مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 361-368

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر درصد نانو SiC و دما بر رفتار دینامیکی و استاتیکی نانوکامپوزیت Mg-SiC ساخته شده با متالورژی پودر

کاوه رحمانی[1]، غلامحسین مجذوبی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2 - استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
*همدان، صندوق پستی 651754161، gh_majzoobi@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 دی 1396
پذیرش: 26 بهمن 1396
ارائه در سایت: 11 اسفند 1396

کلید واژگان:
نانوکامپوزیت منیزیم
تراکم شبه‌استاتیکی
خواص مکانیکی
میله هاپکینسون فشاری

چکیده

در این مطالعه روش متالورژی پودر بر پایه تراکم شبه‌استاتیکی برای تولید نانوکامپوزیت Mg-SiC به کار گرفته شده است. جهت ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی از درصد حجمی مختلفی از نانو SiC به عنوان فاز تقویت‌کننده و پودر منیزیم با سایز میکرون به عنوان زمینه استفاده شده است، سپس مخلوط پودر برای هر درصد SiC به صورت مکانیکی آسیاب شده است. پودر مخلوط در یک قالب ریخته می‌شود و با استفاده از دستگاه اینسترون در دماهای مختلف متراکم می‌گردد. MoS_2 به عنوان روان‌کار برای کاهش اصطکاک بین نمونه ساخته شده و قالب استفاده شده است. افزایش دما منجر به بهبود تف‌جوشی موردنیاز شده که باعث تولید نمونه‌های ساخته شده با کیفیت بالا می‌شود. چگالی، سختی و استحکام فشاری در نرخ کرنش‌های بالا و پایین برای نمونه های فشرده در درصددهای مختلف SiC و دماهای 25، 250 و 450 درجه سانتی‌گراد مقایسه گردید. مشخص شد که با افزایش درصد نانو ذره، چگالی نسبی نمونه‌های فشرده کاهش می‌یابد، در حالی که میکرو سختی و استحکام نمونه‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهد. علاوه‌بر این دمای بالا منجر به افزایش تراکم و کاهش سختی می‌شود، همچنین نتایج حاصل از آزمایش فشار دینامیکی و استاتیکی نشان داد که نمونه‌های نانو کامپوزیت تولید شده در نرخ کرنش‌های بالا خواص بهتری از خود نشان می‌دهند به گونه‌ای که استحکام دینامیکی 55% بیشتر از استحکام شبه‌استاتیکی است.

An investigation on SiC volume fraction and temperature on static and dynamic behavior of Mg-SiC nanocomposite fabricated by powder metallurgy

Kaveh Rahmani, Gholam Hossein Majzoobi*

Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
* P.O.B. 651754161, Hamedan, Iran, gh_majzoobi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 January 2017
Accepted 15 February 2018
Available Online 02 March 2018

Keywords:
Mg-SiC nanocomposite
Quasi-static compaction
Mechanical properties
Split Pressure Hopkinson Bar

ABSTRACT

In this study, quasi-static compaction is employed to produce Mg-SiC nanocomposite samples. Different volume fractions of SiC nano reinforcement and micron-size magnesium (Mg) powder as the matrix are used to fabricate nanocomposite specimens. The powder mixture for each percent of SiC are mechanically milled. The mixed powder is then placed into a mold and is consolidated at different temperatures using Instron machine. MoS2 is utilized as a lubricant to decrease the friction between the fabricated specimen and the mold. It is found that with the increase of temperature the sintering requirements is met and higher quality samples are fabricated. The density, hardness, compressive strength in high and low strain rate of the compacted specimens are compared for different volume faction of SiC at 25, 250 and 450 ºC. It was found that by increasing the content of nano reinforcement, the relative density of the compacted samples decreases, whereas, the micro-hardness and the strength of the samples enhance. Furthermore, higher densification temperatures lead to density increase and hardness reduction. Additionally, it is shown that the compressive strength at high strain rate compared to low strain rate is significantly improved by increasing the SiC nano reinforcement so that dynamic strength for the same level of SiC was 55% higher than the quasi-static strength.

1- مقدمه

منیزیم و آلیاژهای آن یکی از سبک‌ترین فلزات با استحکام ویژه (نسبت استحکام به وزن) بالاست. به جهت سبک بودن و خواص مناسب منیزیم مورد توجه بسیاری از صنایع خودروسازی و هوایی قرارگرفته است [1]. با این وجود منیزیم به صورت خالص دارای استحکام زیادی نبوده و به تنهایی نمی‌تواند در قطعات حساس مورد استفاده قرار گیرد، چرا که خواص مکانیکی و مقاومت در برابر سایش و خوردگی آن قابل ملاحظه نیست [2]؛ به همین دلیل کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها با زمینه منیزیم جهت مرتفع ساختن این مشکل معرفی شده‌اند. کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی که در آن از مواد سرامیکی جهت فاز تقویت‌کننده استفاده شده است علاوه‌بر بهبود خواص

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

K. Rahmani, Gh. H. Majzoobi, An investigation on SiC volume fraction and temperature on static and dynamic behavior of Mg-SiC nanocomposite fabricated by powder metallurgy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 361-368, 2018 (in Persian)

مکانیکی باعث می‌شود تا استحکام ماده در دماهای بالا نیز حفظ گردد [3].

تحقیقات بسیاری نشان داده است که خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی بهبود فراوانی یافته‌اند که با نانو ذرات سرامیکی تقویت شده‌اند [4]. SiC در بین نانو سرامیک‌ها به طور وسیعی در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [4]. روش‌های متعددی از جمله متالورژی پودر [5]، اکستروژن گرم [6]، پرس سرد به همراه تف جوشی معمولی [7] و ریخته‌گری انقباضی [8] جهت تولید منیزیم تقویت شده با نانو ذرات وجود دارد. ساخت نانو کامپوزیت‌ها به روش متالورژی پودر در مقایسه با دیگر روش‌ها از مزیت‌های زیادی برخوردار است. همین نکته موجب گسترش این روش نسبت به دیگر روش‌ها شده است [9].

جانگ و همکاران [10] به بررسی مزیت‌های تولید نانو کامپوزیت پایه منیزیم ساخته شده به روش متالورژی پودر پرداختند. نامبردگان روشی مقرون به صرفه و ساده بر پایه متالورژی پودر را توسعه دادند. فرانسیس و همکاران [7] به بررسی اثر تف جوشی در فرایند تولید نانو کامپوزیت پایه منیزیم با ذرات خواهد یافت. تاکور و همکاران [11] نسبت وزنی ذرات تقویت‌کننده سرامیکی در بستر منیزیمی را بررسی کردند. محققین جهت یافتن بهترین درصد نانو ذره از مقایسه نتایج آزمایشگاهی مکانیکی و میکرو ساختار بهره بردند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تولید مواد به روش متالورژی پودر دمای کاری فرایند تولید است [12]. عطریان و همکاران [14,13] و مجذوبی و همکاران [15,12] به بررسی اثر دما در ساخت نمونه‌ها نانو کامپوزیت پایه منیزیم پرداختند. نتایج نشان داد که متراکم‌سازی پودر در دما و نرخ کرنش بالا چگالی نسبی بالاتری را نسبت به فشرده‌سازی در دمای اتاق و به صورت استاتیکی به همراه خواهد داشت، همچنین افزایش سختی نمونه‌های تولیدی در شرایط یادشده نیز گزارش شده است.

در این پژوهش از روش تراکم شبه‌استاتیکی گرم پودر برای ساخت نانو کامپوزیت‌های پایه منیزیم با ذرات تقویت‌کننده SiC استفاده می‌شود. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر هم‌زمان دمای فرآیند تراکم و درصد نانو ذرات SiC بر چگالی، میکرو سختی و رفتارهای فشاری ماده تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی است.

2- مواد و آزمایش‌ها

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت تولید نمونه‌ها از پودر منیزیم با خلوص 99.5% با میانگین اندازه ذرات µm100 با مورفولوژی نامنظم (ساخت شرکت مرک آلمان) به عنوان زمینه و نانو ذرات SiC با خلوص 99% با میانگین اندازه ذرات 75nm با مورفولوژی کروی (ساخت آمریکا) به عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به ترتیب برای منیزیم و SiC در شکل 1 نشان داده شده است.

به منظور تهیه پودر نانو کامپوزیت برای تولید نمونه‌ها، پودر منیزیم به ترتیب با درصد حجمی‌های 0، 1.5، 3، 5 و 10 نانو ذرات SiC (به ترتیب 17, 8.8, 5.4, 2.7, 0 درصد جرمی نانوذره SiC) ترکیب شد. سپس مخلوط به‌دست‌آمده در هر درصد به منظور جلوگیری از کلوخه‌ای شدن نانو ذرات و ایجاد ترکیب یکنواخت، درون محلول اتانول حل شده و به مدت 20 دقیقه تحت اولتراسونیک قرار گرفت. پس از خشک شدن پودر برای توزیع مناسب نانو ذرات، 35 گرم از هر مخلوط پودری به همراه 0.5 درصد وزنی اسید استاریک به مدت 1 ساعت و با سرعت 200 دور بر دقیقه در حضور گاز آرگون آسیاب شد. آسیاب از نوع سیاره‌ای شامل 22 ساچمه از جنس فولاد کروم سخت شده با قطر 10 میلی‌متر در یک محفظه 125 میلی‌لیتری است.

2-2- ساخت نمونه‌ها

به منظور فشرده‌سازی شبه‌استاتیکی پودر، 3.5 گرم از پودر با چگالی ظاهری نزدیک به 55% چگالی تئوری با استفاده از روان‌کار دما بالای MoS2 از دستگاه اینسترون استفاده شده است. امکان کنترل و اندازه‌گیری سرعت، نیرو و جابه‌جایی فک متحرک از قابلیت‌های این دستگاه است. فشرده‌سازی شبه‌استاتیکی با نرخ کرنش $0.008\ s^{-1}$ انجام می‌شود. دمای مورد نیاز در تراکم گرم توسط یک المنت حرارتی با توان W1200 تأمین می‌گردد که محیط خارجی قالب را دربرمی‌گیرد. دمای قالب توسط یک دماسنج سنجیده شده (اختلاف دمای اندازه‌گیری شده بین پودر و بدنه قالب در حدود 5-10° C است) و اعمال فشار روی پودر پس از رسیدن به دمای مورد نظر در حالت پایدار انجام می‌شود.

پیش از فشرده‌سازی پودرها لازم است ابتدا شرایط بهینه آن به دست آید، به طوری که بیشترین میزان تراکم حاصل شود. در مرحله اول اثر پارامترهایی نظیر فشار و مدت‌زمان اعمال آن بر تراکم پودر مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا هشت نمونه منیزیم خالص بدون تقویت‌کننده در دمای 450 درجه سلسیوس به ترتیب تحت فشار 300 و 600 مگاپاسکال و مدت زمان 5، 15، 25 و 30 دقیقه فشرده شدند. نتایج نشان داد که فشار 600 مگاپاسکال و زمان 25 دقیقه منجر به بیشترین چگالی نسبی می‌شود. این زمان به منظور ایجاد فرصت مناسب جهت تغییر شکل ذرات و توزیع یکنواخت دما در سراسر پودر در حالت پایا در نظر گرفته شده است. در نهایت نمونه‌های استوانه‌ای (به طول 11-12 میلی‌متر و قطر 15 میلی‌متر) در سه دمای 25، 250 و450° C و پنج مقدار 10, 5, 3, 1.5, 0 درصد حجمی SiC ساخته شدند. بیشترین دمای در نظر گرفته شده 450° C برابر با دمای تف جوشی منیزیم است (دمای تف جوشی پودرهای فلزی در حدود 0.75 نقطه ذوب ماده است).

شکل 2 نمودار چگالی نسبی برحسب زمان فشرده‌سازی را برای فشار 300 و 600 مگاپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود در فشار 600 مگاپاسکال بیشترین چگالی حاصل شد؛ بنابراین فشار 600 مگاپاسکال و مدت زمان 25 دقیقه برای ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود. متراکم‌سازی شبه‌استاتیکی پودر نانو کامپوزیت نیز با استفاده از دستگاه پرس اینسترون با نرخ کرنش $0.008\ s^{-1}$ و در حضور گرمکن حرارتی 1200 وات جهت تأمین دماهای مورد نظر انجام شد (شکل 3).

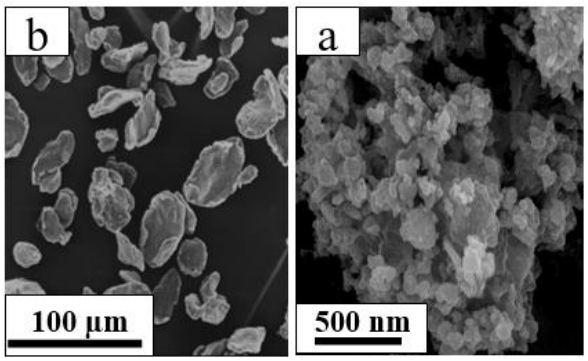

Fig. 1 SEM micrographs of a- SiC nanoparticles and b- pure Mg.

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی الف- نانو ذرات SiC و ب- ذرات پودر منیزیم

شکل 4 نمایی طرح‌واره از قالب و سنبه مورد استفاده برای تراکم پودر نانو کامپوزیت را نشان می‌دهد. قالب، درپوش و دو قرص از فولاد Mo40 و سنبه از فولاد مقاوم VCN150 تهیه شدند.

همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود دو قرص با ضخامت 5 میلی‌متری هم‌جنس و هم‌قطر با پانچ ساخته شدند و در بالا و پایین پودر قرار داده گرفتند. برای هر آزمایش 3.5 گرم از پودر با چگالی اولیه 55% از چگالی تئوری (1740 کیلوگرم بر مترمکعب برای منیزیم و 3220 کیلوگرم بر مترمکعب برای SiC) برای تراکم در نظر گرفته شد. اسپری MoS_2 به منظور کاهش نیروی اصطکاکی و بهبود کیفیت سطح نمونه‌ها و همچنین به عنوان روان‌کاری بین سنبه و دیواره قالب استفاده شد. به منظور بررسی اثرات دما و درصد نانو و با تغییر هر دو پارامتر آزمایش‌ها طراحی شدند. در نهایت نمونه‌های نانو کامپوزیت استوانه‌ای به قطر 15 میلی‌متر و ارتفاع 12 میلی‌متر به ترتیب حاوی 0، 1.5، 3، 5 و 10 درصد از SiC در سه دمای 25 (دمای اتاق)، 250 و 450 درجه سلسیوس تولید شدند (شکل 5).

2-3- آزمایش‌های تعیین خواص

آزمایش‌هایی به شرح زیر به منظور بررسی اثر درصد نانو ذرات SiC بر خواص

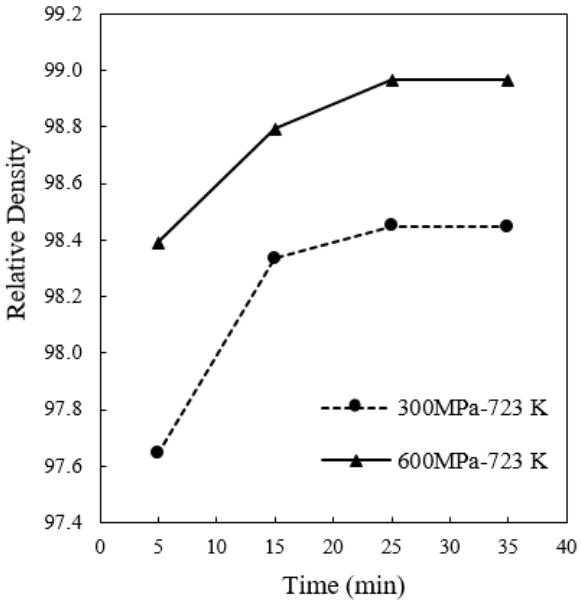

Fig. 2 Relative density variation by time under 300 and 600 MPa compact pressure

شکل 2 نمودار چگالی نسبی برحسب زمان فشرده‌سازی را برای دو مقدار فشار 300 و 600 مگاپاسکال

Fig. 3 Quasi-static hot pressing equipment using for powder compaction

شکل 3 نمایی از تجهیزات مورد استفاده جهت متراکم‌سازی پودر

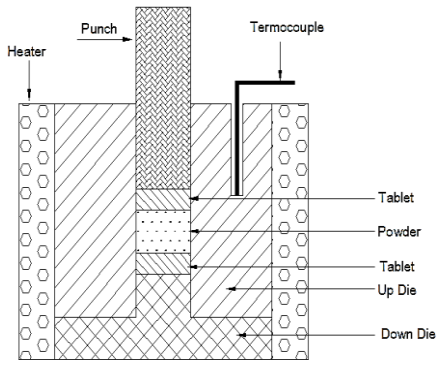

Fig. 4 Schematic view of punch and die used for powder compaction

شکل 4 نمایی از قالب و پانچ مورد استفاده برای تراکم پودر

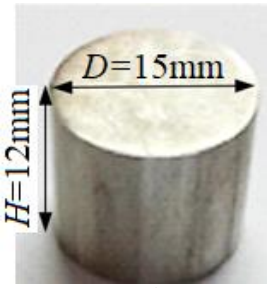

Fig. 5 A typical compacted specimen fabricated by hot pressing

شکل 5 نمونه تولیدشده به روش متراکم‌سازی شبه‌استاتیکی داغ

مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های نانو کامپوزیت پایه منیزیمی انجام شد:

الف- از دو میکروسکوپ نوری و الکترونی جهت بررسی میکرو ساختار و کیفیت تراکم نمونه‌ها استفاده شد که با استفاده از آن‌ها می‌توان کیفیت تراکم و نحوه توزیع ذرات را مشاهده نمود.

ب- یکی از مهم‌ترین کمیت‌های فیزیکی در روش متالورژی پودر محاسبه چگالی نسبی نمونه‌هاست. بدین منظور برای افزایش دقت در اندازه‌گیری چگالی در این تحقیق از روش ارشمیدس [16] برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده گردید. براساس این اصل به هرجسم فرو رفته در آب نیرویی برابر با وزن آب جابه‌جا شده به سمت بالا وارد می‌شود. در این روش وزن نمونه پیش از غوطه‌وری در آب اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه یک تا دو روز باید داخل آب باشد تا تمام منافذ آن از آب اشباع گردد. در نهایت با غوطه‌ور ساختن نمونه در آب به کمک یک سیم مفتولی نازک، مقدار نیرویی که قطعه به آب وارد می‌کند (در واقع عکس‌العمل نیرویی است که از طرف آب به قطعه وارد می‌شود یا همان نیروی ارشمیدس) اندازه‌گیری می‌شود. این نیروی اخیر به دلیل این‌که چگالی آب برابر 1 در نظر گرفته می‌شود، برابر حجم آب جابه‌جا شده یا حجم جسم است. با داشتن جرم و حجم قطعه به راحتی چگالی نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

ج- در این پژوهش میکروسختی ویکرز نمونه‌های تولیدی طبق استاندارد ASTM-E384 [17] اندازه‌گیری گردید. به منظور محاسبه سختی نمونه‌ها بار 100 گرمی بر نمونه‌ها به مدت 15 ثانیه اعمال گردید. سختی هر نمونه برای محاسبه دقیق‌تر و جلوگیری از اندازه‌گیری تصادفی در 6 نقطه شامل سه‌نقطه روی سطح بالا و سه‌نقطه روی سطح پایین اندازه‌گیری گردید. آزمون سختی‌سنجی برای هر نمونه جهت اطمینان از دقت نتایج دست کم سه مرتبه انجام گردید.

د- برای تعیین خواص استحکام فشاری نمونه‌های متراکم شده در حالت بارگذاری استاتیکی با نرخ کرنش $0.008\ s^{-1}$ با استفاده از دستگاه اینسترون با سرعت فک 5 میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. سطوح بالا و پایین به منظور اعمال شرایط کرنش همگن در نمونه‌ها به روان‌کار آغشته شد. آزمون فشار تا شکست هر نمونه ادامه یافت. تنش و کرنش مهندسی با به دست آمدن نمودار نیرو- جابه‌جایی مربوط به هر نمونه محاسبه گردید.

ه- آزمایش فشار با نرخ کرنش $1600\ s^{-1}$ جهت مطالعه رفتار نانو کامپوزیت‌های تولیدشده در نرخ کرنش بالا به کمک میله فشاری هاپکینسون انجام پذیرفت.

شکل 6 نمایی از دستگاه هاپکینسون فشاری را نشان می‌دهد. در این آزمایش نمونه بین دو میله بلند (میله ورودی و خروجی) ساخته شده از مواد با استحکام بالا فشرده می‌شود. دلیل استحکام بالای این دو میله این است که هنگام تغییرشکل پلاستیک نمونه، این دو قسمت الاستیک باقی بمانند میله‌های ورودی و خروجی دستگاه به قطر 20 میلی‌متر و طول 3 متر است. نیروی محرکه دستگاه توسط یک تفنگ گاز تک‌مرحله‌ای با هوای فشرده با حداکثر فشار 30 بار تأمین می‌شود. با شلیک میله ضربه‌زننده از تفنگ گازی، موج کرنش فشاری $\varepsilon_I(t)$ در میله ورودی ایجاد و توسط کرنش‌سنج 1 اندازه‌گیری می‌شود. مقداری از موج از طریق نمونه به میله خروجی منتقل می‌گردد. قسمت منعکس‌شده به عنوان یک موج کششی با کرنش $\varepsilon_R(t)$ و توسط کرنش‌سنج 1 ثبت می‌شود. کرنش فشاری عبوری $\varepsilon_T(t)$ نیز توسط فشارسنج 2 ثبت می‌گردد. با توجه به تغییر شکل یکنواخت نمونه می‌توان رابطه (1) را بیان نمود.

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

حال می‌توان تنش، کرنش و نرخ کرنش اعمالی به نمونه را با استفاده از روابط (2-4) محاسبه نمود [18].

که در آن C_o سرعت موج طولی در میله‌ها، L_s طول اولیه نمونه، E مدول یانگ میله‌ها، A و A_s به ترتیب سطح مقطع میله و نمونه هستند.

$$\sigma = \frac{EA}{2A_s}\left(\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)\right) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{C_0\left(\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)\right)}{L_s} \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{C_0}{L_s}\int_0^t -\frac{C_0\left(\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)\right)}{L_s}dt \quad (4)$$

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی میکرو ساختاری

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های متراکم شده در دمای 450 درجه سلسیوس برای مقادیر 0 و 3 درصد وزنی نانو ذرات SiC نشان را می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود افزایش درصد نانو ذرات SiC در زمینه منجر به پیدایش حفره و در نتیجه بروز تخلخل در نمونه می‌شود. همچنین می‌توان در برخی نواحی کلوخه‌ای شدن ذرات نانو را نیز مشاهده نمود. قوی بودن نیروهای واندروالس موجود در بین ذرات دلیل اصلی تمایل

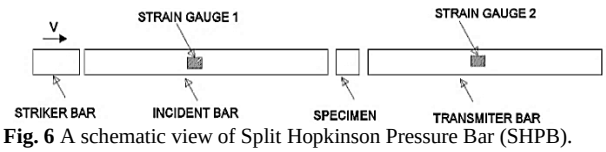

Fig. 6 A schematic view of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB).

شکل 6 نمایی از دستگاه میله هاپکینسون فشاری.

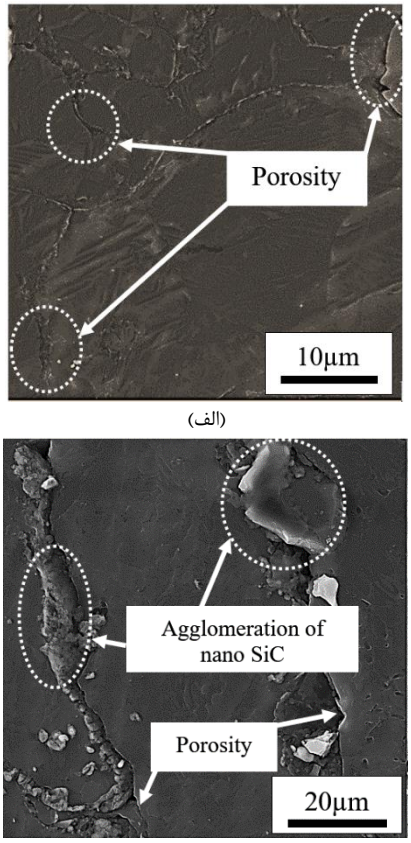

Fig. 7 SEM micrographs of compacted specimen: a- Mg-0vol% SiC, b- Mg-3vol% SiC

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانو کامپوزیت Mg-SiC: الف- Mg-0vol% SiC، ب- Mg-3vol% SiC

طبیعی به کلوخه‌ای شدن است. در برخی موارد کاهش تراکم نسبی نیز در اثر افزایش درصد فاز تقویت‌کننده گزارش شده است [14,11].

3-2- بررسی چگالی نسبی

در روش متالورژی پودر همواره چگالی به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای کیفیت ساخت شناخته می‌شود. نتایج مربوط به چگالی نسبی و اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌های فشرده شده در دمای 450 درجه سلسیوس در جدول 1 آمده است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود با افزایش در صد نانو ذرات، چگالی نسبی کاهش و درنتیجه تخلخل افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به کلوخه‌ای شدن نانو ذرات دانست، همچنین حضور ذرات سخت و غیرقابل شکل‌پذیری در زمینه نرم و شکل‌پذیر توانایی فشردن مواد را کاهش می‌دهد. کاهش توانایی فشردگی برای کسر حجمی بیشتر فاز تقویت‌کننده افزایش می‌یابد [7].

تغییرات چگالی نسبی نسبت به دما و مقادیر نانو ذره در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی دماهای متراکم‌سازی با افزایش درصد نانو ذرات چگالی نسبی کاهش‌یافته است. درحالی‌که با افزایش دما چگالی نسبی به ازای هر درصد نانو نیز افزایش می‌یابد. زیرا در دماهای فشرده‌سازی بالا، سختی و تنش تسلیم پودر کاهش می‌یابد و امکان دسترسی به درصد تراکم بیشتری وجود دارد [19]. همچنین، افزایش دما باعث افزایش تراکم و تسهیل در فرآیند تف جوشی می‌شود [20,13].

جهت بررسی بیشتر اثر دما در فرایند فشرده‌سازی پودر نانو کامپوزیت، تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌ها در شکل 9 نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان تخلخل در نمونه با افزایش دما به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. نمونه‌هایی که در دماهای پایین‌تر فشرده می‌شوند دارای حفره‌هایی با گوشه‌های تیز هستند که دلیل آن عدم تف جوشی کامل آن‌هاست.

3-3- بررسی میکرو سختی

تغییرات میکرو سختی ویکرز برای درصدهای مختلف SiC به ازای دماهای مختلف فشرده‌سازی در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود میکرو سختی نمونه‌ها به ازای 10% نانوذره در دماهای 25، 250 و 450 درجه سلسیوس به ترتیب نسبت به منیزیم خالص 1%، 27% و 22% افزایش یافته است.

علاوه‌بر این مشاهده می‌شود در دمای بالا افزودن نانو ذرات، میکرو سختی را بیشتر افزایش داده است، زیرا پودر مدت زمان طولانی‌تری تحت دما و فشار بالا قرار گرفته است. در نتیجه فضاهای بین ذرات پودر در دمای بالا ناپدید شده و یک تف‌جوشی کامل به دست می‌آید [21]. این بهبود در درجه اول می‌تواند به علت توزیع نسبتاً یکسانی از فاز تقویت‌کننده نانو باشد [22]. در درجه بعدی می توان حضور تقویت‌کننده‌های SiC سخت‌تر که به عنوان محدودیت برای تغییر شکل موضعی در هنگام فشرده‌سازی (اثرات سخت شدن ذرات نانو ذرات SiC) بیان کرد، همچنین از آن‌جا که توزیع فاز تقویت‌کننده یکنواخت است، بهبود سختی می‌تواند به دلیل سختی ذاتی نانو ذرات به‌کار رفته در نمونه‌ها نیز به وجود آید [23,15].

3-4- بررسی استحکام فشاری

در شکل 11 منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی برای تمامی نمونه‌های نانو کامپوزیت تولید شده در دمای 450 درجه سلسیوس نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود افزودن نانو ذرات به منیزیم خالص توانسته است استحکام فشاری نهایی را به طور میانگین بیش از 46% بهبود بخشد، همچنین علاوه‌بر این بهبود افزایش 10% ازدیاد طول نیز در نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

افزایش استحکام نهایی فشاری ناشی از استحکام و سختی نانو ذرات است. علاوه‌بر این یک لایه اکسید منیزیم که به‌طور کلی ذرات را پوشش می‌دهد می‌تواند به عنوان یک تقویت‌کننده (MgO) به افزایش استحکام کمک کند [25].

تغییرات استحکام فشاری نهایی نمونه‌های نانو کامپوزیت با توجه به درصد کسر حجمی نانو ذرات در دمای 25، 250 و 450 درجه سلسیوس در شکل 12 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده شده بهبود

جدول 1 چگالی تئوریک، آزمایشگاهی و نسبی نانوکامپوزیت‌های تولیدی در دمای 450 درجه سلسیوس

Table 1 Density measurements of the compacted nanocomposites at 450 °C

ماده	چگالی تئوری (g/cm^3)	چگالی آزمایشگاهی (g/cm^3)	چگالی نسبی (%)	تخلخل (%)
Mg	1.740	1.722	0.989	1.03
Mg-1.5 vol% SiC	1.762	1.740	0.987	1.22
Mg-3 vol% SiC	1.784	1.753	0.983	1.69
Mg-5 vol% SiC	1.814	1.777	0.980	2.00
Mg-10 vol% SiC	1.888	1.847	0.978	2.13

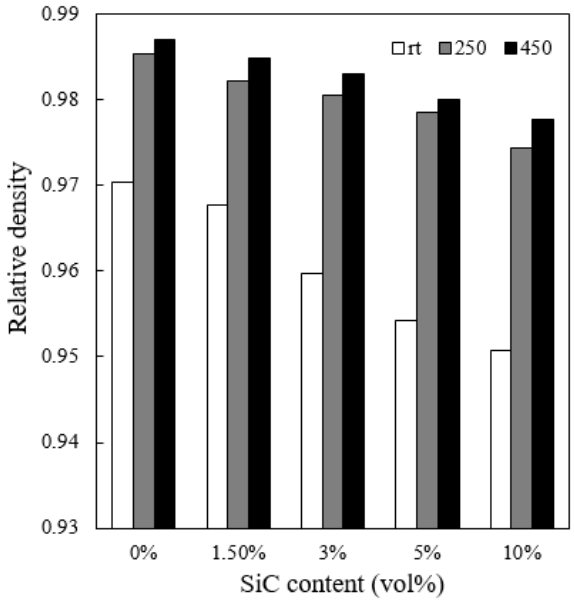

Fig. 8 Variations of relative densities against SiC content

شکل 8 تغییرات چگالی نسبی نمونه‌ها به ازای درصدهای مختلف SiC.

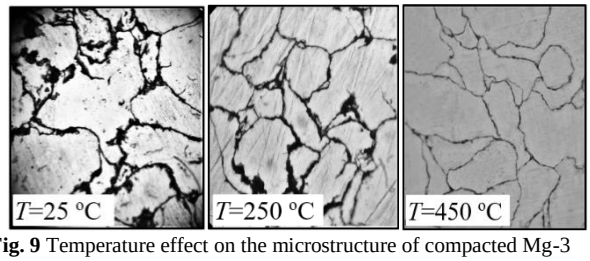

Fig. 9 Temperature effect on the microstructure of compacted Mg-3 vol% SiC specimens fabricated at 25 °C, 250 °C and 450 °C

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار نانو کامپوزیت با 3% حجمی SiC در دمای اتاق، 250 و 450 درجه سلسیوس

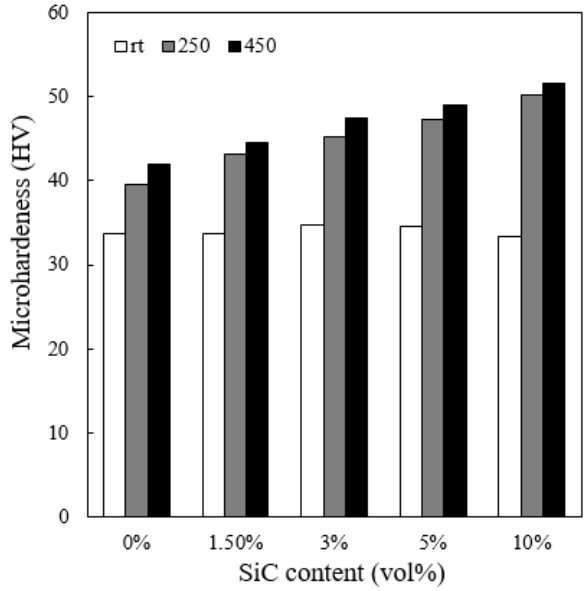

Fig. 10 Variation of hardness versus the SiC content.

شکل 10 تغییرات میکرو سختی نمونه‌ها به ازای درصدهای مختلف SiC.

استحکام فشاری نهایی با افزایش دمای تراکم به 450 درجه سلسیوس برای 3% SiC به‌طور محسوسی افزایش یافته است، در حالی که افزایش بیشتر نانو ذرات اندکی منجر به کاهش استحکام نهایی فشاری شده است؛ بنابراین افزودن 3% SiC در دمای 450 درجه سلسیوس می‌تواند استحکام بهینه را در نمونه نانو کامپوزیت به ارمغان آورد. این بهبود را می‌توان به دلیل طولانی‌بودن مدت زمانی که پودر تحت دما و فشار بالا قرار گرفته منجر به کیفیت بالای تثبیت و تفجوشی بهتر نمونه‌ها دانست. افزودن بیش از 3% SiC باعث کاهش UCS خواهد شد. دلیل آن این است که تخلخل نمونه با افزایش محتوای تقویت‌کننده افزایش می‌یابد، همان‌طور که در بخش چگالی بحث شده است. علاوه‌بر این محتویات بالاتر از ذرات نانو ذرات سخت سرامیکی SiC باعث افزایش احتمال آگلومره شدن نانو ذرات در داخل نمونه می‌شود. چندین تحقیق نیز اثرات ناخواسته تقویت فاز دوم را گزارش کرده‌اند [24].

استحکام تسلیم فشاری نمونه‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی محاسبه و در جدول 2 ارائه شده است. به طور کلی با افزودن نانو ذرات ازدیاد طول نمونه‌ها کاهش یافته است. تقویت‌کننده‌های سرامیکی سخت مانند SiC غیرقابل انعطاف بوده و سختی بالای آن‌ها منجر به افزایش سختی و استحکام نمونه‌ها خواهد شد. برخی از مکانیسم‌هایی تقویت مانند اوروان و عدم انطباق در ضریب انبساط حرارتی Mg ($24\cdot10^{-6}$/K) و SiC($4\cdot10^{-6}$/K) که منجر به تولید نابه‌جایی‌ها می‌شود را می‌توان دلیل استحکام بالا دانست. دما نقش قابل توجهی در تقویت نانو کامپوزیت‌ها از طریق پدیده عدم انطباق حرارتی دارد [25]. تحقیقات پیشین نشان داده که عدم انطباق حرارتی مهم‌ترین عامل افزایش مقاومت نانو کامپوزیت‌ها با افزایش کسر حجمی از ذرات نانو است [25].

3-5- بررسی خواص مکانیکی در نرخ کرنش بالا

آزمایش فشار دینامیکی با نرخ کرنش $1600\ s^{-1}$ بر نمونه‌های نانو کامپوزیتی با استفاده از دستگاه هاپکینسون فشاری انجام شد که در شکل 6 نشان داده شده است. نمودار تنش- کرنش دینامیکی (خواص مکانیکی در نرخ کرنش بالا) مستخرج از آزمایش یادشده در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام نهایی فشاری دینامیکی با افزایش مقدار نانو ذرات تا 3% نیز افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که بیشترین استحکام دینامیکی مربوط به نمونه نانو کامپوزیت با 3% نانو ذره است که در نزدیک به 18% نسبت به منیزیم خالص بهبود خواص را نشان می‌دهد.

براساس نتایج ارائه شده در شکل‌های 11 و 13 نتیجه می‌شود که بهینه‌ترین درصد نانو ذره جهت دست‌یابی به بهترین خواص مکانیکی کسر حجمی 3% است؛ بنابراین در شکل 14 نمودار تنش- کرنش نانو کامپوزیت

جدول 2 خواص فشاری نمونه‌های تولی در دمای مختلف فشرده‌سازی

Table 2 Compressive properties of samples at different temperatures

نمونه	تنش تسلیم فشاری (MPa)			بیشینه استحکام فشاری (MPa)			ازدیاد طول (%)		
	25 °C	250 °C	450 °C	25 °C	250 °C	450 °C	25 °C	250 °C	450 °C
Mg -0%SiC	35	40	45	46	60	126	10	10	15
Mg -1.5%SiC	65	75	80	53	97	156	12	18	20
Mg- 3%SiC	95	110	125	60	126	198	10	16	17
Mg -5%SiC	92	105	120	58	115	190	12	18	19
Mg -10%SiC	85	90	122	50	106	185	12	15	16

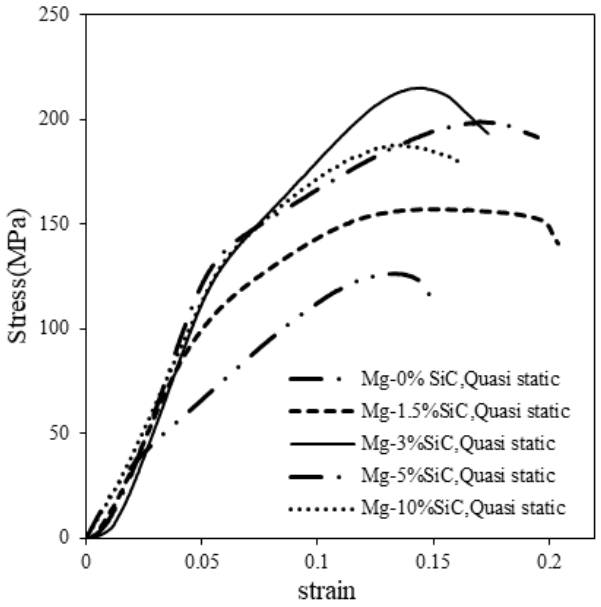

Fig. 11 Comparison of engineering compressive stress-strain curves of nanocomposite samples at strain rate of 0.008 s^{-1}

شک 11 نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌های نانو کامپوزیت در نرخ کرنش پایین

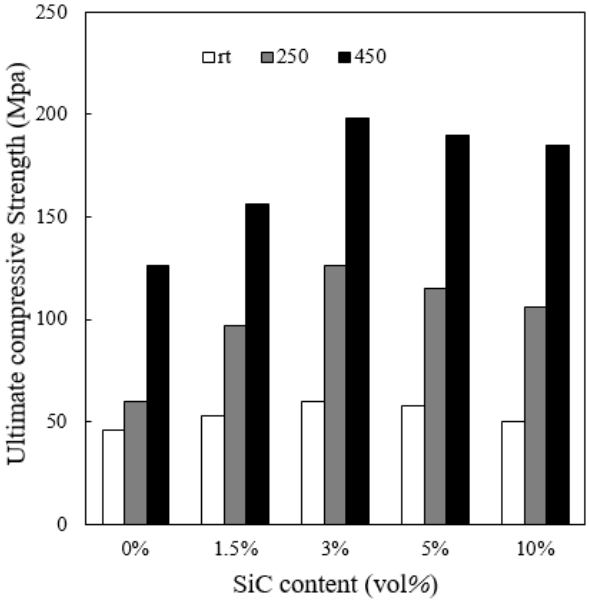

Fig. 12 Ultimate compressive strength of nanocomposte against SiC content at strain rate of 0.008 s^{-1}

شکل 12 تغییرات استحکام بیشینه فشاری نمونه‌ها به ازای درصدهای مختلف SiC در نرخ کرنش پایین

با کسر حجمی 3% در دو نرخ کرنش بالا و پایین با نمودارهای حاصل از منیزیم خالص مقایسه شده است.

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود استحکام نهایی فشاری دینامیکی نسبت به استحکام نهایی فشاری استاتیکی به ترتیب برای نمونه‌های منیزیم خالص و نانو کامپوزیت با کسر حجمی 3% به ترتیب 110% و 55% افزایش را نشان می‌دهد. در نهایت استحکام فشاری نهایی نمونه‌ها برای دو بارگذاری متفاوت جهت مقایسه اثر درصد نانو ذره بر رفتار مکانیکی دینامیکی و استاتیکی در شکل 15 نشان داده شده است.

براساس شکل افزایش درصد SiC تا حدود 3% در هر دو حالت

استاتیکی و دینامیکی موجب بالا رفتن استحکام ماده و از 3% به بالا تأثیر مهمی ندارد و اندکی هم سبب کاهش استحکام می‌گردد. این منحنی با نتیجه مشاهده شده در شکل 12 توافق کامل دارد.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نمونه‌های نانو کامپوزیت پایه منیزیم در سه دمای 25، 250 و 450 درجه سلسیوس به روش فشرده‌سازی شبه‌استاتیکی تولید شدند. به منظور بررسی اثر درصد نانو ذره نمونه‌های با درصد 0، 1.5، 3، 5 و 10 ساخته شدند. آزمایش‌هایی از جمله سختی سنجی، میکرو ساختار، چگالی، فشار دینامیکی و استاتیکی روی نمونه‌ها برای مقایسه خواص فیزیکی و

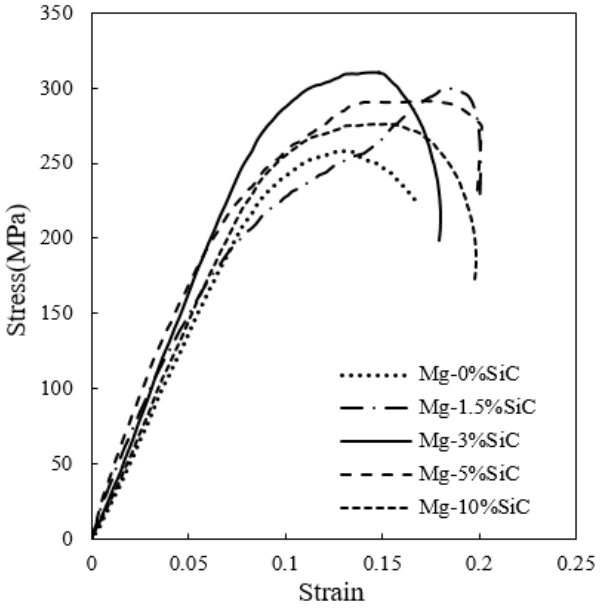

Fig. 13 Comparison between the engineering compressive stress-strain curves of nanocomposite samples at strain rates of 1600 s^{-1}

شکل 13 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های نانو کامپوزیت تولیدی در نرخ کرنش بالا.

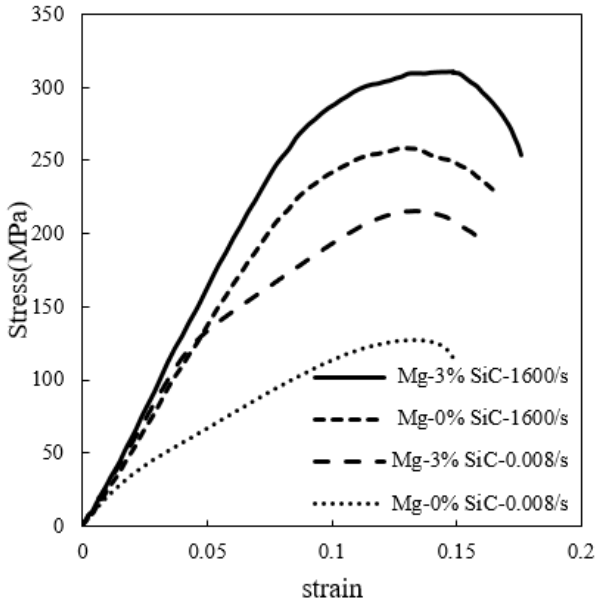

Fig. 14 A comparison between strain rates of 0.008 s^{-1}, 1600 s^{-1} compressive behavior of 3% vol SiC nanocomposite

شکل 14 مقایسه رفتار فشاری نانوکامپوزیت با 3% SiC در نرخ کرنش 0.008 s^{-1} و 1600 s^{-1}

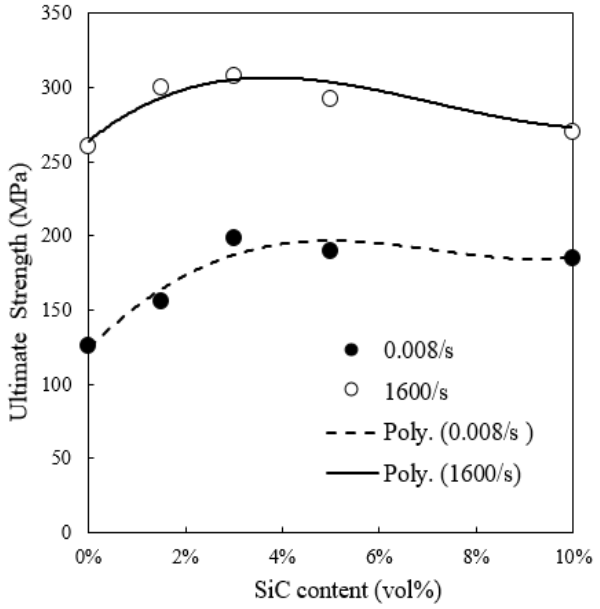

Fig. 15 Variation of ultimate compressive strength versus SiC content at strain rates of 0.008 s^{-1}, 1600 s^{-1}

شکل 15 نمودار استحکام نهایی فشاری در دو نرخ کرنش برای درصدهای مختلف نانو ذرات

مکانیکی نمونه‌ها انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان آن‌ها را به صورت زیر خلاصه نمود.

1- میکرو سختی در نمونه‌ها با افزایش درصد کسر حجمی نانو ذرات افزایش یافت. برای نمونه‌های فشرده شده در دمای 25 درجه سیلسیوس میکرو سختی ویکرز 10% افزایش یافت، در حالی که این افزایش برای فشرده‌سازی در دمای 450 درجه سلسیوس حدود 60% حاصل گردید.

2- افزایش دما در حین فرایند تولید نمونه‌ها باعث بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها در تمامی درصدهای حجمی نانو ذرات می‌شود.

3- استحکام فشاری با افزایش درصد نانو ذرات تا 3% افزایش و بعد از آن روبه کاهش گذاشت. این مقدار را می‌توان به عنوان درصد بهینه در نظر گرفت.

4- استحکام فشاری نهایی نانو کامپوزیت با افزایش دمای تا 450 درجه سلسیوس با 3% کسر حجمی برای نرخ کرنش بالا و پایین به ترتیب 18% و 57% افزایش یافت. بدین ترتیب نمونه‌های نانو کامپوزیت تولید شده در نرخ کرنش‌های بالا خواص بسیار بهتری از خود نشان می‌دهند.

5- مراجع

[1] S. Hassan, M. Gupta, Effect of different types of nano-size oxide particulates on microstructural and mechanical properties of elemental Mg, *Materials Science*, Vol. 41, No. 8, pp. 2229-2236, 2006.

[2] G. Majzoobi, A. Atrian, M. Enayati, Tribological properties of Al7075-SiC nanocomposite prepared by hot dynamic compaction, *Composite Interfaces*, Vol. 22, No. 7, pp. 579-593, 2015.

[3] Q. B. Nguyen, M. Gupta, T. S. Srivatsan, On the role of nano-alumina particulate reinforcements in enhancing the oxidation resistance of magnesium alloy AZ31B, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 500, No. 1, pp. 233-237, 2009.

[4] M. Gupta, M. Lai, D. Saravanaranganathan, Synthesis, microstructure and properties characterization of disintegrated melt deposited Mg/SiC composites, *Materials Science*, Vol. 35, No. 9, pp. 2155-2165, 2000.

[5] C. Goh, J. Wei, L. Lee, M. Gupta, Development of novel carbon nanotube reinforced magnesium nanocomposites using the powder metallurgy technique, *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 1, pp. 7, 2005.
[6] H. Ferkel, B. L. Mordike, Magnesium strengthened by SiC nanoparticles, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 298, No. 1, pp. 193-199, 2001.
[7] E. Francis, N. E. Prasad, D. MILAC-nbn, C. Ratnam, P. S. Kumar, V. V. Kumar, Synthesis of nano alumina reinforced magnesium-alloy composites, *Synthesis*, Vol. 27, pp. 35–44, 2011.
[8] C. Mayencourt, R. Schaller, Mechanical-stress relaxation in magnesium-based composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1, pp. 286-291, 2002.
[9] C. Suryanarayana, N. Al-Aqeeli, Mechanically alloyed nanocomposites, *Progress in Materials Science*, Vol. 58, No. 4, pp. 383-502, 2013.
[10] Q. Jiang, H. Wang, B. X. Ma, Y. Wang, F. Zhao, Fabrication of B 4 C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy, *Alloys and Compounds*, Vol. 386, No. 1, pp. 177-181, 2005.
[11] S. K. Thakur, G. T. Kwee, M. Gupta, Development and characterization of magnesium composites containing nano-sized silicon carbide and carbon nanotubes as hybrid reinforcements, *Materials Science*, Vol. 42, No. 24, pp. 10040-10046, 2007.
[12] 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: Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 2, pp. 375-387, 2016.
[13] A. Atrian, G. Majzoobi, M. Enayati, H. Bakhtiari, Mechanical and microstructural characterization of Al7075/SiC nanocomposites fabricated by dynamic compaction, *Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 21, No. 3, pp. 295-303, 2014.
[14] 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, No. 1, pp. 73-82, 2015.
[15] G. H. Majzoobi, A. Atrian, M. K. Pipelzadeh, Effect of densification rate on consolidation and properties of Al7075–B4C composite powder, *Powder Metallurgy*, Vol. 58, No. 4, pp. 281-288, 2015.
[16] K. S. Tun, M. Gupta, Improving mechanical properties of magnesium using nano-yttria reinforcement and microwave assisted powder metallurgy method, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 13, pp. 2657-2664, 2007.
[17] ASTM E384, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
[18] G. H. Majzoobi, F. Freshteh-Saniee, S. Faraj Zadeh Khosroshahi, H. Beik Mohammadloo, Determination of materials parameters under dynamic loading. Part I: Experiments and simulations, *Computational Materials Science*, Vol. 49, No. 2, pp. 192-200, 2010.
[19] A. Simchi, G. Veltl, Behaviour of metal powders during cold and warm compaction, *Powder Metallurgy*, Vol. 49, No. 3, pp. 281-287, 2006.
[20] M. J. Yi, H.Q. Yin, J. Z. Wang, X. J. Yuan, X. H. Qu, Comparative research on high-velocity compaction and conventional rigid die compaction, *Frontiers of Materials Science in China*, Vol. 3, No. 4, pp. 447-451, 2009.
[21] T. Iwaoka, M. Nakamura, Effect of compaction temperature on sinterability of magnesium and aluminum powder mixtures by warm compaction method, *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 5, pp. 943-947, 2011.
[22] D. Lloyd, Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites, *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-23, 1994.
[23] K. Hokamoto, S. Tanaka, M. Fujita, S. Itoh, M. Meyers, H.C. Chen, High temperature shock consolidation of hard ceramic powders, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 239, No. 1, pp. 1-5, 1997.
[24] H. Hafizpour, A. Simchi, S. Parvizi, Analysis of the compaction behavior of Al–SiC nanocomposites using linear and non-linear compaction equations, *Advanced Powder Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 273-278, 2010.
[25] Z. Zhang, D. 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.