها از زمینه آلومینیوم به ذرات کاربید سیلیکون که دارای مدول الاستیک بالا می‌باشند، انتقال خواهد یافت و این باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی می‌شود [20,19].

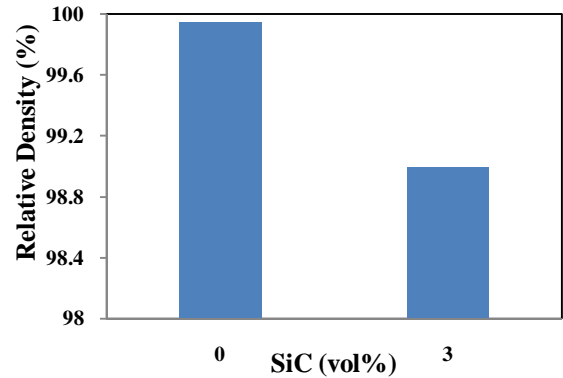


Fig. 5 Variation of relative density versus SiC volume fraction

شکل 5 تغییرات چگالی نسبی نانوکامپوزیت های تولیدی با افزایش SiC

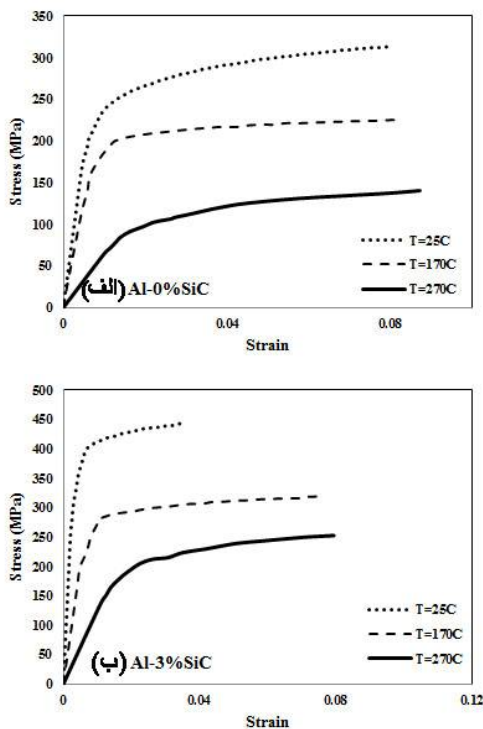


Fig. 7 Comparison of stress-strain curves for different temperature; (a) Al, (b) Al-3 vol% SiC

شکل 7 مقایسه نمودار تنش- کرنش کششی هر کدام از نانوکامپوزیت‌ها با افزایش دما

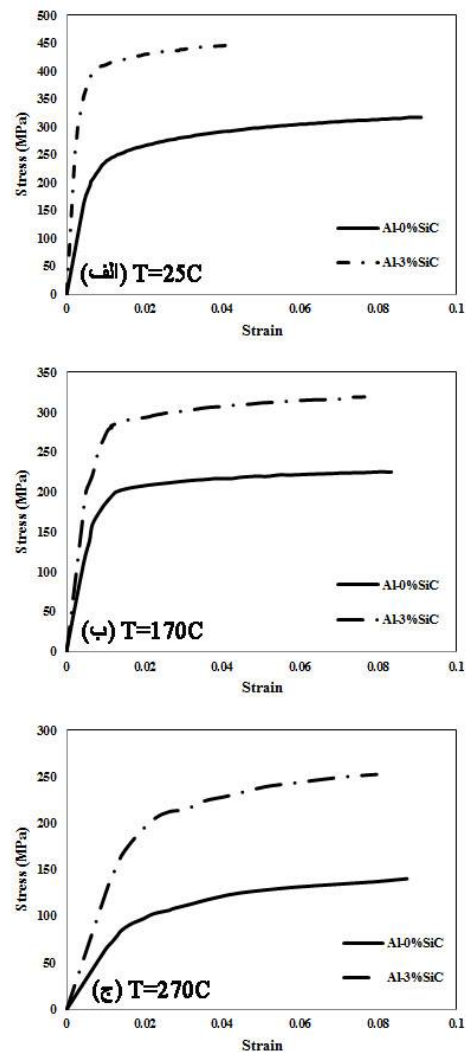


Fig. 6 Tensile stress-strain curve of fabricated samples at (a) 25 °C, (b) 170 °C, and (c) 270 °C

شکل 6 نمودار تنش- کرنش کششی نانوکامپوزیت های تولیدی با کسر حجمی متفاوت از نانوذرات تقویت کننده در هر دما

به طور کلی استحکام بالای به دست آمده برای نمونه‌ها به مناسب بودن فرایند آسیاب کاری باز می‌گردد که پیرو آن اندازه

علاوه بر این، اختلاف ضرایب انبساط گرمایی ذرات تقویت

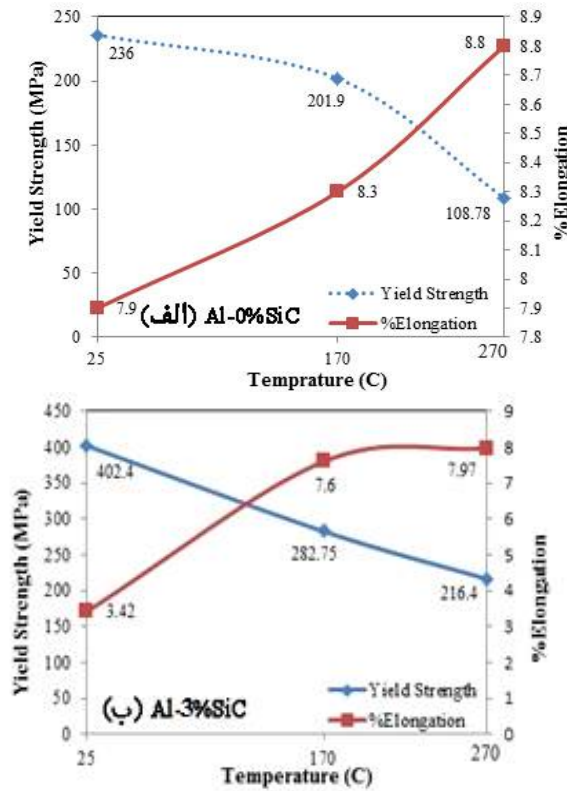


Fig. 9 Variation of yield stress and elongation against temperature rise; (a) Al, (b) Al-3 vol% SiC

شکل 9 تغییرات استحکام تسلیم و ازدیاد طول با افزایش دما؛ (الف) Al، (ب) Al-3 vol% SiC

همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود استحکام کششی با افزایش دما برای هر دو نمونه تولیدی کاهش یافته است، اما نکته قابل توجه در روند تغییرات استحکام این است که در هر حال نانوکامپوزیت‌های تولیدی دارای استحکام بیشتری نسبت به نمونه‌های تقویت نشده می‌باشند. برخی از محققان عوامل این پدیده را این‌گونه بیان کرده‌اند که با افزایش دما زمینه نرم‌تر شده است و تمرکز تنش‌هایی در اطراف ذرات به دلیل مقادیر مختلف ضرایب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده به وجود می‌آید که این اتفاق نسبت به دمای اتاق راحت‌تر رخ می‌دهد [21]. اونورو [15] علت بیشتر بودن استحکام دما بالا در کامپوزیت‌های تولیدی خود (Al-B<sub>4</sub>C) نسبت به حالت غیرکامپوزیتی را به خاطر حضور ذرات تقویت کننده می‌داند که از طریق انتقال نیرو به ذرات صورت می‌گیرد. همچنین، علت افزایش بیشتر استحکام کامپوزیت‌ها را نیز ذرات تقویت کننده می‌داند که در دماهای بالا مانع از درشت شدن دانه‌ها می‌شوند [21]. عطریان و همکاران [4,3] در پژوهش خود بیان کردند که تاثیرات چشم‌گیر نانوذرات تقویت کننده بر استحکام کامپوزیت‌ها به دلایل زیر می‌باشد:

کننده و زمینه موجب تولید نابجایی‌های بیشتر می‌شود که خود از عواملی است که به‌خصوص در دماهای بالا مقاومت مکانیکی مناسب به کامپوزیت می‌بخشد. دلیل این اتفاق حرکت نابجایی‌ها و قفل شدن آنها در یکدیگر بوده که تغییر شکل بیشتر ماده را مشکل‌تر کرده و در نهایت منجر به افزایش استحکام ماده می‌گردد [21]. همچنین، عامل دیگری که می‌تواند در افزایش استحکام نمونه‌های تهیه شده با روش اکستروژن گرم موثر باشد را مربوط به اکسید شدن سطح دانه‌های پودری آلومینیوم می‌دانند. به این معنا که با پیش گرم کردن نمونه‌ها در دمای بالا، ضخامت لایه‌های اکسیدی روی سطح ذرات پودر آلومینیوم افزایش می‌یابد که این لایه‌های اکسیدی حین فرایند اکستروژن خرد و در زمینه توزیع می‌شود و خود عامل دیگری برای افزایش استحکام به حساب می‌آید [10]. ضمناً، براساس رابطه هال-پیچ<sup>1</sup> اندازه دانه‌ها با تنش تسلیم رابطه عکس دارند. رفتار هال-پیچ که استحکام بخشی مرز دانه‌ای نیز نامیده می‌شود، به پدیده افزایش تنش تسلیم مواد با کاهش اندازه دانه‌ی آنها گفته می‌شود. طبق این رابطه، با کاهش اندازه دانه‌ها تنش تسلیم افزایش پیدا می‌کند. تحلیل فیزیکی این مسئله به این صورت است که ساختارهای دانه ریز به ویژه مواد نانوساختار مرز دانه‌های بسیار زیادی دارند. از آنجایی که مرز دانه‌ها به عنوان مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند، چگالی نابجایی‌ها به تدریج در پشت مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد و به همین دلیل استحکام افزایش یافته و انعطاف‌پذیری کاهش پیدا می‌کند. نمودار تغییرات استحکام نهایی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش دما در شکل 8 آمده است. در شکل 9 نیز روند تغییرات استحکام تسلیم و ازدیاد طول با افزایش دما ارائه شده است.

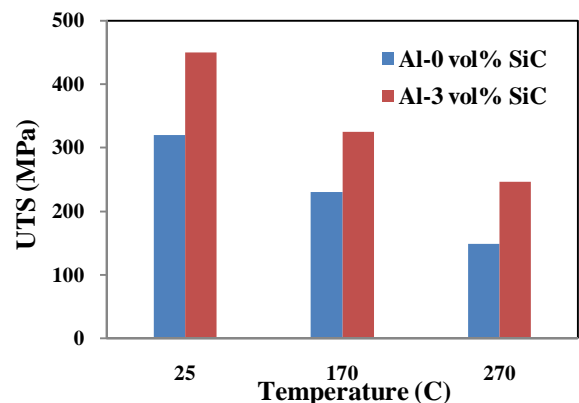


Fig. 8 Variation of ultimate tensile strength (UTS) against temperature rise

شکل 8 تغییرات استحکام نهایی کششی با افزایش دما

<sup>1</sup> Hall-Petch

نانوکامپوزیت تولیدی به روش اکستروژن گرم پرداخته شد، نتایج زیر حاصل گردید:

- استحکام نهایی کششی نانوکامپوزیت Al-SiC در دمای محیط با افزایش کسر حجمی نانوذرات تقویت کننده (از 0 به 3 درصد حجمی) 40 درصد افزایش داشت.

- ازدیاد طول نانوکامپوزیت‌های تولیدی در دمای محیط با افزایش کسر حجمی نانوذرات تقویت کننده کاهش یافت. مقدار این پارامتر از 7.9 درصد برای Al-0 vol% SiC به 3.4 درصد برای Al-3 vol% SiC رسیده است.

تقویت شده و تقویت نشده کاهش یافت. به طور نمونه، استحکام کششی نمونه SiC Al-0 vol% از 320 مگاپاسکال در دمای محیط به 149 مگاپاسکال در دمای 270 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت.

- توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه آلومینیومی در زمان 12 ساعت و 30 دقیقه آسیاب کاری مکانیکی با آسیاب سایشی حاصل گردید.

- چگالی نسبی نمونه‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات از حدود 99.98% برای آلومینیوم تقویت نشده به 99.02% برای نانوکامپوزیت تقویت شده با 3% حجمی کاربید سیلیکون کاهش یافت.

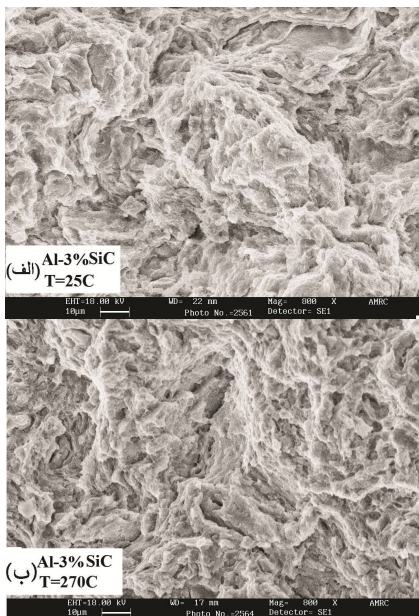


Fig. 10 SEM fractograph of Al-3 vol% SiC sample at (a) room temperature and (b) T=270 °C

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقاطع شکست نمونه‌های کششی Al-3 vol% SiC در دماهای محیط و 270 درجه سانتی‌گراد

- عدم انطباق حرارتی یا همان استحکام بخشی به دلیل چگالی افزایش یافته نابعایی‌ها (به دلیل ضرایب انبساط حرارتی متفاوت آلومینیوم و کاربید سیلیکون). پیرو این پدیده، چگالی نابعایی‌ها در سطوح مشترک Al-SiC افزایش یافته و در برابر تغییر شکل بیشتر مقاومت می‌کند که در نهایت افزایش استحکام نانوکامپوزیت را به دنبال خواهد داشت [22].

- استحکام بخشی اوروان [18].

- تئوری هال- پیچ که بیان‌گر افزایش استحکام به دلیل ریزش اندازه دانه‌ها می‌باشد [21].

- اثرات تاخیر برشی و تحمل بار.

از بررسی نمودارهای تنش- کرنش نانوکامپوزیت‌های ساخته شده مشاهده می‌شود که رفتار هر سه نمونه ترد می‌باشد که دلیل این امر را همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز به آن اشاره شد می‌توان ریز شدن دانه‌ها در اثر آسیاب کاری و همچنین وجود نانوذرات سرامیکی و سخت کاربید سیلیکون دانست.

### 3-4- شکست نگاری

شکست، جدایش یا تقسیم شدن یک جسم جامد به دو یا چند قسمت در اثر اعمال تنش تعریف می‌شود. فرایند شکست شامل دو مرحله جوانه‌زنی ترک<sup>1</sup> و گسترش ترک<sup>2</sup> می‌شود. نوع شکست به چند عامل مانند نوع ماده، دما، شرایط تنش و سرعت بارگذاری بستگی دارد [10]. در شکل‌های 10 (الف و ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقاطع شکست نمونه‌های حاصل از انجام آزمون کشش برای Al-3 vol% SiC در دماهای محیط و 270 درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌گردد. انتظار می‌رود پس از افزایش دما که موجب نرم‌تر شدن رفتار تغییرشکلی ماده می‌گردد، در سطح شکست نیز نشانه‌های تغییر شکل نرم خود را به صورت دیمپل نشان دهد. ولی، همان‌گونه که از این تصاویر بر می‌آید سطوح شکست نانوکامپوزیت Al-3 vol% SiC در دمای محیط و دمای 270 درجه سانتی‌گراد فاقد دیمپل بوده و بیشتر رفتاری ترد را نشان می‌دهد. دلیل این امر تقویت آلومینیوم به کمک سه درصد نانوذره SiC است که به خودی خود ماده را تردتر کرده و به افزایش دما کمتر مجال خودنمایی می‌دهد.

### 4- نتایج

در این پژوهش که به بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و خواص کششی در دماهای بالاتر از دمای محیط برای

### 5- مراجع

[1] D. Božić, M. Vilotijević, V. Rajković, Ž. Gnjidić,

<sup>1</sup> Crack nucleation

<sup>2</sup> Crack propagation

- [12] E.M. Sharifi, F. Karimzadeh, M. Enayati, Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites, *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 3263-3271, 2011.
- [13] N. Han, Z. Wang, G. Zhang, Effect of reinforcement size on the elevated-temperature tensile properties and low-cycle fatigue behavior of particulate SiC/Al composites, *Composites science and technology*, Vol. 57, pp. 1491-1499, 1997.
- [14] G. Rajaram, S. Kumaran, T.S. Rao, High temperature tensile and wear behaviour of aluminum silicon alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 247-253, 2010.
- [15] J. Onoro, M. Salvador, L. Cambroner, High-temperature mechanical properties of aluminium alloys reinforced with boron carbide particles, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 499, pp. 421-426, 2009.
- [16] S. Kamrani, R. Riedel, S.S. Reihani, H. Kleebe, Effect of reinforcement volume fraction on the mechanical properties of Al-SiC nanocomposites produced by mechanical alloying and consolidation, *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 3, pp. 313-326, 2009.
- [17] S. Khadem, S. Nategh, H. Yoozbashizadeh, Structural and morphological evaluation of Al-5vol.% SiC nanocomposite powder produced by mechanical milling, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 2221-2226, 2011.
- [18] V. Nardone, K. Prewo, On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites, *Scripta Metallurgica*, Vol. 20, pp. 43-48, 1986.
- [19] A. Canakci, Microstructure and abrasive wear behaviour of B4C particle reinforced 2014 Al matrix composites, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, pp. 2805-2813, 2011.
- [20] L. Ceschini, G. Minak, A. Morri, Tensile and fatigue properties of the AA6061/20vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AA7005/10vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 333-342, 2006.
- [21] G. Majzoobi, A. Atrian, M. Pipelzadeh, Effect of densification rate on consolidation and properties of Al7075-B4C composite powder, *Powder Metallurgy*, Vol. 58, pp. 281-288, 2015.
- [22] G. Majzoobi, H. Bakhtiari, A. Atrian, M. Pipelzadeh, S. Hardy, Warm dynamic compaction of Al6061/SiC nanocomposite powders, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 230, pp. 375-387, 2016.
- Mechanical and fracture behaviour of a SiC-particle-reinforced aluminum alloy at high temperature, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, 2005, pp. 487-492.
- [2] [M. Mohajer, B. Mirzakhani, M. Modabberifar, H. Momeni, Improvement in mechanical properties of 2024 Al alloy through combination of heat treatment and cold rolling, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, pp. 19-25, 2016 (in Persian).
- [3] A. Atrian, G. Majzoobi, S. Nourbakhsh, S. Galehdari, R.M. Nejad, Evaluation of tensile strength of Al7075-SiC nanocomposite compacted by gas gun using spherical indentation test and neural networks, *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, pp. 1821-1827, 2016.
- [4] A. Atrian, G. Majzoobi, M. Enayati, H. Bakhtiari, A comparative study on hot dynamic compaction and quasi-static hot pressing of Al7075/SiC np nanocomposite, *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, pp. 73-82, 2015.
- [5] R. Senthilkumar, N. Arunkumar, M.M. Hussian, A comparative study on low cycle fatigue behaviour of nano and micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced AA2014 particulate hybrid composites, *Results in Physics*, Vol.5, pp. 1273-280, 2015.
- [6] O. El-Kady, A. Fathy, Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites, *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 348-353, 2014.
- [7] A. Atrian, G. Majzoobi, M. Enayati, H. Bakhtiari, Mechanical and microstructural characterization of Al7075/SiC nanocomposites fabricated by dynamic compaction, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 21, pp. 295-303, 2014.
- [8] G. Majzoobi, A. Atrian, M. Enayati, Tribological properties of Al7075-SiC nanocomposite prepared by hot dynamic compaction, *Composite Interfaces*, Vol. 22, pp. 579-593, 2015.
- [9] S. Hassan, M. Tan, M. Gupta, High-temperature tensile properties of Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 486, pp. 56-62, 2008.
- [10] S. Sattari, A. Atrian, Effects of the deep rolling process on the surface roughness and properties of an Al-3vol%SiC nanoparticle nanocomposite fabricated by mechanical milling and hot extrusion, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 24, pp. 814-825, 2017.
- [11] A.R. Yazdi, H. Baharvandi, H. Abdizadeh, J. Purasad, A. Fathi, H. Ahmadi, Effect of sintering temperature and silicon carbide fraction on density, mechanical properties and fracture mode of alumina-silicon carbide micro/nanocomposites, *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 251-255, 2012.